TELEDETECCIÓN
Bosques y cambio climático



Editores:
Carmen Recondo González
Enrique Pendás Molina

TELEDETECCIÓN

Bosques y cambio climático

Editores:
Carmen Recondo González
Enrique Pendás Molina

XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección
Mieres del Camino (Principado de Asturias),
del 21 al 23 de septiembre de 2011

FOTOGRAFÍAS DE LA PORTADA:

Bosque de Muniellos, declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO en el año 2000 y actualmente uno de los espacios naturales más protegidos del Principado de Asturias. Las fotografías han sido realizadas por José Valentín Roces Díaz.

Antena MODIS de la Universidad de Oviedo adquirida con fondos FEDER (UNOV05-23-006) e instalada por el INDUROT en 2007 en el Campus de Mieres.

DISEÑO DE LA PORTADA Y CONTRAPORTADA:

Juan Carlos Fernández Iglesias.

TELEDETECCIÓN: Bosques y cambio climático

Editores: Carmen Recondo González y Enrique Pendás Molina

© De los autores. Mieres del Camino, 2011.
Depósito Legal: AS-3588-2011
Impresión: Gráficas La Morgal

Agradecimientos

Son muchas las personas y entidades que han hecho posible la celebración de este XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET) en Asturias y la publicación de este libro con las comunicaciones presentadas en él.

Quiero agradecer en primer lugar a la AET, representada por la Junta Directiva actual y especialmente a su presidente, Federico González Alonso, el haber confiado en nosotros para la organización del Congreso de este año 2011, tan señalado para la AET al cumplirse su 25 aniversario. También a todos los socios por su ayuda y por sus constantes ánimos.

A todos los organismos, instituciones y empresas que han colaborado económicamente con el Congreso y que han confiado en nuestra organización para presentar sus productos y servicios durante la celebración del mismo. Agradecemos su esfuerzo incluyendo su logotipo en la contraportada de este libro. En este contexto citar especialmente al INIA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria) del Ministerio de Ciencia e Innovación, por la subvención concedida para la publicación de este libro.

Mi más sincero agradecimiento a las personas que han contribuido a que el Congreso tenga una alta calidad científica: ponentes invitados, autores de los trabajos y revisores. A los docentes de los cursos previos al Congreso, a los coordinadores de los grupos temáticos y a los moderadores de las sesiones, por su ayuda inestimable. Y, por supuesto, a todos los que os habéis inscrito en el Congreso y que con ello lo habéis hecho posible.

A todos los de casa, los de la Universidad de Oviedo, que nos han acompañado tan cercanamente en todo este largo proceso de la organización del Congreso. A Antonio Bernardo y Gloria Sánchez, por poner a nuestra disposición todos los espacios necesarios de la Escuela Politécnica de Mieres y todos los medios disponibles para la celebración del Congreso. A todos mis compañeros del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría y del Departamento de Explotación y Prospección de Minas, por ayudarnos en lo que estuvo en su mano. Y a todo el personal del INDUROT por su ayuda y por sus ánimos, especialmente a su director, Miguel Ángel Álvarez García, por su apoyo incondicional y a Luján, que nos hace cada día la vida más fácil a todos en el INDUROT.

Y a todos aquellos que pueda haber omitido sin querer y que nos hayan ayudado en alguna medida.

Gracias a todos,

Carmen Recondo González
Presidenta del Comité Organizador

PRÓLOGO

Estimados amigos:

Me pide la Presidenta del Comité Organizador del XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, que escriba el Prólogo de este Libro de Actas y como no podía ser de otra manera, agradezco su deferencia y es para mí un honor el hacerlo, en mi condición de Presidente de la AET y en representación de todos los componentes de la actual Junta Directiva de la AET.

Este XIV Congreso de la AET que se celebra en Mieres (Asturias) del 21 al 23 de septiembre 2011, es un Congreso muy especial, pues en el mismo vamos a celebrar los primeros 25 años de existencia de la AET.

Desde aquella primera reunión que tuvimos en el CSIC con el Profesor Antonio Ballester en Marzo de 1986, diecisiete investigadores españoles en temas de Teledetección, con objeto de organizarnos y coordinarnos de alguna manera, hasta hoy, ha pasado bastante tiempo y los progresos realizados por la Comunidad Teledetectora en España han sido increíbles, por no decir sorprendentes, pues nunca se contaron con grandes medios económicos, solamente la vocación y el trabajo entusiasta de mucha gente, pueden en mi opinión explicar los resultados obtenidos a nivel nacional e internacional por los teledetectores de España.

La AET como asociación representativa de dicha comunidad ha trabajado mucho en el pasado y trabaja mucho en el presente para fomentar el desarrollo de la Teledetección en España y en nuestros países hermanos de Latinoamérica que comparten nuestro idioma común.

Nuestra página web (www.aet.org.es) pone a disposición de todas las personas que hablan el español en el mundo toda su producción científica (Revista de Teledetección y Actas de todos los Congresos de la AET celebrados) de forma totalmente libre y gratuita.

Creo que es un generoso y gran logro de todos los miembros de la AET y un motivo de orgullo que de forma clara nos reconocen nuestros muchos miles de visitantes al año procedentes de todo el mundo.

Nuestra asociación cuenta entre sus miembros con reconocidos especialistas a nivel mundial y algunos de ellos lideran proyectos de futuros satélites de la ESA, de su programa de Cambio Climático (ESA-CCI) y de otros relevantes proyectos y organizan en España de forma sistemática congresos internacionales de impacto mundial sobre técnicas de Teledetección.

En lo que respecta al ámbito empresarial, varios de nuestros socios corporativos también son líderes en determinadas disciplinas a nivel internacional y alguno de ellos ha puesto en órbita su propio satélite comercial de Observación de la Tierra.

En los próximos años se lanzarán los satélites españoles INGENIO y PAZ dentro del contexto del Plan Nacional de Observación de la Tierra y del Plan Nacional de Teledetec-

ción, liderados y desarrollados por el CDTI, el INTA, el IGN y el Ministerio de Defensa junto con la industria espacial española.

Así pues, como acabo de exponer, en estos 25 años la Teledetección en España, gracias al esfuerzo de todos, ha avanzado muchísimo y el futuro que se avecina no puede ser más atractivo y esperanzador para los jóvenes teledetectores de España y Latinoamérica.

El lema de este XIV Congreso de la AET que se celebra en Mieres (Asturias) es "Bosques y Cambio Climático" y resulta especialmente adecuado en este año 2011 que se celebra en todo el mundo el Año Internacional de los Bosques.

Según el último informe de FAO sobre la situación de los bosques en el mundo FRA2010, los bosques están desapareciendo a un ritmo de 5,58 millones de hectáreas netas al año, durante el período 2005-2010, esto representa la desaparición anual del 0,14% de todos los bosques existentes en el mundo, es decir si no existiera regeneración, los bosques desaparecerían teóricamente del planeta en 714 años.

Estas terribles cifras representan una tremenda responsabilidad para la humanidad de cara a las generaciones futuras y precisamente la Teledetección ayudará de una manera decisiva a la conservación de los bosques en el mundo, por este motivo todos nuestros esfuerzos nunca serán baldíos y estarán totalmente justificados.

Todos los trabajos que se recogen en este Libro de Actas han sido sometidos a un riguroso proceso de evaluación científica por pares y en consecuencia todos ellos presentan un elevado nivel de calidad. Por esta razón, animo desde aquí a sus autores para que hagan un esfuerzo adicional y los envíen para publicar en nuestra Revista de Teledetección, siguiendo las normas editoriales establecidas, si es que resultan seleccionados. Muchas gracias a todos los autores por su esfuerzo entusiasta, sin su trabajo este libro no sería posible.

Aprovecho también esta ocasión para agradecer a todos los socios de la AET (particulares y corporativos) todo su trabajo y el apoyo que nos prestan de forma tan generosa para que podamos continuar desarrollando nuestra importante labor en el futuro.

Finalmente quiero agradecer de una forma muy especial al Comité Organizador del XIV Congreso de la AET, representado por su Presidenta Carmen Recondo, al Comité Científico y a todos los patrocinadores, su generoso esfuerzo, trabajo y apoyo.

Espero que disfruten mucho durante su estancia de la maravillosa tierra de Asturias y sus gentes.

De nuevo, muchas gracias a todos.

Federico González-Alonso
Presidente de la AET
Bogotá, 27 de Junio 2011

INTRODUCCIÓN

Este libro contiene las comunicaciones presentadas en el XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET), celebrado en Mieres del Camino (Principado de Asturias) entre el 21 y el 23 de septiembre de 2011. Cita bienal imprescindible para los investigadores, profesionales y usuarios de la Teledetección de habla hispana, el año 2011 ha sido especialmente relevante para la AET por celebrarse su 25 Aniversario.

El congreso fue organizado por la Universidad de Oviedo, a través del INDUROT (Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio) y del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría del Departamento de Explotación y Prospección de Minas. El lema elegido para esta edición fue "Bosques y cambio climático", dada la importancia de la cubierta forestal en Asturias y su vulnerabilidad.

Las comunicaciones han sido clasificadas según las siguientes áreas temáticas:

- Agricultura
- Bosques
- Fotogrametría, Cartografía y Sistemas de Información Geográfica
- Incendios forestales
- Medio Ambiente, Recursos Hídricos, Edafología y Geología
- Meteorología y Clima
- Metodología, Divulgación y Formación
- Oceanografía y Recursos marinos

Dentro de cada área temática las comunicaciones han sido ordenadas alfabéticamente por el primer apellido del autor principal. Al final del libro se recoge el índice de autores con el número de la primera página de cada una de sus comunicaciones.

La revisión de los trabajos ha sido por pares y ha sido realizada por profesionales e investigadores de reconocido prestigio en el campo de la Teledetección, tanto a nivel nacional como internacional. Los componentes de este Comité Científico se indican en la página siguiente. Reiterar nuestro agradecimiento a todos ellos, así como a los autores.

Los editores,
Carmen Recondo González
Enrique Pendás Molina

COMITÉ CIENTÍFICO

Antón-Pacheco Bravo, Carmen (Instituto Geológico y Minero de España).
Arbelo Pérez, Manuel (Universidad de La Laguna).
Arbiol Bertrán, Román (ICC).
Arquero Hidalgo, Águeda (Universidad Politécnica de Madrid).
Calera Belmonte, Alfonso (Universidad de Castilla-La Mancha).
Calle Montes, Abel (Universidad de Valladolid).
Cantón Garbín, Manuel (Universidad de Almería).
Casanova Roque, José Luis (Universidad de Valladolid).
Caselles Miralles, Vicente (Universidad de Valencia).
Casterad Seral, María Auxiliadora (CITA, Gobierno de Aragón).
Chuvieco Salinero, Emilio (Universidad de Alcalá).
Cotos Yáñez, José Manuel (Universidad de Santiago de Compostela).
De la Riva Fernández, Juan (Universidad de Zaragoza).
De Miguel Llanes, Eduardo (INTA).
Díaz-Delgado Hernández, Ricardo (Estación Biológica de Doñana, CSIC).
Di Bella, Carlos (INTA-Argentina).
Domínguez Gómez, José Antonio (Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX).
Fernández Manso, Alfonso (Universidad de León).
Font Ferré, Jordi (Instituto de Ciencias del Mar, CSIC).
González Alonso, Federico (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, INIA).
González de Audícana Amenábar, María (Universidad de Navarra).
Gonzalo Martín, Consuelo (Universidad Politécnica de Madrid).
Lillo Saavedra, Mario (Universidad de Concepción. Chile).
Martín Isabel, María del Pilar (IEGD, CSIC).
Martínez Casasnovas, José Antonio (Universidad de Lleida).
Meliá Miralles, Joaquín (Universidad de Valencia).
Merino de Miguel, Silvia (Universidad Politécnica de Madrid).
Montesinos Aranda, Salomón (Geosys).
Moreno Burgos, Victoriano (INDRA Espacio).
Pérez Gutiérrez, Carlos (Universidad de Salamanca).
Pons Fernández, Xavier (Universidad Autónoma de Barcelona).
Rigol Sánchez, Juan P. (Universidad de Jaén).
Ruiz Fernández, Luis Ángel (Universidad Politécnica de Valencia).
Sobrino Rodríguez, José Antonio (Universidad de Valencia).
Tapiador Fuentes, Francisco J. (Universidad de Castilla-La Mancha).
Torres Palenzuela, Jesús M. (Universidad de Vigo).
Villa Alcázar, Guillermo (IGN-PNT).
Zarco Tejada, Pablo J. (Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC).

COMITÉ ORGANIZADOR

Presidenta: Carmen Recondo González
Vicepresidente: Miguel Ángel Álvarez García
Secretario Científico: Enrique Pendás Molina
Secretaría Económica: Roberto González Fernández y Adriana Suárez Paredes
(Fundación Universidad de Oviedo, FUO)
Webmaster: Daniel Villagrá García
Diseño gráfico: Juan Carlos Fernández Iglesias
Otros miembros: Luján Infanzón Díaz, Adán Abajo Chic, Eva Zapico Redondo y
Lucía Montero Martínez.

ÍNDICE

AGRICULTURA

Seguimiento de la producción forrajera en el Pirineo mediante la estimación de la radiación fotosintéticamente activa absorbida con imágenes Landsat-5 y Spot-4. M. Barrachina, J. Cristóbal y A.F. Tulla 1

Constelación multisensor para el seguimiento y clasificación de cultivos en el área de estudio de la Mancha Oriental. M. Belmonte, I. Arellano, I. Campos, C. Martínez-Beltrán y A. Calera 5

Utilización de imágenes aéreas multiespectrales para evaluar la disponibilidad de nitrógeno en maíz. R. Isla, D. Quílez, F. Valentín, M.A. Casterad, J. Aibar y M. Maturano 9

Detección automática de plantaciones de árboles de cultivo en imágenes de alta resolución espacial. E. Izquierdo-Verdiguier, L. Gómez-Chova, J. Amorós-López y G. Camps-Valls 13

Actualización de mapas de cultivos en las Islas Canarias por medio de imágenes de satélite de muy alta resolución espacial. M. Labrador-García, M. Arbelo y L.A. Arroyo 17

Comportamiento retrodispersivo de cultivos de secano observados mediante sensores radar en la banda C. A. Larrañaga, J. Álvarez-Mozos y L. Albizua;21 21

Uso de índices de vegetación en la estimación de cosecha de cultivos. Utilidad y limitaciones en el caso del trigo en el sur de España. F.L.M. Padilla, M.P. González-Dugo, S. Maas, P. Gavilán y J. Domínguez 25

Estima de parámetros estructurales en cultivos herbáceos a partir de imágenes Landsat. M. Pla, L. Juarez, M. Pérez, G. Bota, D. Giralt y L. Brotons 29

Correlación de variables fisiologicas en frutales mediante técnicas de agricultura de precisión. P. Pérez-Cutillas, J.J. Alarcón, M. Erena, I. Baños y D. Sánchez 33

Extracción automática de información de imágenes de alta resolución para el cálculo de necesidades hídricas en parcelas de cultivos arbóreos. J.A. Recio, L.A. Ruiz, M. Erena, D.S. Intrigliolo, T. Hermosilla , P. Pérez-Cutillas, M.A. Jiménez y J.L. Gil-Yepes 37

Monitorización del suelo mediante reflectometría con señales de oportunidad GNSS. N. Rodríguez-Álvarez, E. Valencia, X. Bosch-Lluis, I. Ramos-Perez, H. Park y A. Camps 41

Cuantificación de la rugosidad del suelo mediante medidas diurnas de reflectancia multiespectral de alta resolución espacial obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. J. Rodríguez-González, P.J. Zarco-Tejada y J.A. Gómez-Calero 45

Estimación del contenido hídrico de hojas de vid mediante medidas in-situ con espectroradiómetro y sonda de contacto. J.R. Rodríguez-Pérez, A.B. González-Fernández y M.F. Álvarez-Taboada 49

Aplicación de técnicas de teledetección y geostadística en la optimización de muestreos del LAI, en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura. M. Romero y S. Montesinos 53

Efectos de la construcción de terrazas en el desarrollo del cultivo en nuevas plantaciones de viña de la D.O.C. Priorat (Cataluña). A. Solaní, J.A. Martínez-Casasnovas y M.C. Ramos 57

Estimación de las necesidades hídricas del sorgo forrajero a partir del balance de energía y radiometría térmica. J.M. Sánchez, R. López-Urrea, E. Rubio y V. Caselles 61

Generación de compuestos sin nubes Landsat semanales para el Plan Nacional de Teledetección. G. Villa, J. Moreno, A. Calera, X. Pons, S. Molina, J. Amorós-López, G. Camps-Valls, J. Garrido, J. González-Matesanz, L. Gómez-Chova, J.A. Martínez-Pérez, J.J. Peces, Ll. Pesquer, N. Plaza, A. Porcuna y J.A. Tejeiro 65

BOSQUES

Técnicas de teledetección para la evaluación del inventario forestal de la isla de Tenerife. A. Alonso-Benito, M. Arbelo, P. Hernández-Leal y A. González-Calvo 69

Determinación de la temperatura de la superficie forestal de Tenerife usando datos de radiometría infrarrojo-térmica. M. Arbelo, A. Barreto, P. Hernández-Leal y A. González-Calvo 73

Grado de recubrimiento vegetal de las paredes de grandes barrancos a través del TSAVI derivado de imágenes Quickbird-2. D. Balcells, J.A. Martínez-Casasnovas y M.C. Ramos 77

Estudio de afecciones por plagas y decaimiento forestal en masas de coníferas mediante imágenes procedentes de sensores hiperespectrales. A. Cabello, J.E. Frieyro, L. Granado, A. Hayas, E. Méndez, G. Montoya, I. Pino, R.M. Navarro-Cerrillo y R. Hernández-Clemente 81

Relaciones entre variables de rodal y variables obtenidas mediante fotografías hemisféricas en masas de *Pinus pinaster y Pinus radiata* en el noroeste de España. F. Castedo-Dorado, M. Faba-Fernández y J.R. Rodríguez-Pérez 85

Efecto de la segmentación en imágenes de alta resolución espacial para la detección de cubiertas forestales. I.L. Castillejo-González, A. González-Jarraiz, F.J. Mesas-Carrascosa, M. Sánchez de la Orden y A. García-Ferrer 89

Detección y localización de árboles en zonas forestales mediante datos LiDAR e imágenes aéreas. J.L. Gil-Yepes, L.A. Ruiz, A. Fernández-Sarría y T. Hermosilla 93

Flujos de carbono en bosques mediterráneos integrando imágenes MODIS y datos meteorológicos. Validación en la Toscana (Italia). M.A. Gilabert, F. Maselli, A. Moreno, M. Chiesi y B. Martínez 97

Análisis de los bosques de la Península Ibérica en la década 2000-2010 a partir del estudio multi-temporal de datos MODIS GPP y EVI. C. Giner, B. Martínez y M.A. Gilabert 101

Detección temprana de estrés en coníferas a partir del índice de reflectancia fotoquímico (PRI) e imágenes térmicas de alta resolución. R. Hernández-Clemente, R.M. Navarro-Cerrillo, P.J. Zarco-Tejada, L. Suárez, J.E. Frieyro y A. Hayas 105

Caracterización de la vegetación a través de análisis de variables topográficas, bioclimáticas y de reflectividad en el PN de La Tinença de Benifassá. (Castellón, España). E. López-Pérez, T. Hermosilla y L.A. Ruiz 109

Desarrollo de una metodología operativa para la actualización de cartografía forestal. F. Moral, M. Lerner, B. Sánchez y M.J. Checa 113

Estimación del IAF y de la altura del arbolado a partir de datos LIDAR en masas artificiales de coníferas. R.M. Navarro-Cerrillo, R. Hernández-Clemente, R. Gómez, A. García-Ferrer y M. Sánchez de la Orden 117

Estimación del índice de área foliar y concentración de clorofila en masas repobladas de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*. R.M. Navarro-Cerrillo, R. Hernández-Clemente, J.E. Frieyro y A. Hayas 121

Seguimiento del cambio climático sobre la vegetación del Parque Nacional de Picos de Europa mediante fotografías aéreas e imágenes Landsat y MODIS. C. Recondo, A. Abajo, B. Jiménez-Alfaro, M.A. Álvarez y J.R. Obeso 125

Procedimiento para la estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR. L.A. Ruiz, T. Hermosilla , M. Godino, J. Almonacid, A. Fernández-Sarría, J.A. Recio, J.L. Gil-Yepes y F. Mauro 129

Parametrización de la relación fAPAR/IV para zonas forestales a partir de datos simulados con el modelo 4SAIL2. C. Sánchez, B. Martínez, M.A. Gilabert y A. Moreno 133

FOTOGRAMETRÍA, CARTOGRAFÍA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Implementación de la BTA desde el punto de vista de la empresa productora de cartografía. A. Alonso y H. Zapico 137

Propuesta metodológica para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe: Estado de situación y Avances. P.D. Blanco, G. López-Saldaña, R.R. Colditz, L.A. Hardtke, N.A. Mari, A. Fischer, C. Caride, P.G. Aceñolaza, H.F. del Valle, S. Opazo, W.F. Sione, M. Lillo-Saavedra, P. Zamboni, M.I. Cruz-López, J.A. Anaya, F. Morelli y S.C. de Jesús 141

La constelación de satélites Pleiades-HR1 y 2: De la teledetección a la fotogrametría. T. Fernández-de Sevilla 145

Diferentes metodologías de cálculo de volumen de copa en *Platanus hispanica* empleando láser escáner terrestre. A. Fernández-Sarría, L. Martínez, B. Velázquez-Martí, M. Sajdak, J. Estornell, J.A. Recio y T. Hermosilla 149

Modelización tridimensional semiautomática de entornos urbanos a partir de datos LIDAR combinados con información cartográfica. C. Fuentes-García, J. Suárez-Quirós y A. Alonso 153

Control Geométrico de un nuevo prototipo de colector solar cilindro-parabólico en la fase de pre-montaje mediante fotogrametría convergente. S. García-Cortés, A. Bello-García y C. Ordóñez 157

Cambios de ocupación del suelo en el área de Barcelona (1988-2004). J. Jorge, A. Reyes y R. Tarruella 161

Desarrollo de un SIG para la vigilancia ambiental de ríos situados en áreas urbanas. C. Ordóñez, M.R. Varela, E. Covián y S. García-Cortés 165

Servicio interoperable (WPS) de procesado de imágenes Landsat. L. Pesquer, J. Masó, G. Moré, X. Pons, J.J. Peces y E. Domenech 169

Estudio de biomasa forestal utilizando técnicas de fotogrametría y clasificación supervisada. R.Y. Rey-Moure, M. Castro-Fernández, J.F. Peón-Fernández y J. M. Torres-Palenzuela 173

Utilidad de las imágenes sintéticas para la determinación de la bondad de distintos algoritmos de corrección topográfica. I. Sola, M. González de Audícana, J. Álvarez-Mozos y J.L. Torres 177

Aplicación de fotografía digital + escaneado láser 3D para la virtualización de Arte Paleolítico Parietal. J.A. Suárez, P. González-Pumariega, R.J. Argüelles y A. Vidal 181

Procesado de las imágenes de alta resolución del PNT. J.A. Tejeiro, J.J. Peces, S. Luaces y J.A. Martínez-Pérez 185

Producción de Ortofotos Históricas para la generación de bases de datos temáticas. Cartografía de usos y coberturas del suelo (REDIAM). J.J. Vales, I.R. Carpintero, L. Granado, E. Méndez, G. Montoya, I. Pino, R. Prieto, F. Giménez-Azcarate, F. Cáceres y J.M. Moreira 189

Evaluación de las clasificaciones obtenidas a partir de imágenes de teledetección sometidas a compresión con pérdida. A. Zabala y X. Pons 193

INCENDIOS FORESTALES

Cartografiado de modelos de combustibles a partir de datos ASTER en La Orotava (Tenerife). A. Alonso-Benito, L.A. Arroyo, M. Arbelo, P. Hernández-Leal y A. González-Calvo 197

Modelización del riesgo de incendio mediante SIG y series temporales de imágenes Landsat. C. Cabo, P. García-Manteca y A. Colubi 201

Propuesta de una metodología para la estimación de emisiones de incendios forestales mediante sensores atmosféricos. A. Calle, J.L. Casanova y P. Salvador 205

Análisis global de áreas quemadas a partir de datos de la Agencia Espacial Europea: Proyecto Fire_CCI. E. Chuvieco, P. Oliva, T. Calado, M. Padilla-Parellada, C.R. Cardozo, S. Hantson y D. Corti 209

Integración de información espacial para la cartografía del riesgo de incendio: Proyecto Fireglobe. E. Chuvieco, I. Aguado, S. Jurado, L. Pettinari, J. Salas, J. de la Riva, P. Ibarra, M. Rodrigues-Mimbrero, M. Echeverría, D. Azqueta, M.V. Román, A. Bastarrika, S. Martínez, C. Recondo, E. Zapico, F.J. Martínez-Vega y S. Martín-Fernández 213

Incendios forestales y transferencia de carbono biomasa-suelo en áreas montañosas de clima atlántico. S. Fernández-Menéndez, C. Santín, C. Cabo, R. Menéndez y M.A. Álvarez 217

Estimación de propiedades de los combustibles de copa mediante diferentes plataformas de datos LiDAR. M. García, D. Riaño, E. Chuvieco y J. Gajardo 221

Análisis espacio-temporal de cartografía de área quemada en grandes incendios de bosques boreales en Canadá en el año 2000. J.R. García-Lázaro, J.A. Moreno-Ruiz, L. Núñez y M. Arbelo 225

Evolución de las áreas quemadas en Colombia a partir del producto MODIS- MCD45. F. González-Alonso, D. Armenteras, C. Franco, M. Morales, V. Salgado y S. Merino-de Miguel 229

Un algoritmo híbrido para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes radar ALOS PALSAR. F. González-Alonso, D. de Abelleyra, N. Mari, V. Salgado, C.M. Di Bella, D. Armenteras y S. Merino-de Miguel 233

Utilización de índices de vegetación derivados de datos MODIS en el modelado del peligro de incendio forestal. A. González-Calvo, P. Hernández-Leal, M. Arbelo, A. Alonso-Benito y A. Barreto 237

Idoneidad de diferentes fuentes de información para la caracterización de incendios forestales. M.R. González-Moradas, C. Recondo y J.J. Peón 241

Cartografía de áreas quemadas en Castilla y León mediante clasificación de índices espectrales de imágenes MODIS: perspectiva unitemporal. C. Hernán, C. Quintano y A. Fernández-Manso 245

Identificación de las áreas quemadas utilizando imágenes MODIS (México). L. Manzo-Delgado, I. Cruz-López y G. López-Saldaña 249

Comparación de los productos de área quemada y anomalías térmicas de MODIS en Brasil durante 2008. S. Merino-de Miguel, A. Setzer, F. Morelli, S.C. de Jesús, F. González-Alonso y M. Huesca 253

Estimación de la eficiencia del quemado a partir de la severidad de quemado. P. Oliva y E. Chuvieco 257

Detección de incendios y cartografía temprana de áreas quemadas en Asturias mediante imágenes MODIS. C. Recondo, A. Abajo, J.J. Peón, A. Rodríguez-Quevedo, F. González-Alonso y V. Salgado 261

Seguimiento y monitorización de la recuperación ambiental del territorio afectado por los grandes incendios del noroeste de la Región de Murcia (España). M. Vicente, C. Guillamón, P. Hurtado y J. Pecci 265

MEDIO AMBIENTE, RECURSOS HÍDRICOS, EDAFOLOGÍA Y GEOLOGÍA

Utilización de técnicas de teledetección para el seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid. L. Albizua, I. Barinagarrementeria y J.C. Ibañez 269

Utilización de modelos tridimensionales del terreno en el análisis de la contaminación ambiental mediante métodos numéricos computacionales. C. Allende y S. Torno 273

Validación de índices espectrales para detectar salinidad edáfica en cebada mediante sensores electromagnéticos terrestres. E. Amezketa, V. Urdánoz, I. Barinagarrementeria, L. Albizua, Y. Berkane, C. Portero y M.A. Casterad 277

Aplicación del método SEBAL para la estimación de la evapotranspiración de cultivos en una región árida (Atacama, Chile). J.A. Azuela, S. García-López, J.P. Saavedra, M. Canepa y J.L. Molina 281

Análisis de Espectroscopía Derivativa para la aplicación de un Modelo Automático de Gaussianas Modificadas a datos hiperespectrales Hymap de una zona contaminada por drenaje ácido de mina (Río Odiel, Huelva, España). J. Buzzi, V. Carrère, A. Riaza, E. García-Meléndez y M. Bachmann 285

Estudio de recursos nivales mediante imágenes Landsat en cuencas andinas, Región de Atacama, Chile. M. Canepa, S. García-López, J.P. Saavedra, J.A. Azuela y J.L. Molina 289

Detección de cambios en zonas forestales para la actualización de SIOSE-Andalucía 2005 a 2009 con imágenes SPOT-5. (REDIAM). I.R. Carpintero, L. Granado, E. Méndez, G. Montoya, I. Pino, R. Prieto, J.J. Vales, F. Giménez-Azcarate, F. Cáceres y J.M. Moreira 293

Mapas de composición de suelos utilizando imágenes Landsat-Thematic Mapper. E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles;297 297

Determinación del nivel freático del agua subterránea de una isla mediante imágenes del altímetro ASTER. E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles 301

Utilidad del NDVI para la discriminación de fases salinas en parcelas con cebada. M.A. Casterad, C. Portero, Y. Berkane, I. Barinagarrementeria, V. Urdánoz, L. Albizua y E. Amezketa 305

Evaluación temporal del humedal de Arreo a partir de imágenes Landsat y datos de campo. Y. Chao-Rodríguez, A. el Anjoumi, J.A. Domínguez, E. Rico y D. Rodríguez-Pérez 309

El proyecto SIOSE y sus aplicaciones en el Principado de Asturias. A. Colina, C. Fernández, M. Fernández-Martínez, A. Finat y M.A. Álvarez 313

Aplicación del método TDVI para la modelización de la humedad del suelo mediante imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ en una cuenca Mediterránea. J. Cristóbal, P. Llorens, C. Domingo y J. Latron 317

Estimación de flujos de energía en una zona de sabinar de la Reserva Biológica de Doñana mediante el método TSEB e imágenes Landsat-5 TM. J. Cristóbal, W.P. Kustas, M.C. Anderson, J. M. Infante y R. Díaz-Delgado 321

Control del estado de eutrofización de masas de agua continentales empleando imágenes Deimos-1. C. Doña, J.M. Sánchez, A. Ferri, V. Caselles y A. Camacho 325

Cartografía histórica del helecho acuático invasor *Azolla filiculoides* en la marisma de Doñana. R. Díaz-Delgado, I. Ameztoy, D. Aragonés y J. Bustamante 329

Monitorización y análisis de parámetros medioambientales usando datos del sensor MODIS. F. Eugenio, R. Topham y J. Marcello 333

Herramienta para generar secciones fluviales a partir de Modelos Digitales del Terreno obtenidos del LIDAR y su aplicación en el análisis geomorfológico de zonas inundables. J.C. Fernández y J. Crespo 337

Aportación de las fotografías aéreas históricas en la delimitación del Dominio Público Hidráulico. Ejemplo en el curso medio del río Nalón (Asturias, España). M. Fernández-Alonso y E. Fernández-Iglesias 341

Aportaciones geomorfológicas de los modelos derivados del LIDAR en el estudio de la Zona de Flujo Preferente. E. Fernández-Iglesias, S. Anadón, M. Fernández-Alonso, D. Vázquez, J. Crespo, V. Moro y R. Menéndez 345

Participación del INTA en el proyecto SEN3EXP: Teledetección aeroportada hiperespectral en áreas experimentales continentales. A. Fernández-Renau, J.A. Gómez-Sánchez, E. De Miguel, A. Ruiz, O. Gutiérrez-de la Cámara, M. Jiménez, I. Pérez, F. Muñoz, E. Prado, C. Donamayor y R. Rodríguez 349

Estudio multitemporal de la cuenca del embalse de La Mariposa (Venezuela) utilizando teledetección. C. Goitia, S. Yepéz y W. Barrios 353

Estimación de los flujos de energía en superficie en el sur de España a escala local y regional mediante un modelo multi-sensor. M.P. González-Dugo, M.C. Anderson, W.P. Kustas, F.L.M. Padilla, P. Ortiz-Serrano, P. Gavilán y F. Domingo 357

Evaluación de la Evapotranspiración obtenida a partir de la base de datos Pathfinder AVHRR Land (PAL). V. Hidalgo, J.A. Sobrino, J.C. Jiménez-Muñoz, Y. Julien, C. Mattar, B. Franch, G. Sòria, R. Oltra-Carrio y J. Cuenca 361

Evaluación de la utilización de imágenes MERIS para el seguimiento de humedales españoles mediterráneos. J.G. Lozano-Arango, J.A. Domínguez y M.J. Viñals 365

Uso de fotografías aéreas digitales para evaluar la inestabilidad de laderas en Angangueo (México). J. López-García 369

Obtención de información espectral a diversas escalas para la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación Mediterránea en el contexto del cambio global (BIOSPEC). M.P. Martín, A. Carrara, M.P. Echavarría, J. Gajardo, M. Gallardo, C. Gimeno, I. Gómez, R. González-Cascón, F.J. Martínez-Vega, G. Mendiguren, H. Nieto, J. Pacheco-Labrador, F. Pérez-Cabello, D. Riaño, J. Salas y L. Vilar 373

MAPRI, una base de datos para corregir imágenes remotas y análisis de series de tiempo sobre Europa. C. Mattar, J.A. Sobrino, J.C. Jiménez-Muñoz, Y. Julien, G. Sòria, B. Franch, V. Hidalgo, R. Oltra-Carrio y J. Cuenca 377

Caracterización geomorfológica mediante imágenes ASTER de la Cuenca de El Bierzo y zonas adyacentes (León, España). A. Mínguez, E. García-Meléndez, A. Martín-Serrano y S. Martín-Alfageme 381

Cuantificación mediante teledetección de la superficie regada en las Islas Baleares en los años 2008 y 2009. S. Montesinos, M. Bea, A. Barón, L. Fernández y C. González 385

Evaluación de los cambios de uso del suelo en la cuenca del Vinalopó (Alicante, España) entre 1994 y 2007 a diferentes escalas. H. Moutahir, I. Touhami y J. Bellot 389

SMOS: hacia la obtención de mapas de humedad en alta resolución. M. Piles, A. Monerris, M. Vall-llossera y A. Camps 393

Clasificación de Imágenes Multiespectrales mediante Técnicas Orientadas a Objetos (CIMTOO): una aplicación a la cuantificación de la turbidez de un lago. C. Quintana-Sotomayor, M. Lillo-Saavedra y C. Gonzalo-Martín 397

Neutralización de la acidez de aguas fluviales por mareas costeras: cartografía de aguas y sedimentos con datos hiperespectrales Hymap (río Odiel, Huelva). A. Riaza, J. Buzzi, E. García-Meléndez, V. Carrère, A. Sarmiento, J.M. Nieto y A. Müller 401

Monitorización de zonas de almacenamiento geológico de dióxido de carbono por técnicas de teledetección. M. Rincones, L. Iglesias, R. García y R. de la Vega 405

Aplicación de datos del satélite EO-1 para la caracterización de la influencia de las actividades mineras en la región de Almadén. T. Schmid, C. Rico, M.J. Sierra, J. Rodríguez, M. Rodríguez-Rastrero y R. Millán 409

El uso de imágenes de satélite como fuente de prueba en el procedimiento administrativo y contencioso-administrativo. C. Sirvent y S. Montesinos 413

Teledetección Térmica en la Reserva Biológica de Doñana. J.A. Sobrino, G. Sòria, J.C. Jiménez-Muñoz, J. Amorós, J. Bustamante y R. Díaz-Delgado 417

Recuperación de marisma en la ría de Somorrostro (Múskiz, Vizcaya). Aplicación de análisis fotogramétrico para definir condiciones de referencia. J. Valderrábano-Luque, E. Fernández-Iglesias y M. Fernández-Alonso 421

Estudio y seguimiento de aéreas afectadas de inundación (Febrero-Marzo y Diciembre) en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite TerraSAR-X (REDIAM). J.J. Vales, I.R. Carpintero, L. Granado, E. Méndez, G. Montoya, I. Pino, R. Prieto, F. Giménez-Azcarate, F. Cáceres y J.M. Moreira 425

Uso de fotografías aéreas georreferenciadas para estimar la redistribución de sedimento fluvial. D. Vázquez, R. Menéndez, E. Fernández-Iglesias y M. Hassan 429

METEOROLOGÍA Y CLIMA

Dependencia con el tiempo de adquisición de la capacidad de predicción de la temperatura del aire a partir del estudio de series temporales. M.M. Artigao, J.J. Miralles y J.A. Martínez-Martínez 433

Análisis de 7 años (2002-2008) de datos EOS-MODIS de contenido de vapor de agua sobre la Península Ibérica. Y.S. Bennouna, V.E. Cachorro, J.P. Ortiz de Galisteo, C. Toledano, A. Berjón, D. Fuertes, R. González-Catón, B. Torres, J.L. Marcos, L. Martín y A.M. de Frutos 437

Validación horaria y diaria a escala regional del producto de Radiación Solar (Downwelling Surface Short-wave radiation Flux - DSSF) obtenido mediante imágenes MSG-SEVIRI. J. Cristóbal y M.C. Anderson 441

Análisis del producto MODIS de perfiles atmosféricos: aplicación a la Península Ibérica. J.C. Jiménez-Muñoz, J.A. Sobrino, C. Mattar, B. Franch, G. Sòria, V. Hidalgo, R. Oltra-Carrio y Y. Julien 445

Estimación de la temperatura del aire a nivel superficial a partir de imágenes de satélite. R. Niclòs, J.A. Valiente, M.J. Barberà, M.J. Estrela y V. Caselles 449

Estudio comparativo del vapor de agua en columna en varias estaciones de la Península Ibérica usando diferentes técnicas. J.P. Ortiz de Galisteo, Y.S. Bennouna, V.E. Cachorro, C. Toledano, A. Berjón, D. Fuertes, R. González-Catón, B. Torres, J.L. Marcos, L. Martín y A.M. de Frutos 453

Estimación de la temperatura del aire a partir de la temperatura de superficie obtenida con el sensor MODIS e información espacio-temporal. Aplicación en modelos de riesgo de incendios forestales en la Península Ibérica. C. Recondo, E. Zapico, J.J. Peón, E. Pendás, R. Aguirre y A. Abajo 457

METODOLOGÍA, DIVULGACIÓN Y FORMACIÓN

Nuevos recursos para la enseñanza de la fotogrametría basados en herramientas de geometría dinámica. C. Allende 461

Radiometría de la vegetación acuática sumergida de Doñana: variación temporal de las firmas espectrales. D. Aragonés, R. Fernández-Zamudio, I. Afán, R. Díaz-Delgado, J. Bustamante y P. García-Murillo 465

Indicadores de cambio umbralizados con algoritmos basados en la entropía. A. Arquero, I. Molina, E. Martínez y J.E. Fernández 469

Una revisión de las principales magnitudes relacionadas con la caracterización de los sensores usados en teledetección. A. Calle, J.L. Casanova y P. Salvador 473

Obtención de series multitemporales y multisensor de índices de vegetación mediante un procedimiento de normalización absoluta. I. Campos, M. Odi, M. Belmonte, C. Martínez-Beltrán y A. Calera 477

Procedimiento simplificado para la caracterización de la textura a nivel de parcela catastral mediante los parámetros de Haralick. R. Ciriza, M. González de Audícana y L. Albizua 481

Modelo operativo para estimar la Productividad Primaria Neta de pastizales y pasturas a escala regional (Argentina). P.M. Cristiano, G. Posse y C.M. Di Bella 485

Validación de algoritmos científicos para el GPP de SEOSAT/Ingenio. E. De Miguel, R. Valenzuela, T. Bernardino, V. Rodríguez, A. Pizarro, D. de Miguel y C. Robles 489

Aplicación de las redes neuronales CGS para optimizar la detección de fuegos en Asturias. S. Delgado, E. Martínez, A. Arquero, C. Gonzalo-Martín, C. Recondo y A. Abajo 493

Análisis de la influencia de los efectos direccionales en la corrección atmosférica. B. Franch, E. Vermote, J.A. Sobrino y E. Fédèle 497

Anisotropía de la emisividad térmica en suelos inorgánicos. V. García-Santos, E. Valor, M.A. Burgos, V. Caselles y C. Coll 501

INTERPOLA. Herramienta para la generación de imágenes sintéticas y sustitución de valores reales con presencia de nubes-sombras por valores interpolados. J. Garrido, I. Campos, G. Villa, N. Plaza y A. Calera 505

Caracterización Multiescala De Objetos Como Herramienta Para La Clasificación De Imágenes. C. Gonzalo-Martín y M. Lillo-Saavedra 509

Aplicabilidad del uso de un panel de PTFE (politetrafluroetileno) como blanco de referencia. M Guillén, R. Montorio, F. Pérez-Cabello y M.A. Casterad 513

Recursos para trabajar las competencias genéricas en teledetección. J. Jorge 517

Calibración en vuelo del sensor a bordo del satélite DEIMOS-1. F.J. Lozano, C. Moclán y J. Gil 521

Identificación y análisis de técnicas de fusión en imágenes de satélites de muy alta resolución. J. Marcello, A. Medina, D. Rodríguez-Esparragón y F. Eugenio 525

Segmentación automática de imágenes mediante ISEG. E. Martínez, J. Sánchez y A. Arquero 529

Análisis del fenómeno Hughes en teledetección. A. Martínez-de Aguirre y J.A. Malpica 533

Modelado de la respuesta espectral relativa de sensores hacia espacios ortogonales. F.J. Mesas-Carrascosa, I.L. Castillejo-González, M. Sánchez de la Orden y A. García-Ferrer 537

Corrección radiométrica automática de imágenes Landsat TM mediante áreas pseudoinvariantes y modelización MODTRAN. G. Moré, X. Pons, J. Cristóbal, L. Pesquer y O. González 541

Efectos de la hora de paso y de la resolución espacial en el seguimiento del fenómeno de Isla de Calor Urbana, mediante teledetección térmica de alta resolución. R. Oltra-Carrio, J.A. Sobrino y G. Sòria 545

Últimos avances y estado actual del Plan Nacional de Teledetección. J.J. Peces, A. Fernández-Renau, G. Villa, M.A. Dominguez-Durán, E. Domenech, J.A. Tejeiro, M. Simón y N. Plaza 549

Clasificadores lineal y cuadrático con utilización del contexto espacial. B. Rodríguez y J.A. Malpica 553

Algoritmo no supervisado para la detección de nubes con MSG. P. Salvador, A. Calle y J.L. Casanova 557

Formación en técnicas de teledetección para la implementación de modelos de gestión de recursos naturales. M.C. Serafini, M.E. Antes y S. Villanueva 561

Análisis cuantitativo de la docencia y de la investigación en Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica en Cataluña. P. Serra y X. Pons 565

Algoritmo de morfología matemática multicanal adaptado a imágenes multiespectrales. W. Torres 569

Proyecto EnerBioAlgae (SUDOE): Utilización de técnicas espectrales de fluorescencia en el control de cultivos de microalgas para biomasa. J.M. Torres-Palenzuela, E. Spyrakos, M. Piñeiro y J.L. Legido-Soto 573

OCEANOGRAFÍA Y RECURSOS MARINOS

Validación de los productos altimétricos en aguas costeras del golfo de Cádiz. I. Caballero, J. Gomez-Enri y G. Navarro 577

Caracterización y delimitación de praderas de *Posidonia oceánica* y *Cymodocea nodosa* mediante imágenes procedentes de sensores hiperespectrales (Parque Natural de Gata-Níjar, Almería). A. Cabello, J.E. Frieyro, L. Granado, A. Hayas, E. Méndez, G. Montoya, I. Pino y J.A. Domínguez 581

Proyecto EUFAR AIRES-CZM: Gestión de las Zonas Costeras. E. Castillo-López, J.A. Domínguez, A. Silio-Calzada y A.D. Gutierrez-Barceló 585

Participación del INTA en el proyecto SEN3EXP: Teledetección aeroportada hiperespectral en áreas experimentales marinas. A. Fernández-Renau, J.A. Gómez-Sánchez, E. De Miguel, A. Ruiz, O. Gutiérrez-de la Cámara, M. Jiménez, I. Pérez, F. Muñoz, E. Prado, C. Donamayor y R. Rodríguez 589

Avances en el Proyecto COASTALT: la altimetría llega a la costa. J. Gomez-Enri, P. Villares, C. Gommenginger, S. Vignudelli y P. Cipollini 593

Interpretación oceanográfica de imágenes ASAR de alta resolución de la costa gallega utilizando datos auxiliares. L. González-Vilas, N.V. Yarovenko, S. Curos-Mata y J.M. Torres-Palenzuela 597

Detección de contaminantes en el medio marino a través del análisis e interpretación de imágenes SAR utilizando técnicas de Inteligencia Artificial. D. Mera, J.M. Cotos, G. Álvarez y S. Villarroya 601

Segmentación Difusa de Imágenes MODIS de Temperatura Superficial del Mar y Clorofila en un sistema de recuperación de imágenes. B. Navarro, F.J. Martínez-Martínez, J.A. Piedra y M. Cantón 605

Estudio de la pluma de turbidez en el estuario del Guadalquivir a través de imágenes de satélite y datos in-situ. G. Navarro, I. Caballero y J. Ruiz 609

Aplicación de algoritmos a partir de imágenes MERIS FR de índice de clorofila específicos para la costa gallega durante un ciclo de afloramiento. E. Spyrakos, L. Gonzalez-Vilas, J.M. Torres-Palenzuela y E.D. Barton 613

Detección de vertidos en aguas costeras de Galicia con LIF/LIDAR para embarcación. N.V. Yarovenko, M.C. Martín, L. Rodríguez-Domínguez y J.M. Torres-Palenzuela 617

ÍNDICE DE AUTORES 621

AGRICULTURA

Seguimiento de la producción forrajera en el Pirineo mediante la estimación de la radiación fotosintéticamente activa absorbida con imágenes Landsat-5 y Spot-4

M. Barrachina[1], J. Cristóbal[2] y A.F. Tulla[1]

[1] Departament de Geografia de la Universitat Autònoma de Barcelona. Edifici B. Campus de Bellaterra. 08193 Bellaterra – Cerdanyola del Vallès (Catalunya, España). Tel: 935868058; Fax: 935812001. Correo electrónico: Maria.Barrachina@uab.cat

[2] Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra. 08193 Cerdanyola del Vallès (Catalunya, España).

RESUMEN

La aplicación del modelo de Monteith (1972) permite calcular el incremento de biomasa (ΔANPP) como función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel vegetal (APAR) y la eficiencia con que dicha radiación es transformada en biomasa (LUE). A lo largo de seis campañas de campo, realizadas durante el período estival de 2009, se determinaron los g m^{-2} de biomasa aérea (seca) producida en prados y pastos de la Vall Fosca (Pirineo catalán) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa (fPAR) absorbida. A partir de la utilización de imágenes Landsat-5 y SPOT-4, se analizó la capacidad del NDVI para predecir la fPAR y así determinar la APAR de forma indirecta. El incremento de la biomasa aérea se relacionó con la APAR de dos formas: considerando la LUE un factor invariable por un lado y, por otro, calculando la LUE a partir de datos de campo y analizando su posible variabilidad en base a los registros de precipitación y temperatura recogidos por una estación meteorológica experimental. Los ajustes obtenidos fueron buenos: R^2 en torno a 0.8 entre fPAR y NDVI; y R^2 en torno a 0.7 entre APAR y ΔANPP.

Palabras clave: biomasa aérea herbácea, APAR, LUE, NDVI, Landsat, SPOT, Pirineo.

ABSTRACT

Based on Monteith's model (1972), growing biomass (ΔANPP) can be calculated as a function of photosintetically active radiation absorbed by green vegetation (APAR) and conversion efficiency of radiation into biomass (LUE). Above-ground biomass (g m^{-2}) and fraction of photosintetically active radiation absorbed by vegetation (fPAR) were measured on meadows and pastures in Vall Fosca (Catalan Pyrenees) over six field campaigns taking place in late spring-summer, 2009. Landsat-5 and SPOT-4 imagery were used to determine NDVI effectiveness to predict fPAR, as an indirect method for calculating APAR. Increase in above-ground biomass was related to APAR in two ways. First, by considering LUE an invariable factor, and secondly, by calculating LUE from field measures and analyzing its variability in relation to precipitation and temperature (both measured by an experimental weather station). fPAR was found to fit well with NDVI (R^2 around 0.8), so was the fit between APAR and ΔANPP *(R^2 around 0.7).*

Keywords: *above-ground biomass, APAR, LUE, NDVI, Landsat, SPOT, Pyrenees.*

INTRODUCCIÓN

La producción de recursos herbáceos en prados y pastos es de vital importancia para las economías ganaderas del Pirineo. Ello motiva la aplicación de metodologías que permitan realizar un seguimiento de la producción de biomasa herbácea, caracterizada en estas zonas por su gran variabilidad interanual y estacional, así como por su particular sistema de gestión. En este trabajo proponemos la aplicación del modelo enunciado por Monteith (1972), según el cual la producción de biomasa vegetal se encuentra directamente relacionada con la radiación solar fotosintéticamente activa (0.4μm – 0.7μm) que la planta absorbe, junto con la eficiencia con que dicha radiación es utilizada por la misma. De esta forma, la producción de biomasa aérea, para un período determinado, es igual al producto de tres factores (Ecuación 1):

$$ANPP = LUE * fPAR * PAR \quad (1)$$

donde:

ANPP (Aboveground Net Primary Production)= producción de biomasa aérea neta (g m^{-2}).

PAR (Photosintetically Active Radiation)= radiación solar fotosintéticament activa (MJ m^{-2} s^{-1}).

fPAR= fracción de la PAR absorbida

LUE (Light Use Efficiency)= eficiencia con que la radiación se transforma en biomasa (g MJ^{1}). Varía en función del tipo de vegetación y de la influencia de los factores ambientales.

$$APAR = fPAR * PAR \quad (2)$$

siendo:

APAR (Absorbed Photosintetically Active Radiation)= PAR absorbida

La PAR puede estimarse a partir de la radiación solar incidente, teniendo en cuenta que la fracción de PAR que ésta contiene se muestra relativamente estable, siendo aproximadamente el 50% (Gower *et al*., 1999; Hill *et al*., 2004). Por su parte, fPAR puede ser estimada a partir de su relación con el NDVI (Piñeiro *et al.*, 2006; Baeza *et al*., 2010).

MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

Se han utilizado 8 imágenes adquiridas entre los meses de mayo y agosto de 2009 (véase Tabla 1): 6 imágenes Landsat-5 TM (30-mayo, 15-junio, 1-julio, 17-julio, 2-agosto, 31-agosto) y 2 imágenes SPOT-4 HRVIR (10-junio, 6-agosto), geométricamente corregidas mediante la metodología propuesta por Palà y Pons (1995) y radiométricamente según Pons y Solé-Sugrañes (1994). Los parámetros climáticos han sido recogidos por una estación meteorológica experimental situada sobre un prado de siega a 896 m de altitud s.n.m., en las proximidades del núcleo de Pobellà (Torre de Cabdella), UTM-31 N: X:334796 e Y: 4695666.

El área de estudio se localiza en el extremo occidental del Pirineo catalán. La Vall Fosca corresponde al actual municipio de la Torre de Cabdella (Pallars Jussà), centrado en las coordenadas UTM-31N X: 333701 e Y: 4700965. Ocupa una extensión total de 165 km^2.

METODOLOGÍA

Recogida de datos en el campo

El trabajo de campo ha consistido en el muestreo de la biomasa en una selección aleatoria y representativa de prados de siega (regadío y secano) y pastos intermedios (montanos y subalpinos), junto con la medida instantánea de la PAR, dirigida al cálculo de fPAR. Las campañas de campo, un total de seis, han sido planificadas en base al calendario de paso de Landsat-5 TM, órbita 198 y fila 31, entre mayo y agosto de 2009, realizándose en los días inmediatos a la captura de las imágenes (véase Tabla 1). A partir de la resolución nominal de estas imágenes (30 m), se han seleccionado áreas uniformes en al menos una extensión de 90 x 90 m (3 x 3 píxeles). El tamaño inicial de la muestra establecido ha sido de 30 puntos. En cada punto o parcela de muestreo se han realizado cuatro medidas separadas 30 m unas de otras, simulando así la extensión de un píxel. Las coordenadas de cada subparcela han sido posicionadas con la ayuda de un GPS. En cada punto de medida se ha segado la hierba sobre una superficie de 0.5 x 0.5 m, determinándose el peso fresco con un dinamómetro electrónico de 5 g de precisión. Después de secar las muestras en una estufa a 80ºC durante 24 horas, se ha determinado el peso seco. El resultado promedio de las subparcelas, multiplicado después por cuatro y expresado en g m^{-2}, ha sido considerado una buena aproximación para obtener un valor representativo del píxel correspondiente en la imagen.

La medida de la PAR se ha realizado con la ayuda de un ceptómetro AccuPAR LP-80 (Decagon Devices), en las mismas parcelas en que se muestreó la biomasa. Para ello se ha definido un transecto que uniera los dos extremos de la parcela en diagonal. La determinación de la fracción absorbida, fPAR, implica medir la cantidad de PAR que llega del sol y su comportamiento a través del dosel vegetal (reflexión, absorción, transmisión a través del dosel y absorción o reflexión por la superficie del suelo, etc.). Las medidas de PAR necesarias para calcular la fPAR se efectuaron en cuatro puntos suficientemente distanciados unos de otros (d > 50 m), promediándose después los valores obtenidos para cada parcela.

Relación NDVI – fPAR

Se ha estudiado la relación existente entre la fPAR calculada en el campo y el valor de NDVI extraído de la imagen correspondiente a cada campaña de muestreo (interpolación bicúbica) a partir de una regresión simple. Cada uno de los modelos obtenidos ha sido validado mediante el cálculo del RMSE con *Jackknife* (Efron, 1982), que consiste en la división sucesiva de la mues-

tra en subgrupos que incluyan todas las observaciones menos una (n-y). Este único punto aislado, que varía cada vez que se divide la muestra, valida sucesivamente el modelo construido sobre el resto de puntos. De nuevo, se calcula el RMSE como la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los observados en estos puntos aislados. Por último, el modelo final se obtiene realizando la regresión simple con el 100% de los puntos.

Modelo APAR

Se ha simplificado el modelo de Monteith (1972) considerado la LUE como un factor invariante. Así, la producción de biomasa aérea en seco durante un período determinado pasa a ser función de la APAR en dicho período. Los datos de biomasa y APAR se han relacionado a partir de una regresión simple, explorándose las relaciones lineal y exponencial (Piñeiro *et al*., 2006). Se han construido dos modelos de regresión simple, correspondientes a dos de las seis campañas de recogida de datos realizadas en 2009: 15-junio y 18-agosto. Como en el caso anterior, se han validado los modelos calculando el RMSE según el método *Jackknife*.

Estimación y variabilidad del factor LUE

A partir de los datos de campo, ΔANNP y PAR, calculamos LUE como el incremento de la biomasa dividido por la radiación absorbida en el mismo período (Ecuación 1). Intentamos determinar si existen diferencias significativas en los valores de LUE obtenidos: i) entre unas parcelas y otras durante una misma campaña de campo, en base a la diferenciación entre prados de siega de regadío y de secano; ii) entre las mismas parcelas a lo largo de todo el período de muestreo, en base a la variación en las condiciones ambientales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra la capacidad del índice NDVI para predecir el valor de fPAR. En general, se observa un buen ajuste entre ambos, especialmente en el caso de las campañas del 30-mayo y 18-agosto de 2009, es decir, aquellas inmediatamente anteriores a la primera y segunda siega realizada por los ganaderos. En algunas de las campañas analizadas la muestra se ha visto reducida debido a la presencia de nubes y/o a la siega de parte de las parcelas de muestreo. La acumulación de materia senescente en los prados de secano y la menor participación de los prados de regadío de la muestra, por encontrarse recién segados, son posibles causas a las que apuntar para explicar la obtención de bajas correlaciones en campañas como la del 1-julio. Ha de tenerse en cuenta que la determinación de fPAR en el campo es instantánea y que, por tanto, se encuentra sujeta a las variaciones presentes en el momento de la medida.

Campaña 2009	R^2	n	RMSE	Prom. Obs.
30-mayo	0.60	30	0.19	0.74
15-junio	0.83	16	0.05	0.87
1-julio	0.26	15	0.20	0.68
17-julio	0.58	16	0.12	0.17
2-agosto	0.55	23	0.15	0.58
18-agosto	0.86	23	0.10	0.62

Tabla 1: Ajuste entre fPAR y NDVI (R^2); muestra (n); cálculo del RMSE (*Jackknife*) y promedio de fPAR observado en el campo

Por su parte, la Tabla 2 recoge los resultados de relacionar el incremento de biomasa con la radiación fotosintéticamente activa absorbida (modelo APAR). El modelo es capaz de explicar más del 70% de la variabilidad. Se observa cómo la regresión exponencial da mejores resultados que la forma de relación lineal. El error de la estimación representa, en cada caso, un ±25% y un ±33% del promedio observado en el campo.

Campaña	15-junio	18-agosto
R^2 lineal	0.66	0.68
R^2 exp.	0.78	0.73
(n)	26	24
RMSE (g m^{-2})	116.01	87.48
Promedio Obs. (g m^{-2})	461.68	262.14

Tabla 2: Resultados obtenidos para el modelo APAR (ΔANPP – APAR)

Por último, en la Tabla 3 se exponen los valores promedio resultado del cálculo del factor LUE en prados de regadío y secano. Si bien a inicios de junio la eficiencia de la conversión en biomasa es similar en ambos tipos de prados, a medida que avanza el verano LUE aumenta sólo en el caso de los prados irrigados. Los resultados son consistentes con aquellos encontrados en la bibliografía: Gower *et al*. (1999) y Ruimy *et al*. (1999) establecen valores de LUE entre 0.1 – 0.2 g MJ^{-1} para herbazales, mientras que Garbulsky *et al*. (2010) encuentran una LUE anual comprendida entre 0.75 y 2.01 gC MJ^{-1}.

Período cálculo LUE	LUE **regadío**	LUE **secano**
30-05---15-06	0.70	0.69
15-06---01-07	0.93	0.47
01-07---17-07	1.22	0.57
17-07---02-08	0.86	0.54
02-08---18-08	0.96	0.44
Promedio **Total Período**	0.93	0.54

Tabla 3: Valores promedio de LUE en prados de regadío y prados de secano (g MJ^{-1})

CONCLUSIONES

A diferencia de otros trabajos desarrollados en áreas extensas y relativamente uniformes, el siguiente trabajo se ha enmarcado en un sistema muy variable, de ciclo vegetativo breve, muy dependiente de las condiciones meteorológicas y sometido a un sistema de gestión peculiar de dos siegas estivales. Los resultados demuestran que el uso de estas técnicas es aplicable a la gestión de los prados en uso o a la recuperación de nuevas parcelas. Se han obtenido ajustes especialmente buenos entre NDVI y fPAR (R^2 = 0.83; 0.86) cuando el crecimiento de la hierba se va estancando (cuando está lista para ser segada). El modelo APAR es capaz de explicar buena parte de la variabilidad en la producción de biomasa a partir de una relación exponencial (R^2 = 0.78; 0.73). Los valores de LUE obtenidos difieren en prados de secano y regadío, y se encuentran dentro del rango de valores presentes en la bibliografía. Debido a la poca variabilidad encontrada en el factor LUE, tanto espacial como temporal, será necesario ampliar el número de observaciones y el abaste temporal en futuros trabajos.

BIBLIOGRAFÍA

BAEZA, S., LEZAMA, F., PIÑEIRO, G., ALTESOR, A. Y PARUELO, J.M. 2010: *Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach*. Applied Vegetation Science, 13, 72-85.

EFRON, B. 1982: *The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans*. Society of Industrial and Applied Mathematics CBMS-NSF Monographs, 38

GARBULSKY, M.F., PEÑUELAS, J., PAPALE, D., ARDÖ, J., GOULDEN, M.L., KIELY, G., RICHARDSON, A.D., ROTENBERG, E., VEENENDAAL, E.M.; y FILELLA, I., 2010: *Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems*. Global Ecology and Biogeography, 19, 253-267

GOWER, S. T., KUCKARIK, C. J. y NORMAN, J. M., 1999: *Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 70, 29-51.

HILL, M., DONALD, G., HYDER, M. y SMITH, R., 2004: *Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data*. Remote Sensing of Environment 93, 528-545.

PALÀ, V y PONS, X., 1995: *Incorporation of relief into geometric corrections, based on polynomials*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 61, 935-944.

PIÑEIRO, G.,OESTERHELD, M. y PARUELO, J.M., 2006: *Seasonal variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of temperate rangelands estimated through Remote Sensing*. Ecosystems 9, 357-373.

PONS, X. y SOLÉ-SUGRAÑES, L., 1994: *A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data*. Remote Sensing of Environment, 47, 1-14.

RUIMY, A., KERGOAT, L., BONDEAU, A. 1999: *Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency*. Global Change Biology 5, 56-64

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos *El desarrollo local sostenible de las zonas de montaña en el umbral entre el abandono del territorio y la naturbanización* (Ministerio de Educación y Ciencia, SEJ2006-04009/GEOG); *Anàlisi de la producció de biomassa en prats de dall i pastures de muntanya en relació al recursos hídrics a la Vall Fosca i a la Vall d'Àssua mitjançant la Teledetecció (Pirineu Axial-Nogueres)* (2009ACOM00118, Generalitat de Catalunya) y ha sido posible gracias al Programa de Becas FPU del MEC y al Programa ISIS/SPOT del CNES.

Constelación multisensor para el seguimiento y clasificación de cultivos en el área de estudio de la Mancha Oriental

M. Belmonte, I. Arellano, I. Campos, C. Martínez-Beltrán y A. Calera

Instituto de Desarrollo Regional. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus de Albacete. Campus Universitario s/n. 02071. Albacete (España). Mario.Belmonte@uclm.es

RESUMEN

El seguimiento de la evolución temporal de cultivos y cubiertas de vegetación natural, y su inventario a través de mapas mediante técnicas de clasificación digital, es una de las grandes y tradicionales aplicaciones de la Teledetección espacial. Dicho seguimiento y clasificación se enfrentan habitualmente a aquellos problemas asociados a la disponibilidad de imágenes de alta resolución espacial junto con la frecuencia temporal suficiente que permita describir la dinámica temporal de la cubierta vegetal, que puede presentar características bien diferentes de unas cubiertas a otras. Dado que un sensor a bordo de una única plataforma es difícil que reúna ambas cualidades, surge como solución operativa la idea de configurar una constelación de sensores. En este trabajo se muestra el seguimiento del desarrollo fenológico de los cultivos a la resolución temporal semanal mediante una constelación formada por los sensores TM (Landsat) y DMC (Deimos 1 y UKDMC 2). La clasificación de cultivos regados y no regados se ha realizado utilizando como criterio básico el patrón temporal, aprovechando el gran potencial de la imagen semanal.

Palabras clave: Teledetección, Clasificación, constelación multisensor, cubiertas vegetales, NDVI.

ABSTRACT

The monitoring of crops and natural vegetation temporal evolution and the land cover classification is one of the most traditional and broad applications of remote sensing methodologies. The temporal description and crop identification are usually limited by the availability of satellite images with the adequate spatial and temporal resolution s. One sensor boarded in a single platform rarely aids both temporal and spatial capabilities, thus some solutions based on multisensor constellations have been proposed. This work aims to communicate the application to monitoring of crop and natural vegetation by a virtual constellation conformed by the sensors TM (Landsat) and DMC (Deimos 1 and UKDMC 2). The temporal patterns of this evolution were used to obtain a map of irrigated crops over the study area making useful the great potential of one image per week resolution.

Keywords: *Remote Sensing, Interpolation, Temporal Series, clouds and surface coverage, NDVI.*

INTRODUCCIÓN

El seguimiento de las cubiertas agrícolas y naturales y la obtención de mapas temáticos mediante imágenes de satélite son herramientas de gran valor para una correcta gestión en espacios naturales y áreas agrícolas. En muchas aplicaciones es preciso seguir la dinámica temporal de la cubierta vegetal de una parcela, cuyo tamaño típico está en el orden de una hectárea. Se requiere pues la resolución espacial suficiente, junto con la frecuencia temporal necesaria para describir la dinámica temporal, que puede presentar características bien diferentes de unas cubiertas a otras. Puesto que un sensor a bordo de una única plataforma es difícil que reúna ambas cualidades, surge como solución operativa la idea de configurar una constelación de sensores. Esta idea encierra tanto más potencial si se considera la capacidad que representa integrar sensores con diferente resolución espacial, a bordo de diferentes plataformas (Martínez-Beltrán et al., 2009).

En este trabajo se muestra la capacidad de seguimiento de los cultivos a la resolución temporal semanal y su aplicación a la clasificación de cultivos para su discriminación entre regados y no regados. Para ello se utiliza una constelación de satélites configurada por los sensores Disaster Monitoring Control, DMC (Deimos-1 y UKDMC-2), y Landsat5-TM, que

ha sido operativa a lo largo de la campaña 2010 en el área de La Mancha Oriental. La alta resolución espacial y temporal proporcionada por dicha constelación permite describir de forma precisa la fenología de los cultivos presentes en esta zona. Los perfiles temporales constituyen la base para la clasificación de cultivos, permitiendo su discriminación entre regados y no regados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Información de partida. Imágenes y su procesado

Las 26 imágenes DMC utilizadas, tienen un ancho de barrido de 600 Km, resolución espacial 20 m, resolución espectral 3 bandas, resolución radiométrica 8 bit y resolución temporal de 3 días y han sido suministradas por DEIMOS SPACE. Las imágenes TM pertenecen a las escenas 199-33 (8 en total) y 200-33 (9 en total). Tienen un tamaño de escena de 185 x 170 Km, resolución espacial 30 m, resolución espectral 7 bandas, resolución radiométrica 8 bit y resolución temporal de 16 días, han sido proporcionadas a través del Plan Nacional de Teledetección.

El área de estudio corresponde a los acuíferos 08-29 y 08-30 (Mancha Oriental), de alrededor de 10.000 Km2, localizados en el sur-este de Castilla-La Mancha (España), pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica del Júcar, ver Figura 1.



Figura 1: Delimitación de la zona de estudio, acuíferos 08-29 y 08-30 (en rojo).

Integración de los sensores TM y DMC en la serie multitemporal

El procesado de las imágenes incluye corrección geométrica, radiométrica y atmosférica de las bandas en el espectro solar que se detalla en (Campos et al., 2011). El procedimiento aplicado posibilita la intercomparación desde los diferentes sensores utilizados. El parámetro elegido para el seguimiento temporal de las cubiertas vegetales es el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizada (NDVI), dada la amplia experiencia acumulada en la utilización de este índice.

Procedimiento de clasificación en cultivos herbáceos

La serie temporal de imágenes así obtenida permite describir de forma precisa la evolución de cultivos y vegetación natural a lo largo de sus ciclos de crecimiento. Las diferencias en los patrones temporales entre cultivos regados y no regados presentes en el área de estudio son relevantes, tanto en la cobertura vegetal alcanzada que se refleja en los valores del NDVI, como en la duración del ciclo del cultivo.

La clasificación objeto de este trabajo explota las diferencias entre dichos patrones temporales. La leyenda de la clasificación viene dada por los usuarios del proyecto ERMOT y trata de discriminar las cubiertas regadas, agrupándolas en Regadíos de Primavera, Regadíos de Verano y Regadíos de Primavera Verano. La razón de esta leyenda estriba en que los cultivos que integran cada clase presentan consumos de agua de riego semejantes, diferenciándose con claridad de los de otras clases.

La clasificación se inicia aplicando un algoritmo de máxima probabilidad y/o mínima distancia al NDVI de 4 imágenes, de fechas seleccionadas de acuerdo con la fenología de los principales cultivos. Las fechas son las de Mayo, Junio, Julio y Agosto. Se obtiene así una preclasificación que mejoraremos incorporando información de otras fechas. La selección de las denominadas parcelas de entrenamiento necesarias para el algoritmo se realiza en base al conocimiento preexistente de los patones temporales y trabajo de campo.

La incorporación de otras fechas se realiza mediante árboles de clasificación. El conocimiento de la evolución temporal aportado por la secuencia de imágenes permite seleccionar los momentos y valores para aplicar los umbrales necesarios. El procedimiento permite introducir la dinámica de los cultivos en la clasificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de la evolución de las diferentes cubiertas

La Figura 2 muestra la evolución temporal del NDVI correspondiente a los principales cultivos regados y vegetación natural en el área de estudio.

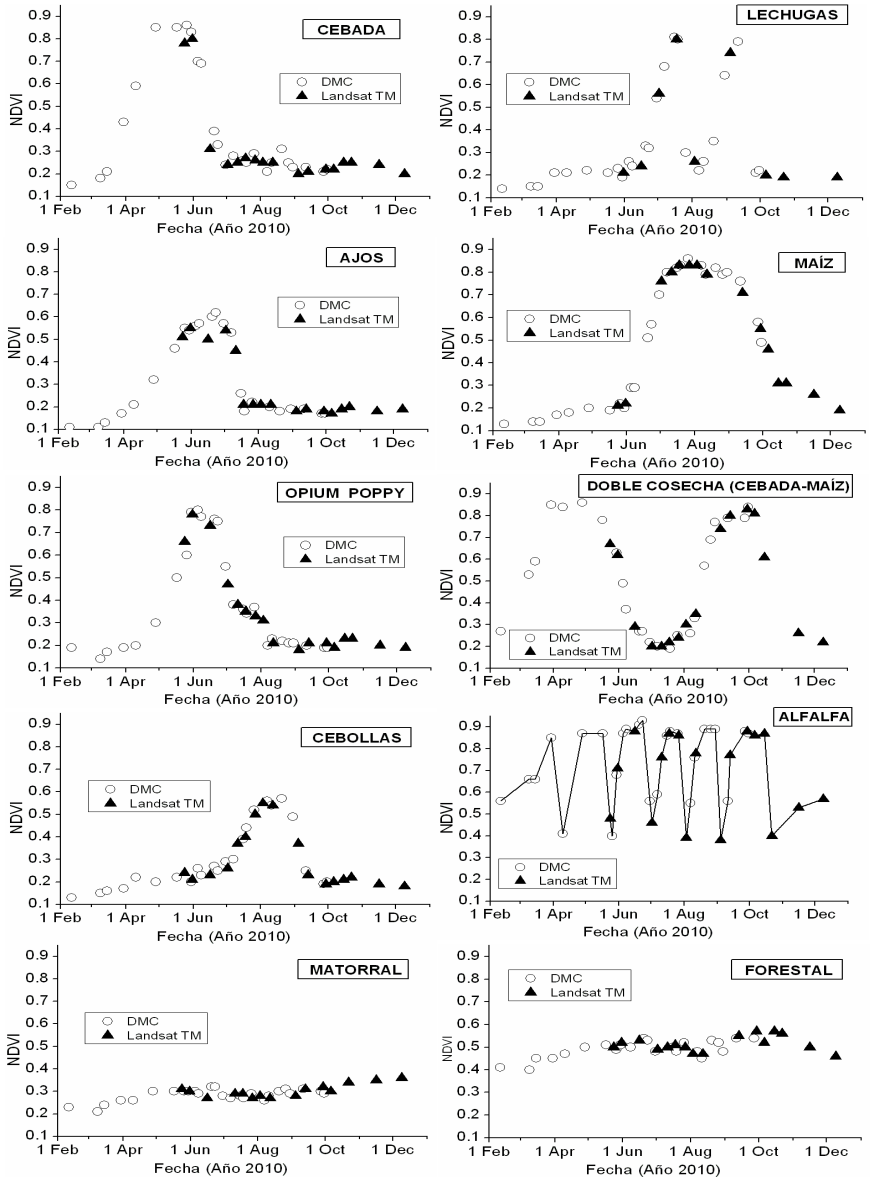


Figura 2: Evolución fenológica de los principales cultivos regados y cubiertas naturales presentes en el área de estudio obtenida mediante los sensores TM y DMC. La variación en el número de imágenes, entre los diferentes cultivos, es debido a la presencia de nubes o al no encontrarse el cultivo en la zona de solape.

La evolución general de los cultivos anuales sigue un patrón típico: Una etapa de valores correspondientes a suelo desnudo, seguida por otra de un rápido desarrollo, que da lugar a la aparición de una meseta y, finalmente, una etapa de disminución, que corresponde a la fase de maduración y senescencia. Cada cultivo o clase de cultivos presenta características bien diferenciadas en función de la duración de estos periodos, época del año en la que ocurren y valores máximos del NDVI que se alcanzan durante la meseta, período en el que se alcanza la máxima cobertura de la vegetación.

La alfalfa presenta varios ciclos durante una misma campaña y carece de etapa de madura-

ción, pues se corta en verde. La vegetación natural permanece relativamente constante durante el periodo analizado. Para describir correctamente cultivos de rápido desarrollo tales como la alfalfa y la lechuga y, en general, para caracterizar bien los puntos de inflexión de las curvas de crecimiento, se requiere una frecuencia semanal de imágenes. La completa caracterización de cada patrón temporal y su correspondencia con un cultivo o grupo de cultivos permite utilizar el patrón temporal como criterio básico de clasificación, para realizar así la discriminación de cultivos regados atendiendo a su etapa de crecimiento.

A pesar del elevado número de imágenes utilizadas, la utilización de un único sensor no basta para describir completamente la evolución del cultivo. Las imágenes DMC cubren la primavera y TM va más allá de los periodos de crecimiento de los cultivos. El periodo coincidente nos permite la intercomparación e intercalibrado de los diferentas sensores.

Evaluación de la clasificación revisada

La clasificación obtenida fue revisada manualmente mediante la herramienta Web-SIG SPIDER, www.teledeteccionysig.es. Este sistema permite visualizar la evolución temporal de las parcelas estudiadas, desplegando de forma gráfica los valores del NDVI frente al tiempo. Los errores detectados en la preclasificación mediante revisión por fotointérprete indican que los algoritmos no logran utilizar de forma adecuada toda la información disponible en la serie temporal estudiada. Seria conveniente la existencia de algún proceso semi-automático de clasificación que fuera capaz de reconocer la evolución fenológica de los cultivos, tal como lo hace una persona experta.

	Superficie en regadío 2010 (ha)			
Ámbito espacial	R. Verano	R. Primavera	R. Primavera Verano	Total
08-29	19.731	48.068	8.923	**76.722**
08-30	1.023	1.258	54	**2.335**
08-29 + 08-30	20.754	49.326	8.977	**79.057**

Tabla 2: Distribución de superficies y clases de cultivos en regadío herbáceos en la zona de estudio para la campaña 2010.

El análisis de la precisión de la clasificación final ha sido realizado por parte de Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. "TRAGSATEC", mediante identificación en campo de los cultivos. La muestra utilizada representa el 5% respecto al total de la superficie clasificada. La precisión global de la clasificación es superior al 92%. Este análisis ha sido realizado en el proyecto ERMOT (Calera et al., 2010).

CONCLUSIONES

El uso de una constelación de imágenes, DMC y TM en el caso de estudio, capaz de facilitar una imagen semanal permite el seguimiento completo de la dinámica temporal de los cultivos y cubiertas presentes en el área de estudio. La completa caracterización del patrón temporal permite utilizarlo como criterio básico de clasificación, alcanzando gran precisión en la realización de la clasificación, separando entre cultivos regados y no regados.

El análisis de la gran cantidad de información que aporta el conocimiento de la dinámica temporal, con la frecuencia de una imagen cada semana, y su uso en la identificación, requiere nuevos y más eficientes algoritmos.

BIBLIOGRAFÍA

CALERA, A., QUINTANILLA, A., CASTAÑO, S., BELMONTE, M., ARELLANO, I., CAMPOS, I., ESCUDERO, R., CHECA, M.J., GARCIA, M.A., 2010: *Evolución de superficies en regadío mediante teledetección en el ámbito del acuífero Mancha Oriental.* Informe ERMOT 2010. Universidad de Castilla-La Mancha.

CAMPOS, I., ODI, M., BELMONTE, M., MARTÍNEZ-BELTRAN, C., CALERA, A., 2011: *Obtención de series multitemporales y multisensor de índices de vegetación mediante un procedimiento de normalización absoluta.* XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección.

MARTÍNEZ-BELTRAN, C., JOCHUM, A., CALERA, A., AND MELIA, J., 2009: *Multisensor comparison of NDVI for a semi-arid environment in Spain International Journal of Remote Sensing,* 30: 1355-1384.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto ERMOT2010, financiado por la Confederación Hidrográfica del Júcar, Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental y Junta de Comunidades de Castilla La Mancha.

Utilización de imágenes aéreas multiespectrales para evaluar la disponibilidad de nitrógeno en maíz

R. Isla[1*], D. Quílez[1]., F. Valentín[3], M.A. Casterad[1], J. Aibar[2] y M. Maturano[3]

[1] Unidad de Suelos y Riegos (Unidad asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Gobierno de Aragón.
Avda. Montañana 930, 50059, Zaragoza (España). E-mail*: risla@ aragon.es.

[2] Departamento de Agricultura y Economía Agraria. Escuela Politécnica Superior de Huesca. (Carretera de Cuarte, s/n · 22071- Huesca. Universidad de Zaragoza (España).

[3] Fundación para el Desarrollo Sostenible de Castilla-La Mancha (FUNDESCAM)
Instituto Técnico Agronómico Provincial-ITAP. Avenida Gregorio Arcos s/n
Apdo 451, 02080, Albacete (España)

RESUMEN

Utilizando información de dos ensayos de maíz realizados en Albacete y Zaragoza, se evaluó la utilidad de imágenes multiespectrales comerciales de alta resolución espacial (0.1 m) en el espectro del visible (azul, verde, y rojo) e infrarrojo cercano tomadas mediante avión para determinar el estado nutricional del maíz en fases intermedias (V15) del cultivo y en condiciones de regadío españolas. Considerando todas las parcelas de cada ensayo, los niveles digitales (ND) obtenidos en las cuatro longitudes de onda y varios de los índices de vegetación estudiados se encontraron significativamente ($P<0.01$) correlacionados con las lecturas del medidor de clorofila (SPAD), muy asociado al contenido de N de las hojas. Las relaciones más elevadas, eliminando las parcelas más deficitarias, se presentaron para los ND en el verde (540-560 nm) y para el índice GNDVI. La relación entre los ND relativos a la parcela sobrefertilizada de cada ensayo en el verde en estado de 15 hojas y el rendimiento de grano fueron del mismo orden ($R^2=0.91$) que las obtenidas con el medidor de clorofila, y superiores a las obtenidas en otras longitudes de onda. Por lo tanto el ND en el verde obtenido a partir de imágenes multiespectrales comerciales resulta prometedor como herramienta para determinar el estado nutricional del maíz en un momento en que todavía es posible realizar aplicaciones de fertilizante nitrogenado y corregir deficiencias.

Palabras clave: maíz, fertilización nitrogenada, imagen multiespectral, SPAD, índices de vegetación

ABSTRACT

Using information from two maize field experiments in Albacete and Zaragoza, this work assess the utility of commercial multispectral images with high spatial resolution (0.1 m) in the visible spectrum (blue, green, and red) and near infrared taken by plane to determine the nutritional status of maize in intermediate growing stage (V15) under Spanish irrigated conditions. Considering all the plots of each trial, the digital values (ND) obtained at four wavelengths and several of the studied vegetation indices were linearly and significantly ($P<0.01$) correlated with chlorophyll readings (SPAD). Removing the highly deficient plots which are unusual under normal field conditions, the strongest relations were obtained between SPAD readings and the ND in the green (540-560 nm) and GNDVI vegetation index. Relationship between the green ND values relative to overfertilized plost in the 15 leaves stage and grain yield was of the same magnitude ($R^2=0.91$) than that obtained with the chlorophyll meter (SPAD), and superior to those obtained in other wavelengths. Therefore, relative ND values in the green wavelenght from a commercial multiespectral image is a promising tool to determine the nutritional status of maize at a time when it is still possible applications of nitrogen fertilizer to correct deficiencies.

Keywords: *maize, nitrogen fertilization, multispectral image, SPAD, vegetation indices*

INTRODUCCIÓN

Una causa importante de la contaminación difusa de aguas es el excesivo uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, lo que llevó a la Unión Europea a establecer la Directiva 91/676/CEE, transpuesta en España por el Real Decreto 261/1996 regulando su uso en ciertas áreas. El cultivo del maíz tiene una gran importancia en España con una superficie que supera las 300,000 ha siendo uno de los cultivos donde se aportan mayores cantidades de fertilizantes nitrogenados.

El análisis de nitratos en el suelo y los medidores de clorofila en hoja ayudan al agricultor a decidir la cantidad de fertilizante N a aplicar. Sin embargo, difícilmente capturan la variabilidad espacial que suele existir dentro de las parcelas de cultivo, presentando además la dificultad práctica de implementarlos en parcelas de gran tamaño. La teledetección desde plataformas remotas (satélites o aviones) permite estudiar grandes zonas de cultivo y analizar la variabilidad espacial del desarrollo de los cultivos. Una detección temprana del nivel de suficiencia del nitrógeno permitiría un ajuste en tiempo real de la dosis de fertilizante N necesaria para optimizar el rendimiento. Blackmer y Shepers (1996) mostraron la posibilidad de evaluar la disponibilidad de N en el cultivo del maíz mediante el análisis de imágenes aéreas. Trabajos posteriores han demostrado la aplicabilidad y la mayor capacidad de datos de reflectividad de alta resolución espectral en la estimación del contenido en clorofila de la hoja. Los trabajos de Haboudane et al. (2002) e Isla y López-Lozano (2005) proponen diferentes índices espectrales buscando la máxima sensibilidad al contenido en clorofila y una baja sensibilidad a otros factores.

Este trabajo evalúa la información derivada de imágenes comerciales de alta resolución espacial tomadas desde avión con un sensor multiespectral en el espectro del visible (azul, verde, y rojo) e infrarrojo cercano para diagnosticar el estado nutricional del maíz en fases intermedias del cultivo (V15), cuando todavía es posible realizar un ajuste de la fertilización nitrogenada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante 2010 se realizaron dos ensayos de maíz cultivado en riego por aspersión en Zaragoza (ZAR) y Albacete (ALB). El nivel de nitrógeno disponible en las diferentes parcelas experimentales fue variable debido a distintos niveles de nitrógeno mineral inicial en el suelo y en los que además se aplicaron distintas dosis de fertilizante nitrogenado. La Tabla 1 presenta un resumen de las características más importantes de ambos ensayos.

Característica	Zaragoza	Albacete
Nº parcelas	63	51
Sup. parcela, m^2	56	35
N aplic., kg N/ha	0 a 400	0 a 300
Riego, mm	703	844
Híbrido usado	PR34N43, Pioneer	PR34N43, Pioneer
Densidad, pl/ha	74652	84077
Siembra-cosecha	10/05-7/10	5/05-8/10
Textura, USDA	franca	fr-arc-are
Nitrato inicio. (mg/kg, 0-30 cm)	5.7 a 26.7	4.9 a 37.1
Prof. suelo, cm	120	40
Pedregosidad, %	0-12	43

Tabla 1: Características generales de los ensayos, diseño experimental, manejo del cultivo y tipo de suelo.

Por lo tanto en ambos ensayos se dispuso de parcelas con distintos niveles de suficiencia de nitrógeno, desde deficitarias hasta sobrefertilizadas. Antes de que se iniciara la floración masculina del maíz (V15), se evaluó en campo el estado nutricional del cultivo mediante la lectura con el medidor de clorofila SPAD (SPAD-502, Minolta Camera Co., Ltd., Japon), sobre la hoja de la mazorca en un total de 20 plantas de las dos líneas centrales de cada parcela. Dichas medidas se realizaron en julio, el día 21 en ZAR y el 20 en ALB. En ese mismo día y en cada uno de los ensayos se realizó, cerca del mediodía solar, un vuelo comercial (RS Servicios de Teledetección S.L., Lleida, España) con avión ligero tripulado que mediante un sensor multiespectral (DMSI) que proporciona imágenes corregidas radiométrica y geométricamente con una resolución espacial de 0.1 m y resolución radiométrica de 14 bits. No se realiza corrección atmosférica. A partir de los niveles digitales (ND) de las mismas en las bandas del azul (B, 440-460 nm), verde (G, 540-560 nm), rojo (R, 665-685 nm), e infrarojo cercano (NIR, 770-790 nm), se calcularon los siguientes índices de vegetación:

$$NDVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + R}\right) \quad GNDVI = \left(\frac{NIR - G}{NIR + G}\right)$$

$$RDVI = \left(\frac{NIR - R}{\sqrt{NIR + R}}\right) \quad NPCI = \left(\frac{NIR - B}{NIR + B}\right) \quad SR = \left(\frac{NIR}{R}\right)$$

En cada ensayo se obtuvo una mascara de la zona central de cada parcela experimental, excluyendo las líneas de maíz bordes e incluyendo las 2 y las 3 líneas centrales en los ensayos de ZAR y ALB, respectivamente. A partir de esta máscara se determinó, para cada parcela, los ND medios en cada banda y el valor medio de cada índice.

Al final del experimento se procedió al cosechado manual de las parcelas de maíz obteniéndose la producción de grano en cada una de ellas. Para las parcelas (16 en ALB y 21 en ZAR) que no recibieron fertilizante después de haber tomado las imágenes se obtuvieron los valores relativos de los ND, índices de vegetación y rendimiento de grano, dividiendo el valor obtenido en cada parcela por el valor obtenido en las parcelas sobrefertilizadas de cada ensayo.

Para ver la utilidad de la información derivada de las imágenes se calcularon las relaciones entre el rendimiento de grano de cada parcela y las lecturas del medidor de clorofila (SPAD), los ND y los índices de vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron, en general, correlaciones lineales (r) significativas entre las lecturas de SPAD y los ND obtenidos (Tabla 2), siendo las correlaciones más altas en el ensayo de ZAR que en ALB. Las correlaciones más elevadas se obtuvieron para la banda del verde (ND_G), lo que concuerda con el trabajo de Blackmer et al., (1994), a pesar de que el medidor de clorofila mide la transmitancia en una longitud de onda del rojo. Las correlaciones disminuyeron de forma notable al excluir del análisis las parcelas más deficitarias, parcelas que difícilmente se encuentran en condiciones normales de cultivo.

Prácticamente para casi todos los índices de vegetación calculados, las correlaciones con las lecturas de SPAD fueron altamente significativas (Tabla 2), aunque con valores moderados que oscilaron entre 0.65 y 0.83 en ZAR y entre 0.46 y 0.70 en ALB. Estas correlaciones disminuyeron de forma notable al excluir las parcelas con elevado déficit de nitrógeno. En todos los casos, el GNDVI fue el índice que presentó una mayor correlación con las lecturas de SPAD, con valores de 0.62 y 0.58 para los ensayos de ZAR y ALB, respectivamente, lo que es coherente con la mayor correlación observada con los ND en el verde.

	----Zaragoza----		----Albacete----	
Índice	**Todas (n=63)**	**T-D[1] (n=58)**	**Todas (n=51)**	**T-D[1] (n=47)**
ND_B	-0.78**	-0.52**	-0.50**	-0.31*
ND_G	-0.86**	-0.67**	-0.67**	-0.55**
ND_R	-0.79**	-0.56**	-0.49**	-0.27ns
ND_{NIR}	0.56**	0.31*	0.55**	0.31*
GNDVI	0.83**	0.62**	0.70**	0.58**
NDVI	0.74**	0.47**	0.55**	0.33**
NPCI	0.76**	0.49**	0.59**	0.39**
RDVI	0.65**	0.37**	0.56**	0.33**
SR	0.70**	0.46**	0.46**	0.22ns

[1], Todas menos las parcelas muy deficitarias

Tabla 2: Correlaciones (r) entre las lecturas de SPAD y las variables derivadas a partir de las imágenes (NDx e índices de vegetación).

Es importante demostrar que las medidas obtenidas a partir de las imágenes aéreas están, no solo relacionadas con el nivel de suficiencia de N o lecturas SPAD, sino que están asociadas al rendimiento del cultivo al menos tan bien como lo están las lecturas del sensor de clorofila.

Tal como se observa en la Figura 1a, los valores de SPAD relativos (SPADr, %) de las plantas de maíz en estado de V15 se relacionaron linealmente con el rendimiento de grano en ambos ensayos. El coeficiente de determinación (R^2) fue elevado en ambos ensayos, ya que en conjunto las lecturas de SPAD explican un 88% de las diferencias de rendimiento entre las distintas parcelas y las relaciones no fueron significativamente diferentes ($P>0.05$) entre los dos ensayos. Los valores relativos de GNDVI están también altamente relacionados con el rendimiento de grano en cada uno de los ensayos (Fig. 1b), explicando en promedio un 86% de la variabilidad del rendimiento de grano. Sin embargo las relaciones obtenidas en ambas localidades fueron significativamente diferentes ($P<0.05$) entre sí.

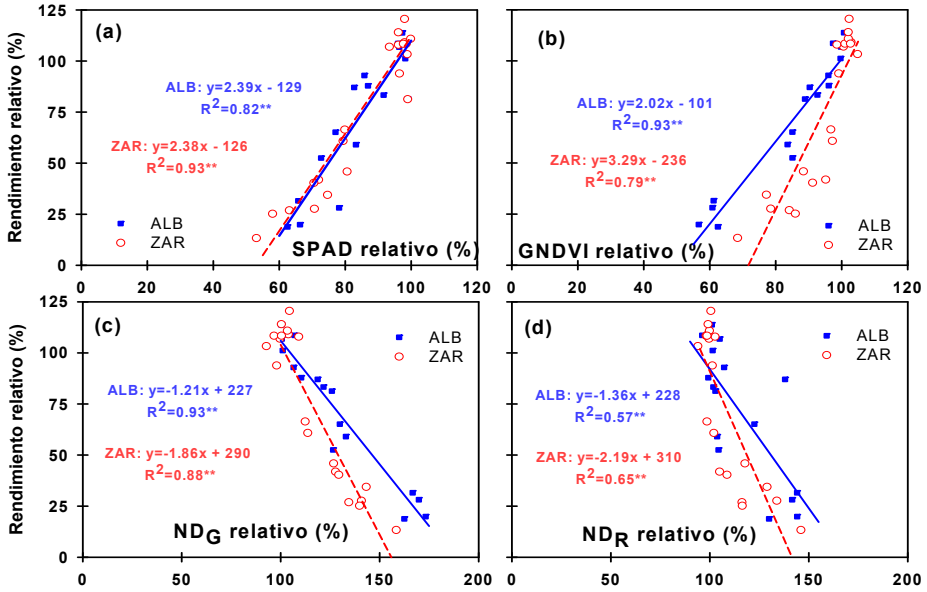


Figura 1: Relación entre el rendimiento de grano relativo (%) y los valores relativos de (a) SPAD, (b) GNDVI, (c) nivel digital en el verde (ND_G), y (d) nivel digital en el rojo (ND_R). Las variables medidas se han relativizado a la parcela sobrefertilizada de cada localidad.

Por su mayor simplicidad frente a los índices se presentan las relaciones entre el rendimiento relativo y los niveles digitales en el verde (Fig. 1c) y en el rojo (Fig 1d). Si bien para ambas longitudes de onda las relación con el rendimiento de grano fue significativa ($P<0.05$), queda patente que la relación es mejor para el verde (R^2 promedio=0.91) que para el rojo (R^2 promedio=0.61). Las regresiones lineales fueron significativamente diferentes en ambas localidades en el caso del verde (R_G), pero no en el rojo (R_R).

CONCLUSIONES

Tanto por su correlación con el contenido de clorofila, como con el rendimiento de grano, el nivel digital (ND) en el verde (540-560 nm) obtenido a partir de imágenes multiespectrales comerciales en fases intermedias (V15) del cultivo del maíz parece prometedora para evaluar el estado nutricional del cultivo. Su viabilidad real como herramienta de decisión requiere de un menor coste, por lo que sería preciso realizar trabajos en parcelas de cultivo comerciales con imágenes de menor resolución espacial.

BIBLIOGRAFÍA

BLACKMER, T.M., SCHEPERS, J.S., VARVEL, G.E., 1994. *Light Reflectance Compared with Other Nitrogen Stress Measurements in Corn Leaves*. Agronomy Journal 86:934-938.

BLACKMER, T.M. and SCHEPERS, J.S. 1996. *Aerial photography to detect nitrogen stress in corn*. Journal of Plant Physiology 148:440-444.

HABOUDANE, D., MILLER, J.R., TREMBLAY, N., ZARCO-TEJADA, P.J., DEXTRAZE, L., 2002. *Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. Remote Sens. Environ.* 81 :416-426.

ISLA, R., LÓPEZ-LOZANO, R., 2005. *Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz.* Revista de teledetección 24:5-9.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (AGL2009-12891-C02-02). Los autores agradecen a Rosa Gómez (CITA) por el trabajo de procesado de las imágenes y a Laura Garrido por su apoyo en los trabajos de campo.

Detección automática de plantaciones de árboles de cultivo en imágenes de alta resolución espacial

E. Izquierdo-Verdiguier, L. Gómez-Chova, J. Amorós-López y G. Camps-Valls

Image Processing Laboratory (IPL). Universidad de Valencia. C/ Catedrático Agustín Escardino, 9
46980 Paterna (Valencia, España). Correo electrónico: emma.izquierdo@uv.es

RESUMEN

El uso de técnicas de teledetección para la gestión de recursos agrarios y usos del suelo es cada vez mayor debido principalmente a que estas metodologías suelen ser más rápidas y con menor coste económico y de recursos que las tradicionales. El presente trabajo se centra en la detección de árboles en plantaciones de cultivos, lo cual es importante en estudios de reestructuración, control de superficies, actualización del inventario agrícola, etc. La detección de árboles se realiza mediante la aplicación de diferentes herramientas de procesado de imágenes, como por ejemplo: perfiles morfológicos, filtros de convolución y filtros de máximo local. Por último, se realiza la validación del algoritmo de detección de árboles utilizando imágenes aéreas de la Comunidad Valenciana de 0.5m de resolución espacial y con una base de datos con información catastral de las parcelas de diferentes tipos de cultivos (olivos, almendros, algarrobos, cítricos y viña).

Palabras clave: detección árboles, perfil morfológico, extracción de características, plantación de cultivos, imágenes aéreas.

ABSTRACT

Remote sensing techniques are increasingly used in order to manage land resources and its reasonable use. This is mainly because of current techniques are faster and cheaper than traditional methodologies. This work presents a tree detection algorithm in field crops, which is an important information in restructuring policies, land cover monitoring, agricultural statistics. The proposed method exploits different image processing tools, such as morphological profiles, convolution filters, and local maximum filters. Finally, the algorithm has been validated using 0.5m resolution aerial images and a data base with cadastral information of different crops (olives, almonds, carob tree, citric, and vineyard).

Keywords: *tree detection, morphological profiles, feature extraction, crop field, very high resolution aerial images.*

INTRODUCCIÓN

La evolución que se ha producido en los últimos años en la teledetección, concretamente en los sensores, ha hecho que se obtengan imágenes adquiridas a partir de sistemas de satélite y aerotransportados con una alta resolución espacial. Debido al aumento de la resolución espacial se ha logrado alcanzar un mayor detalle en las imágenes pudiendo realizar estudios en diversos campos que antes estaban limitados, como por ejemplo en el campo de la agricultura. Hasta hace unos años la generación y actualización de las bases de datos de inventarios agrícolas se realizaba de manera tradicional. Sin embargo, actualmente el uso de métodos automáticos para la identificación de la cobertura del suelo es la opción más eficiente para mantener estos inventarios actualizados.

Existen numerosos estudios de detección y delimitación de la copa de los árboles para la realización de inventarios agrícolas donde se identifican árboles en imágenes adquiridas por avión. Cada estudio aborda el problema de la detección o delimitación de las copas de los árboles utilizando diferentes metodologías entre las que destacan la utilización de filtros de máximo local (Culvenor, 2002; Wulder et al., 2000), filtros morfológicos (Pina et al., 2006) o utilización de patrones de ejemplo (Larsen y Rudemo, 1998; Salhi et al., 2006).

En el presente trabajo se desarrolla una metodología para detectar de forma no supervisada diferentes plantaciones de árboles de cultivos en imágenes de alta resolución espacial empleando herramientas del procesado de

imágenes. La primera sección describe el área de estudio y los datos utilizados, la siguiente sección detalla la metodología utilizada en la detección de árboles. En la tercera sección se detallan los resultados obtenidos y por último se presentan las conclusiones.

MATERIAL

El área de estudio es la Comunidad Valenciana (CV), situada al este de la Península Ibérica (España) y que contiene 542 municipios divididos en tres provincias (Castellón, Alicante y Valencia) con una extensión de 23,255 km^2 de superficie, de las que 5,767 Km^2 están dedicados al cultivo. Los municipios de la Comunidad tendrán una tipología predominante (Figura 1) en función de la zona donde se encuentren, ya que cada cultivo requiere un determinado clima.

El conjunto de datos utilizados en este estudio ha sido proporcionado por el Instituto Cartográfico Valenciano (ICV). Las imágenes aéreas son ortofotos con bandas en el visible (rojo, verde y azul, RGB) y en el infrarrojo cercano (CIR) a escala 1:10 000. Las imágenes, adquiridas en 2006-2007, presentan una resolución espacial de 0.5 metros y han sido georreferenciadas y ortorrectificadas por el ICV. Además de las imágenes, también se ha utilizado el archivo vectorial correspondiente a los recintos catastrales de la CV en formato *shape* que incluye la información catastral parcelaria a escala 1:10000.

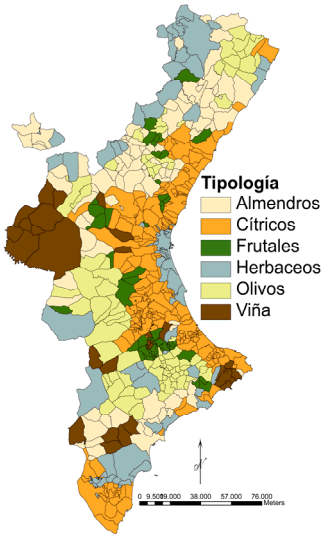


Figura 1: Tipología predominante por municipio en la Comunidad Valenciana.

METODOLOGÍA

Detección de árboles

El proceso de detección de árboles parte de una orto-imagen aérea, en la que no hay que realizar una segmentación previa (Trias-Sanz et al., 2008) ya que se tiene la información catastral con las parcelas de interés. A la imagen se le aplica la transformación de RGB a las coordenadas tono, saturación e intensidad (Hue, Saturation and Intensity, HSI) para obtener la imagen de intensidad. Como los valores de la intensidad en la vegetación son menores que en el suelo, se calcula la imagen invertida de la intensidad (1 − I) para obtener valores altos de intensidad en la vegetación. El proceso se desarrolla en dos imágenes: una la imagen de intensidad original y su versión suavizada espacialmente (aproximación multiescala). Una vez obtenidas ambas imágenes, se realiza la convolución de cada imagen con un filtro para detectar los árboles en ambas imágenes. El filtro necesita un valor promedio de los radios de los árboles a detectar. Dicho radio, se obtiene a partir de los Perfiles Morfológicos de cada imagen, que se obtienen aplicando operadores morfológicos a la imagen. A partir de los perfiles morfológicos se calcula el radio de los objetos para cada píxel de la imagen, que se usa para segmentar la imagen en tres subconjuntos y calcular los correspondientes radios promedio para objetos *pequeños*, *medianos* y *grandes*. Estos tres radios definen la forma del filtro de convolución que se aplicará a cada zona, dado por la función radial:

$$y(r)=\begin{cases} b & 0<r\le(R-a) \\ -\frac{b}{a}r+\frac{b}{a}R & (R-a)<r\le R \\ -\frac{f}{a}r+\frac{f}{a}R & R<r\le(R+a) \\ -f & (R+a)<r\le(R+m) \\ 0 & (R+m)<r<\infty \end{cases} \quad (1)$$

Donde a = 1, f = 1 y m = 1.5, son constantes para cualquier valor de R y b=f(2m-a)/(2R-a), donde b se ajusta para que la integral de la función con el radio sea igual a 0.

Una vez obtenido el filtro en función del radio, se realiza la convolución de la imagen con dicho filtro y que se le aplica, después un filtro máximo local, y que permite detectar que puntos son mayores que un umbral aplicado. El valor del umbral aplicado se selecciona empíricamente y es importante debido a que, en función de su valor, se detectan más o menos árboles en la imagen. Por último, se realiza una combinación de los árboles detectados en la imagen y en la suavizada

para obtener los árboles de la parcela de la imagen. En la Figura 2 se muestra el esquema metodológico del algoritmo de detección de árboles.

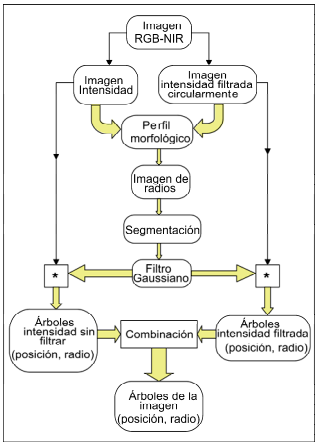


Figura 2: Esquema metodológico detección de árboles.

Validación de la detección de árboles

En este apartado se presenta la estadística empleada en la validación de la detección de árboles. Se dispone de una base de datos con las posiciones de los árboles en cada parcela, los cuales forman la clase "árbol". Sin embargo, se debe tener en cuenta que en la base de datos no existen muestras con la clase "no árbol". Por lo tanto, la matriz de confusión para validar la detección de árboles viene dada en la Tabla 1 y, a partir de ella, se define el acierto (Ecuación 2) y el índice estadístico (IE) de validación de la detección de los árboles (Ecuación 3).

$$Acierto = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$IE = Acierto(1 - e^{\frac{FP}{(TP+FN)/\ln(1/2)}}) \quad (3)$$

Donde TP es el valor de los árboles detectados correctamente ("True Possitive"), FN es el número de árboles de la base de datos que no se han detectado ("False Negative") y FP es el número de detecciones erróneas que no están en la base de datos "False Possitive".

		Verdad	
		1	2
Predicción	1	0	FN
	2	FP	TP

Tabla 1: Matriz de confusión para validar.

RESULTADOS

La validación de árboles detectados se ha realizado utilizando 15,553 árboles de diferentes tipos de cultivos pertenecientes a 59 parcelas de la Comunidad Valenciana (Tabla 2).

Cultivo	Almendro	Cítrico	Olivo	Plantones	Viña
Nº parcelas	11	20	13	8	7

Tabla 2: Nº de parcelas por clase de cultivo utilizadas en la validación.

En la Figura 4 se muestra el acierto en la detección de árboles en función del umbral aplicado. Analizando dicha figura, se obtiene que el umbral más adecuado en la detección de árboles para todas las clases de cultivo es 0.06, ya que en el caso de árboles grandes no se comete un error demasiado alto y en el caso de los árboles pequeños es el mejor valor de umbral que se puede aplicar.

En la Figura 5 se muestran parcelas de distintos cultivos en las que se ha aplicado el algoritmo de detección de árboles para un umbral de 0.06. Se observa que en la parcela de almendros, cítrico y olivo (figuras 5a, 5b y 5c) se obtiene un 100% de acierto ya que se detectan correctamente todos los almendros, los cítricos y los olivos incluidos en la base de datos de las parcelas. Sin embargo, la parcela con mejor IE de las tres es la de cítricos debido a que es la que menos detecciones falsas realiza, es decir es la que menos falsos positivos detecta. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de acierto e IE para el cultivo principal de las parcelas de la Figura 5. En algunas de estas parcelas se observa que se detectan árboles en bordes lineales de vegetación leñosa utilizados para separar cultivos de otros campos.

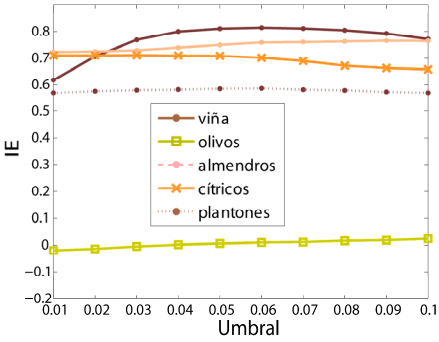


Figura 4: Variación del índice estadístico (IE) escalado por clase de cultivo en función del umbral aplicado.

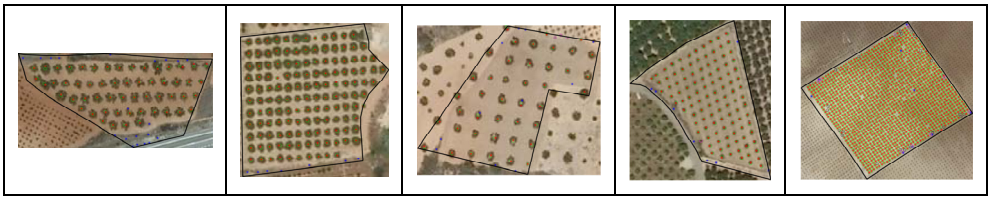


Figura 5: Ejemplo de validación de detección de árboles. Asterisco rojo: detección correcta, circulo verde: árbol base de datos bien detectado; asterisco azul: detección errónea; circulo negro: árbol base de datos no detectado. **a)** Almendros; **b)** Cítricos; **c)** Olivos **d)** Plantones; **e)** Viñas.

Cultivo	Acierto (%)	IE
Almendro	100	0.78
Cítrico	100	0.97
Olivos	100	0.82
Plantones	99.07	0.94
Viña	97.83	0.97

Tabla 3: Acierto e índice estadístico (IE) del cultivo principal de las parcelas de la Figura 5.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado un nuevo algoritmo de detección automática de plantaciones de cultivo en imágenes de alta resolución espacial para generar o actualizar las numerosas bases de datos necesarias para la gestión agrícola.

Los resultados obtenidos demuestran que el algoritmo empleado es bastante robusto para la variabilidad de parcelas analizadas, aunque se detectan falsos positivos en los bordes lineales vegetación. Según la clase de cultivo que se tenga en la parcela, la detección de árboles varía llegando a obtener un IE de acierto medio de 0.81 aplicando el umbral óptimo en el caso de la detección de viñas como se ha mostrado en la Figura 4. En cambio los olivos obtienen un acierto excesivamente bajo debido a que en algunas parcelas seleccionadas en la base de datos se detectan demasiados árboles o arbustos parásitos.

Una vez detectados correctamente los árboles de las parcelas de cultivo, se podrían realizar agrupamientos por tipos de cultivo para evitar mezclar información en el caso de realizar una extracción de características posteriormente. Por ejemplo, la extracción de características de geometría proporciona información útil para la explotación de cultivos y para medir la productividad de los árboles de la parcela. Además, también se puede desarrollar algoritmos de clasificación de diferentes tipos de cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

CULVENOR, D.S., 2002. *TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery.* Computers and Geosciences, 28 (1), 33-44.

LARSEN, M., RUDEMO, M., 1998. *Optimizing templates for finding trees in aerial photographs.* Pattern Recognition Letters, 19 (12), 1153-1162.

PINA, P., BARATA, T., BANDEIRA, L., 2006. *Morphological recognition of the spatial patterns of olive trees.* In: 18th International Conference on Pattern Recognition. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 845-848.

SALSHI, M., et al, 2006. *Remotely sensed image segmentation by nonlinear correlation.* In: Information and Communication Technologies, 2nd Edition. Vol. 1, 424–429.

TRIAS-SANZ, R., STAMON, G., LOUCHET, J., 2008. *Using colour, texture, and hierarchial segmentation for high-resolution remote sensing.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63 (2), 156-168.

WULDER, M. y GOODENOUGH, D. G., 2000 *Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery.* Remote Sensing of Environment, 73 (1), 103-114.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto EODIX (AYA2008-05965-C04-03).

Agradecemos la colaboración del Instituto Cartográfico Valenciano por el cual se ha tenido acceso a los datos utilizados.

Actualización de mapas de cultivos en las Islas Canarias por medio de imágenes de satélite de muy alta resolución espacial

M. Labrador-García[1], M. Arbelo[2] y Lara A. Arroyo[3]

[1] GMR Canarias. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente. Gobierno de Canarias. C/ Subida al Mayorazgo, 24-portal B. 38110 Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias, España). Correo electrónico: mauriciolg@gmrcanarias.com

[2] Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Universidad de La Laguna (Islas Canarias, España).

3 Centro de Investigación del Fuego (CIFU). Fundación General del Medio Ambiente de Castilla La Mancha.

RESUMEN

Una imagen de satélite de muy alta resolución (GeoEye-1) fue empleada para estudiar su viabilidad en la actualización de los mapas de cultivos en la isla de Tenerife. La imagen fue ortorectificada y clasificada tomando como base la información obtenida en el trabajo de campo posterior a su adquisición. El método de clasificación aplicado fue el de la máxima probabilidad (maximum likelihood). El resultado de la clasificación (raster) fue adaptado al parcelario del mapa de cultivos (vector). Ambos resultados, raster y vector, fueron analizados por medio de una matriz de errores. Ambas metodologías mostraron buenos resultados, aunque la imagen raster ofreció una mayor precisión global.

Palabras clave: Teledetección, GeoEye-1, agricultura, clasificación.

ABSTRACT

A very high resolution satellite image (GeoEye-1) was used for testing the update of agricultural maps in the island of Tenerife (Canary Islands, Spain). The image was orthorectified and classified based on ground truth data, collected a few days after the acquisition of the satellite image. The classification technique applied was maximum likelihood. The classified raster image was adapted to the cadastral vector layer through a process of vectorization. The results (raster and vector) were analyzed by means of error matrices and compared to each other. Both methodologies showed good results, although the raster image gave the best overall accuracy.

Keywords: *Agriculture, remote sensing, GeoEye-1, classification.*

INTRODUCCIÓN

Los mapas de cultivos son una herramienta fundamental para la gestión del territorio en Canarias. Debido a la pequeña extensión de las islas, el medio rural se entremezcla con frecuencia con el urbano, por lo que para llevar a cabo políticas y/o actuaciones eficaces es necesario un preciso y actualizado inventario cartografiado de los diferentes cultivos presentes en la isla

Hasta el día de hoy, los mapas de cultivos en Canarias se han realizado mediante un intenso trabajo de campo, identificando los cultivos a pie de finca. Este método, aunque preciso, es demasiado costoso, lo que lleva a que la renovación de estos mapas tome más tiempo del que sería necesario para ser una herramienta eficaz de gestión del territorio.

El empleo de imágenes de satélite para la detección de cultivos es una técnica empleada con frecuencia en muchos ámbitos. Sin embargo, en un territorio tan fragmentado y con parcelas de pequeña superficie, como en las islas Canarias, los satélites usados tradicionalmente en este tipo de trabajos están limitados por su resolución espacial.

El lanzamiento de satélites con sensores de muy alta resolución espacial en los últimos años, abre un campo de posibilidades al empleo de la

teledetección en la identificación de cultivos en territorios en los que el tamaño de los elementos a identificar no permite el uso de satélites de menor resolución espacial.

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

La zona elegida para este estudio abarca una superficie total de unos 50 Km^2. Se encuentra en las medianías del sur de la isla de Tenerife, entre los 800 y los 1500 metros sobre el nivel del mar, donde abundan principalmente los cultivos de viña y papa, además de terreno arable y suelo agrícola no cultivado. Existen en la zona otros cultivos que ocupan mucha menor superficie y que no han sido tenidos en cuenta en este estudio.



Imagen 1: Muestra de imagen de GeoEye-1 de la zona de estudio.

Una imagen del satélite GeoEye-1 fue programada en la fecha en la que el cultivo estacional más importante de la zona se encontraba en máximo desarrollo. La imagen se captó el día 3 de octubre de 2010. GeoEye-1 dispone de un sensor multiespectral, con 4 bandas (450-520 nm 520-600 nm, 625-695 nm, 760-900 nm), y 2 m/píxel de resolución espacial y una banda pancromática (450-900 nm), de 0,5 m/píxel. La imagen adquirida se recibió en el nivel de mínimo procesado (Geo^{TM}). Por lo tanto, estaba corregida radiométricamente, orientada y proyectada en el sistema de coordenadas UTM – WGS 1984, aunque no estaba ortorectificada. (http://www.geoye.com/Corpsite)

Entre los días 6 y 13 de octubre, fue realizado el trabajo de campo con el fin de obtener la información necesaria para realizar la clasificación y validar los resultados. Este trabajo consistió en la realización de un muestreo aleatorio de parcelas, teniendo en cuenta que todos los cultivos y usos del suelo representativos de la zona de estudio quedaran registrados. En total se visitaron 170 parcelas de cultivo, de las que se obtuvo la siguiente información: Cultivo, estado de desarrollo, fecha de paso y el código de la fotografía tomada a pie de finca. Esta información fue recogida en formato shape empleando un tablet PC. Un GPS sincronizado con el equipo ayudó a la orientación en campo y a la ubicación de las parcelas a muestrear, las cuales fueron elegidas de forma aleatoria.

METODOLOGÍA

Corrección de las imágenes

La imagen fue ortorectificada empleando la información del fichero RPC (rational Polynomial coefficient) suministrado con la imagen (Fraser, 2009) y un modelo de elevación del terreno de 10 m/píxel de resolución espacial (GRAFCAN, 2010). El desfase de altura del geoide en la zona de estudio se obtuvo por medio de un calculador de ondulación en unas coordenadas determinadas (Rapp, 1982). Con esta metodología no fueron necesarios puntos de control para realizar la ortorectificación.

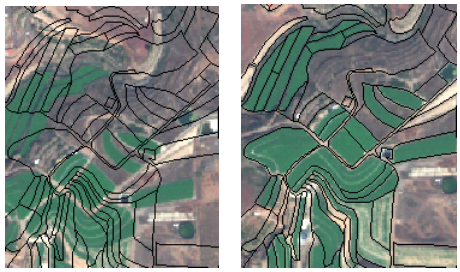


Imagen 2: Muestra de imagen de GeoEye-1 y recintos catastrales, antes y después de la ortorectificación.

No se consideró necesaria la corrección atmosférica de la imagen debido a que se trata de un estudio desarrollado sobre una sola imagen, por lo que los valores originales (DN) de cada píxel podían usarse directamente en la fase de clasificación.

Por otra parte, en cuanto a la corrección de las diferencias de reflectancia debido a la orografía del terreno, el modelo de elevación del terreno disponible tiene una resolución espacial de 10 m,

mucho más pequeña que los 2 m/píxel de la imagen satelital, lo que no permite una óptima corrección de este tipo. En cualquier caso, el efecto de nivelación del terreno que tiene el aterrazado típico de los cultivos de la zona debería mitigar en gran medida el efecto que pudiera tener el ángulo de incidencia solar sobre laderas con distinta orientación solar.

Clasificación

Un paso previo a la clasificación fue la creación de una máscara que limitara el análisis únicamente a la superficie agraria útil. Se empleó el último mapa de cultivos de la zona para excluir del estudio el territorio que correspondía a suelo urbano (edificaciones y viales), eriales y montes. De esta forma se simplificó el análisis evitando introducir en el proceso de clasificación usos del suelo que están fuera de este estudio.

El método de clasificación empleado fue el de máxima probabilidad. Un número variable de muestras fueron necesarias, en cada clase, para completar el proceso de entrenamiento. Fue necesario dividir las clases en subcategorías con el fin de reflejar la variabilidad en el estado fenológico de los cultivos, técnicas de cultivo o tipo de suelo. Las 4 clases a distinguir fueron: suelo agrícola abandonado, huerta limpia, papa y viña. Cada una de estas clases se dividió a su vez en dos categorías, excepto la viña, que se dividió en tres. De esta forma, el número total de usos del suelo a clasificar fue de 9. Una vez hecha la clasificación las subclases fueron de nuevo reagrupadas.

Los resultados de la clasificación fueron contrastados con la información recogida en campo y analizados, a nivel de pixel, por medio de una matriz de errores. Las muestras empleadas para la validación fueron distintas a las usadas en la clasificación y suponen aproximadamente el 1% de la superficie de estudio analizada. Los resultados de la validación se muestran en las tablas 1 y 2.

	papa	abandono	h. limpia	viña	total
papa	5.280	0	101	0	5.381
abandono	0	2.539	33	665	3.237
h. limpia	0	5	2.737	140	2.882
viña	13	200	0	4.936	5.149
total	5.293	2.744	2.871	5.741	16.649

Tabla 1: Matriz de errores de la imagen clasificada, desarrollada a nivel de píxel.
h. limpia = huerta limpia o terreno arable

	Exactitud del productor	Exactitud del usuario
papa	99,8%	98,1%
abandono	92,5%	78,4%
h. limpia	95,3%	95,0%
viña	86,0%	95,9%
Exactitud total		**93,1%**

Tabla 2: Resultados de la clasificación de la imagen raster, desde el punto de vista del productor, del usuario y exactitud total.

Los resultados de la matriz de errores muestran una buena clasificación en general, destacando el cultivo de la papa y la huerta limpia, que se clasificaron con precisiones por encima del 95%, tanto desde el punto de vista del "usuario" (*exactitud del usuario*) como desde el "productor" (*exactitud del productor*). Las otras dos clases presentes en el estudio presentan precisiones algo más bajas, produciéndose una cierta confusión entre la viña y el terreno en abandono. Este hecho puede ser debido a que el sistema de conducción de la viña y el grado de cobertura vegetal, influyen en las respuestas espectrales de este cultivo.

Adaptación de la imagen clasificada al parcelario del mapa de cultivos

El mapa de cultivos que desarrolla y utiliza el Gobierno de Canarias se encuentra en formato vectorial (López-Mazanares, 2009), ya que permite mejores posibilidades de análisis y manejo que un mapa en formato raster (por ejemplo, realizar consultas basadas en los códigos de cada parcela). Es por ello que el resultado final de esta clasificación fue adaptado al formato actual del mapa de cultivos. El parcelario que sirve como base al mapa de cultivos proviene de los recintos catastrales, que han sido modificados durante los trabajos de elaboración de los anteriores mapas de cultivos.

El proceso de adaptación se realizó superponiendo la imagen clasificada (raster) al parcelario vectorial del mapa de cultivos y asignando a cada parcela la clase mayoritaria. En este proceso se asume que cada parcela contiene una clase predominante, que será la que defina el cultivo para cada una de las parcelas del mapa de cultivos. El resultado fue evaluado igualmente en contraste con el trabajo de campo, pero en este caso a nivel de parcela.

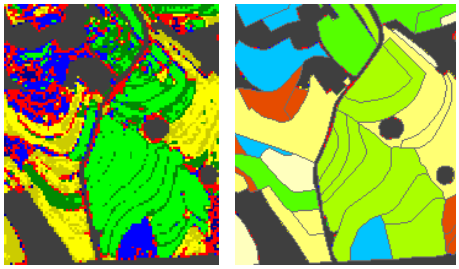


Imagen 3: Izquierda, imagen clasificada en formato raster. A la derecha, adaptación de los resultados de la clasificación, asignando la clase mayoritaria a cada parcela.

Los resultados se presentan en las Tablas 3 y 4.

	papa	abandono	h. limpia	viña	total
papa	36	1	0	0	37
abandono	2	15	7	13	37
h. limpia	0	0	37	2	39
viña	0	0	1	15	16
total	38	16	45	30	129

Tabla 3: Matriz de errores desarrollada a nivel de parcelas

	Exactitud del productor	Exactitud del usuario
papa	94,7%	97,3%
abandono	93,8%	40,5%
h. limpia	82,2%	94,9%
viña	50,0%	93,8%
Exactitud total		79,8%

Tabla 4: Resultados de la clasificación adaptada al parcelario, desde el punto de vista del productor, del usuario y exactitud global.

Los resultados obtenidos tras la adaptación de la imagen clasificada al parcelario del mapa de cultivos ofrecen una menor precisión que los de la clasificación en formato raster. Los principales errores se producen por una sobreestimación del terreno abandonado en detrimento del cultivo de la viña, que ha sido infraclasificado.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada para la obtención del mapa de cultivos partiendo de una imagen de satélite de muy alta resolución ha mostrado ser válida en la zona de estudio.

Sin embargo, será necesario el trabajo con imágenes multitemporales y mejorar del proceso de adaptación raster-vector para aumentar la precisión de los resultados, de tal forma que el resultado final permita usar el mapa de cultivos como herramienta de gestión del territorio.

El escaso desarrollo vegetativo de la viña en la fecha de adquisición de la imagen puede haber influido en la pobre clasificación y su confusión con terreno abandonado. El empleo de imágenes en otras fechas podría mejorar los resultados.

Asumir que las parcelas provenientes del mapa de cultivos definen los límites entre diferentes cultivos y usos del suelo, ha provocado una disminución en la precisión de los resultados tras el proceso de adaptación al parcelario del mapa de cultivos.

Por lo tanto, el desarrollo de una clasificación basada en análisis por objetos, que realice una segmentación previa de la imagen, respetando los límites parcelarios, podría mejorar la precisión final del mapa de cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

FRASER, C.S. y RAVANBAKHSH, M., 2009. *Georeferencing accuracy of GeoEye-1 imagery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 75 (6), 634-638.

GRAFCAN S.A., 2010. *Modelo Digital del Terreno en Canarias (años 2004 - 2006)*. http://www.grafcan.es.

LOPEZ-MANZANARES, FERNANDO, 2009. *Mapa de cultivos de la isla de Tenerife. Campaña agrícola 2007/2008. Metodología*. Área de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. Cabildo de Tenerife.

RAPP, RICHARD H., 1982. *A Fortran Program for the Computation of Gravimetric Quantities from High Degree Spherical Harmonic Expansions, Report 334*. Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto SATELMAC (www.satelmac.com), financiado con fondos FEDER, dentro del Programa de Cooperación Transnacional MAC-2007-2013.

Comportamiento retrodispersivo de cultivos de secano observados mediante sensores radar en la banda C

A. Larrañaga [1], J. Álvarez-Mozos [2] y L. Albizua [1]

[1] TRACASA. C/ Cabárceno, 6. 31621 Sarriguren (Navarra). Correo electrónico: alarranaga @tracasa.es

[2] Universidad Pública de Navarra. Los Tejos. Arrosadía, s/n. 31006 Pamplona (Navarra). Correo electrónico: jesus.alvarez@unavarra.es

RESUMEN

La señal de retorno que captan los sensores radar, depende principalmente de las características de las cubiertas observadas y de la configuración del propio sensor. Las características de las cubiertas, varían a medida que se va desarrollando el cultivo e influyen en la retrodispersión captada por el sensor. El principal objetivo de este trabajo ha sido realizar un estudio multi-temporal que permita estudiar las variaciones en la retrodispersión debido al estado fenológico de cada cultivo y, a su vez, establecer las fechas óptimas para una correcta separación y clasificación de los mismos. Se ha contado con 5 imágenes Radarsat-2 y una imagen Envisat-ASAR adquiridas entre marzo y junio del 2010 sobre la cuenca de Pamplona (Navarra). Los resultados obtenidos ilustran la importancia de la fecha de adquisición de imágenes de cara a una adecuada separación y clasificación de los diferentes cultivos.

Palabras clave: radar, restrodispersión, banda C, multi-temporalidad, seguimiento cultivos.

ABSTRACT

The radar backscatter, depends mainly on the characteristics of observed covers and the configuration of the sensor. As crops grow, their characteristics vary and their radar backscatter also changes. The main objective of this study was to perform a multi-temporal analysis to study variations in the backscatter due to the growth stage of each crop and, in turn, establish the optimal dates for an accurate separation and classification. With this aim five Radarsat-2 and one Envisat-ASAR images, acquired on the Pamplona basin (Navarre) between March and June 2010, were used. The results illustrate the importance of image acquisition date in order to obtain a proper crop separability and to achieve accurate classification results.

Keywords: *radar, backscatter, C-band, multi-temporality, crops monitoring.*

INTRODUCCIÓN

Las imágenes radar, son una fuente de datos muy interesante para diversas aplicaciones (agricultura, hidrología, geología, gestión de catástrofes, etc.) debido a que: a) la cubierta nubosa no limita su capacidad de observación y b) pueden ser adquiridas en condiciones de día o de noche. Este tipo de observaciones, ofrecen una información distinta y complementaria a la obtenida por los sensores ópticos. La principal ventaja de las imágenes radar radica en que gracias a las características mencionadas, presentan una mayor posibilidad de obtener datos útiles.

Trabajos previos (Larrañaga *et al.*, 2011) demuestran la importancia de la fecha de adquisición para obtener una buena clasificación. Por otro lado, numerosos estudios (De Wit *et al*., 2004; Tavakkoli *et al*., 2007; Wang *et al*., 2010) ponen de manifiesto la importancia de los datos multi-temporales para discriminar distintos tipos de cultivos. El principal objetivo de este trabajo ha consistido en: una vez conocido el calendario agronómico y la respuesta de cada cultivo en cada momento, establecer las fechas óptimas para una buena separación y clasificación de los mismos.

DATOS DE PARTIDA

La zona de estudio corresponde a la comarca de Pamplona, situada en la zona media de Navarra. Las zonas agrícolas del área de estudio, tienen una alta vocación cerealista. En la campaña agrícola estudiada, el cultivo predominante

es el cereal de secano, principalmente el trigo (TR), representando aproximadamente el 55% de la superficie agrícola. Los cereales minoritarios, avena (AV) y cebada (CB), ocupan el 16% y 15% de la superficie agrícola respectivamente, mientras que el 14% restante, lo componen el guisante (GU), girasol (GI), veza (VE), colza (CO), pastos (PS) y el barbecho (BA). El tamaño de la mayoría de estas parcelas, oscilan los 4000 m^2.

La serie de imágenes radar utilizadas, proceden de dos sensores que trabajan en la banda C: Radarsat-2 (29/03/10, 18/04/10, 12/05/10, 5/06/10 y 29/06/10) y Envisat-ASAR (24/04/10). Las primeras son polarimétricas (finas y estándar) mientras que la segunda es de doble polarización (HH-VV).

Como información auxiliar se cuenta con: (1) un Modelo Digital de Terreno (MDT) de 5 metros de resolución, (2) información de campo correspondiente a las inspecciones de las declaraciones de la PAC (Política Agraria Común), (3) SIG-PAC del 2009 y (4) calendario agronómico de los cultivos a clasificar (Tabla 1).

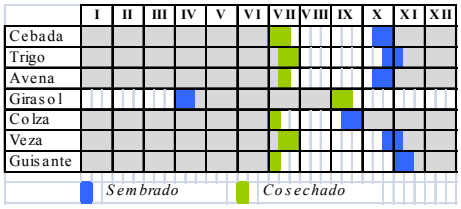


Tabla 1: Calendario agronómico específico para la zona de estudio (Fuente: ITGA)

METODOLOGÍA

Ortorrectificación y creación de las bandas

Se ha utilizado el software libre NEST, para ortorrectificar y generar las bandas de coeficiente de retrodispersión (σ^o) corregidas con el ángulo de incidencia local. Este valor de σ^o, representa el ratio entre la potencia total recibida y emitida en cada polarización (HH, HV y VV). Las imágenes resultantes, se han remuestreado a 5 m. Además de esas bandas de polarización lineal, se han generado también los ratios de esas bandas. En todos los casos el error medio cuadrático obtenido ha sido inferior a un píxel.

Filtrado de las bandas

El moteado o *speckle* es un fenómeno intrínseco de los sistemas SAR y normalmente se corrige filtrando la imagen. En el presente trabajo, se ha utilizado el filtro Gamma Map (3x3), filtro adaptativo efectivo para reducir el moteado sin suprimir las características lineales de los datos radar (Lopes et al., 1993).

Análisis multi-temporal de los datos SAR

En este apartado, se crean las gráficas de firmas (Figura 1) que permiten analizar la respuesta de cada cultivo para cada polarización y fecha y establecer así las fechas óptimas para una correcta clasificación.

Análisis de separabilidad

Se ha utilizado la distancia de Jeffries-Matusita (JM), adecuada para datos que no siguen una distribución normal, con el fin de estimar cuales son las bandas y cultivos que mayor separabilidad presentan (Figura 2). Esta distancia se ha utilizado en otros estudios (Skriver, 2007) obteniendo similares resultados.

Clasificación

El algoritmo de clasificación utilizado ha sido *Random Forest* (RF), (Breiman, 2001) y se ha ejecutado con el software de análisis estadístico R. Es un clasificador basado en la realización de múltiples árboles de decisión, obteniéndose la clasificación final por mayoría. Las principales ventajas de esta técnica radican en que el algoritmo es independiente del número y tamaño de la muestra, el tiempo de computación requerido es pequeño y es adecuado para datos que no se ajustan a una distribución normal como los datos radar. Estudios recientes (Gislason, *et al.*, 2006; Waske *et al.*, 2009) han utilizado el clasificador de RF para discriminar cultivos, obteniendo muy buenos resultados. La clasificación se ha realizado de manera supervisada y a nivel de parcela. Se han hecho varias clasificaciones: (1) utilizando los datos de cada fecha por separado y (2) utilizando una serie de datos multi-temporales.

RESULTADOS

Análisis multi-temporal de los datos SAR

Las polarizaciones HV y VV presentan un rango de variación superior al canal HH para cualquiera de las fechas estudiadas. En cuanto a las fechas, mayo y junio son las que mayor rango de variación presentan.

En el mes de marzo el desarrollo de los cultivos es aún escaso, de modo que el suelo tiene mayor influencia que el cultivo sobre el σ^o. En el caso del girasol, el σ^o que se recibe se debe exclusivamente al terreno ya que hasta abril no se siembra. A medida que pasa el tiempo, la influencia del suelo sobre el σ^o va disminuyendo.

Hasta el mes de mayo, σ^o_{HH} y σ^o_{HV} presentan poca variación para la mayoría de los cultivos. A partir de esa fecha es cuando se empieza a notar un aumento sobre todo en σ^o_{HV} y σ^o_{VV} debido al gran desarrollo de los cultivos. Durante esos meses de mayo y junio se produce el fenómeno de extinción diferencial, que provoca que los cultivos de porte pequeño o medio con elementos orientados verticalmente produzcan una mayor extinción de la onda polarizada verticalmente a su paso por el medio, lo que provoca que σ^o_{HH} sea mayor que σ^o_{VV} .

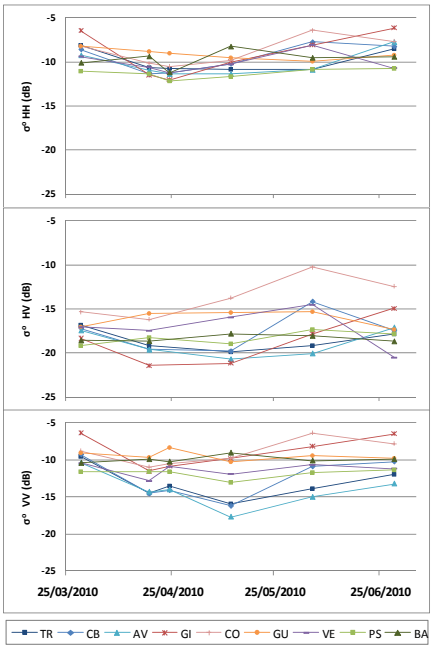


Figura 1: Evolución de los valores de σ^o para cada polarización y cultivo.

A finales de junio, el σ^o de los cultivos que se cosechan a finales de julio (TR y AV) así como el girasol que se cosecha en septiembre, sigue aumentando. El σ^o del resto de cultivos desciende debido a que para esa fecha, algunas parcelas se encuentran cosechadas.

Entre los cereales, cultivos predominantes de la zona de estudio, destaca la respuesta de la cebada. La evolución de los 3 cereales es paralela hasta el mes de junio. A partir de ahí, el σ^o de la cebada es distinto al resto de cereales lo que indica que a priori, podría ser un buen mes para poder discriminarlos.

Separabilidades

La distancia de JM es un índice que sirve para comparar la separabilidad entre las distintas bandas, cultivos y fechas y seleccionar aquellas que más interesan (Figura 2). Se observa que las separabilidades obtenidas tienen una clara distribución temporal. Los meses de mayo y junio son los meses que mayor separabilidad media presentan.

En general, la separabilidad media es baja, no obstante, hay cultivos individuales (GU, CO y GI) que presentan una alta separabilidad para determinadas fechas y polarizaciones. Para los cereales, mayo y junio siguen siendo los meses más interesantes en cuanto a separabilidad. σ^o_{HV}, σ^o_{VV} y $\sigma^o_{VV}/\sigma^o_{HH}$ son los coeficientes que mayor separabilidad obtienen.

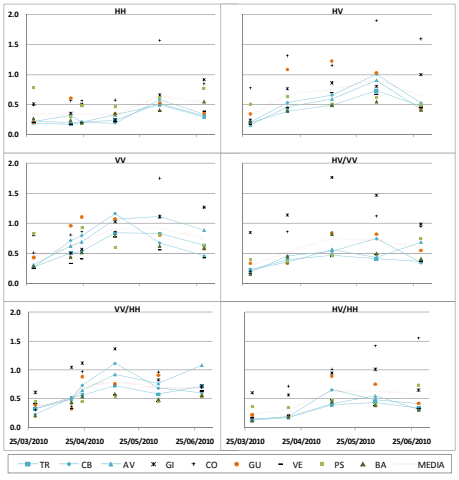


Figura 2: Distancias de JM para cada cultivo y fecha, así como la media de cada uno, para las polarizaciones HH, HV y VV y sus ratios.

Clasificación

Las clasificaciones para datos simples (una sola imagen), han dado mejor resultado cuando el cultivo presentaba un gran desarrollo vegetativo (mayo-junio) (Tabla 2). No obstante, los resultados de cada uno de ellos han sido pobres.

Las clasificaciones multi-temporales han dado muy buenos resultados obteniendo en todos los casos un índice Kappa global mayor que 0,6. Este Kappa, corresponde a una calidad "sustancial" (Kappa>0,6) según la categorización propuesta por Landis y Koch (1977).

	Fiab. Global	Kappa
29 marzo	0.51	0.12
18 abril	0.50	0.19
24 abril*	0.46	0.11
12 mayo	0.61	0.37
5 junio	0.67	0.46
29 junio	0.62	0.37
12 may./5 jun.	0.76	0.61
12 may./5 jun./29 jun.	0.82	0.71
12 may./5 jun./29 jun./18 abr.	**0.83**	**0.73**
12 may./5 jun./29 jun./18 abr./*24 abr.**	**0.83**	**0.73**
12 may./5 jun./29 jun./18 abr./29 mar.	0.82	0.71
12 may./5 jun./29 jun./18 abr./*24 abr.*/29 mar.	**0.83**	**0.73**
** Envisat AP (HH-VV)*		

Tabla 2: Resultados de fiabilidad global y Kappa para los distintos datos estudiados.

Los datos del 12 de mayo, 5 y 29 de junio han sido los más interesantes ya que al añadir información de otras fechas (marzo, abril) el resultado no ha mejorado.

CONCLUSIONES

La fecha en la que se adquieren las imágenes es vital en el resultado final de la clasificación debido al distinto estado de desarrollo vegetativo. Para una buena clasificación, es necesario aprovechar los cambios de los cultivos, utilizando imágenes radar multi-temporales.

Quedaría pendiente profundizar en el potencial de las imágenes radar polarimétricas, obteniendo más bandas derivadas (descomposiciones, cambios de base, etc.) para ver si los resultados mejoran.

BIBLIOGRAFÍA

BREIMAN, L., 2001. *Random Forests.* Mach. Learn. 40, 5-32.

DE WIT, A.J.W., y CLEVERS, J.G.P.W., 2004. *Efficiency and accuracy of per-field classification for operational crop mapping.* International Journal of Remote Sensing, 25 (20), 4091-4112.

GISLASON, P.O., BENEDIKTSSON, J.A., y SVEINSSON, J.R., 2006. *Random Forests for land cover classification.* Pattern Recognition Letters, 27, 294-300.

LANDIS, J.R., y KOCH, G.G., 1977. *The measurement of observer agreement for categorical data*. Biometrics, 33, 159-174.

LARRAÑAGA, A., ALBIZUA, L. y ÁLVAREZ-MOZOS, J., 2011. *Crop classification in rain-fed and irrigated agricultural areas using Landsat TM and ALOS/PALSAR data.* Canadian Journal of Remote Sensing (CJRS), accepted for publication.

LOPES, A., NEZRY, E., TOUZI, R. y LAUR, H. 1993. *Structure Detection and Statistical Adaptive Speckle Filtering in Sar Images*. International Journal of Remote Sensing, 14 (9), 1735-1758.

SKRIVER, H., 2007. *Signatures of polarimetric parameters and their implications on land cover classification.* Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007. IEEE International. 4195-4198.

TAVAKKOLI SABOUR, S.M., LOHMANN, P. y SOERGEL, U., 2007. *Monitoring agricultural activities using Asar Envisat data.* Proc. of 'Envisat Symposium 2007'.

WANG, D., LIN, H., CHEN, J., ZHANG, Y. y ZENG, Q., 2010. *Application of multi-temporal ENVISAT ASAR data to agricultural area mapping in the Pearl River Delta.* International Journal of Remote Sensing, 31 (6), 1555-1572.

WASKE, B. y BRAUN, M., 2009. *Classifier ensembles for land cover mapping using multitemporal SAR imagery.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 450-457.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Subprograma Torres Quevedo, al Fondo Social Europeo y al Proyecto CGL2007-63453/HID del Plan Nacional de I+D+i y a las agencias espaciales europea y canadiense (ESA-CSA), Proyecto SOAR-EU 6774.

Uso de índices de vegetación en la estimación de cosecha de cultivos. Utilidad y limitaciones en el caso del trigo en el sur de España

F.L.M. Padilla[1], M.P. Gónzalez-Dugo[1], S. Maas[2], P. Gavilán[1] y J. Domínguez[1]

[1] IFAPA. Instituto de Investigación y Formación Agraria de Andalucía. Alameda del Obispo. Apdo. 3092. 14080. Córdoba Tel: 957016188. E-mail: franciscol.munoz@juntadeandalucia.es.

[2] Texas Tech University, 2500, Broadway, Lubbock, TX (USA) 79409.

RESUMEN

El actual incremento en la demanda de alimento y los limitados recursos disponibles, hacen necesario que se desarrollen herramientas que permitan la estimación de la producción de los cultivos. En este estudio se evalúa el uso de los índices de vegetación (IV) en la estimación de cosecha de trigo en el sur de España. De las metodologías propuestas, destaca el uso de estos IV para estimar parámetros biofísicos (LAI o fPAR) que pueden ser usados como variables de entrada en modelos que estiman la cosecha como el modelo de Monteith o el GRAMI. Los errores obtenidos (6% en estimaciones de cosecha medias) permitirían mejorar las estadísticas agrarias actuales y la obtención de mapas de cosecha.

Palabras clave: Cosecha, Trigo, Índice de vegetación, GRAMI, Monteith, Landsat

ABSTRACT

The worldwide increase in the demand for food and the limited available resources to produce it make it necessary to develop tools which allow for the estimation of crop production. This study evaluates the use of vegetation indices in estimating wheat yield in southern Spain. Vegetations indices obtained from remote sensors can be used as input variables in crop models that estimate crop yield such as the biomass estimation model of Monteith or the GRAMI model. The reasonable degree of accuracy of these models (6% on average yield estimate) would improve current agricultural statistics, providing fast and low cost yield maps.

Keywords: *Yield, Wheat, GRAMI, Spectral vegetation index, Monteith,, Landsat*

INTRODUCCIÓN

Estudios recientes muestran que la demanda total de alimentos se verá incrementada durante al menos los próximos 40 años debido al creciente aumento de la población mundial. Sin embargo, se prevé una reducción de los recursos destinados a la agricultura, fundamentalmente agua destinada a riego, como consecuencia de la alta competencia entre sectores. Asimismo, se espera que el cambio climático empeore esta situación, provocando, en regiones semiáridas como el sur de España, una disminución del agua disponible. Todos estos factores requieren mejorar la capacidad de tomar de decisiones sobre cómo producir, almacenar y distribuir los distintos cultivos y productos, para lo que es necesario disponer de información de calidad y en el momento adecuado sobre el crecimiento y la cosecha de los principales cultivos. El uso de sensores remotos para la estimación de cosecha de cultivos es una alternativa que está generando un gran interés en los últimos años. Su capacidad de ofrecer información sobre zonas extensas permitiría realizar estimaciones que completen o mejoren las estadísticas agrarias ofrecidas a escala municipal o comarcal. En este estudio se evalúa la potencialidad de los índices de vegetación para la estimación de cosecha de trigo en el sur de España en condiciones experimentales y en parcelas comerciales.

ZONA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN ESPECTRAL UTILIZADA

Parcelas experimentales

Se realizó un seguimiento completo de dos parcelas experimentales de trigo durante la campaña 2008/09. La primera parcela estaba ubicada cerca de Cañete de las Torres (Córdoba) y pertenecía a la Red Andaluza de Experimentación Agraria (RAEA). En esta parcela se cultiva-

ron 16 y 15 variedades de trigo duro y blando, respectivamente, en parcelas de 12 m^2. Se realizaron medidas cada 15 días de altura de cultivo, PAR, LAI y reflectividad usando un ceptómetro AccuPAR (modelo LP-80) y un espectrorradiómetro manual (ASD- FieldSpect). La tabla 1 muestra los días de medida y el sensor utilizado. Al final del ciclo de cultivo las parcelas fueron manualmente cosechadas para obtener un valor preciso de rendimiento para cada variedad. La segunda parcela experimental, de 2 ha de superficie y sembrada con la variedad "LUBRICAN", estaba ubicada en los terrenos experimentales del centro IFAPA Alameda del Obispo de Córdoba. Adicionalmente, se tomaron tres muestras de biomasa de 0.25 m^2 cada día de medida para cuantificar su evolución a lo largo del ciclo de cultivo en esta parcela. Al final del ciclo se cosechó mecánicamente la parcela para conocer su producción.

A partir de las medidas de reflectividad de todas las parcelas experimentales se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) usando los valores de reflectividad medidos en los intervalos espectrales de los sensores TM y ETM+. Se obtuvieron relaciones empíricas entre los parámetros biofísicos FPAR y LAI y los anteriores índices de vegetación (IV). La tabla 1 muestra los días de medida y el sensor utilizado en esta parcela.

Parcelas comerciales

Se seleccionaron 53 parcelas de trigo (Fig 1) en 2007/08 y 2008/09 en la zona de Santaella (Córdoba) pertenecientes a la zona regable del Genil-Cabra. Estas parcelas tenían tamaño suficiente para realizar su seguimiento con los sensores TM y ETM+ instalados a bordo de los satélites Landsat 5 y 7, respectivamente. Todas las imágenes de 2008 y 2009 despejadas de nubes fueron procesadas (corregidas geométrica y atmosféricamente). Se construyeron mapas de NDVI a partir de las reflectividades de las bandas 3 y 4 de estos satélites. A partir del NDVI se calcularon mapas de fPAR y LAI utilizando las relaciones entre NDVI-fPAR y NDVI-LAI obtenidas en las parcelas experimentales. Finalmente los agricultores suministraron la cosecha de cada parcela. La tabla 1 muestra las imágenes usadas en este estudio en ambos años.

USO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE COSECHA

Relaciones empíricas sencillas entre IV y cosecha

Usando las 31 variedades de la parcela experimental de Cañete de las Torres se calcularon relaciones experimentales entre los IV y la cosecha final medida en campo para todos los días con medidas radiométricas disponibles.

Uso de IV para estimar parámetros biofísicos usados como variables de entrada en modelos de estimación de cosecha

En este caso se usaron los IV para obtener parámetros biofísicos que se usan como variables de entrada en el modelo de estimación de biomasa de Monteith (basado en el cálculo de la fPAR) (Monteith 1972) y en el modelo GRAMI (basado en la estimación del LAI) (Maas 1993). Los datos de las parcelas experimentales se usaron para calibrar ambos modelos, adaptándolos a las condiciones del sur de España.

Parcelas comerciales				**Parcelas experimentales**			
Santaella (2008)		Santaella (2009)		Cañete de las Torres (2009)		Córdoba (2009)	
DOY	Sensor	DOY	Sensor	DOY	Sensor	DOY	Sensor
350	ETM+	345	TM	49	Radiómetro-ASD	43	Radiómetro-ASD
65	ETM+	11	TM	72	Radiómetro-ASD	56	Radiómetro-ASD
105	TM	43	TM	85	Radiómetro-ASD	71	Radiómetro-ASD
122	Awifs	67	ETM+	98	Radiómetro-ASD	78	Radiómetro-ASD
177	ETM+	123	TM	112	Radiómetro-ASD	96	Radiómetro-ASD
		147	ETM+	124	Radiómetro-ASD	113	Radiómetro-ASD
				138	Radiómetro-ASD	125	Radiómetro-ASD
				168	Radiómetro-ASD	139	Radiómetro-ASD

Tabla 1: Fecha y sensores utilizados

Los parámetros de eficiencia en el uso de la luz (ε), e índice de cosecha (IC) fueron ajustados para el modelo de Monteith usando las cosechas conocidas de todas las variedades ensayadas.

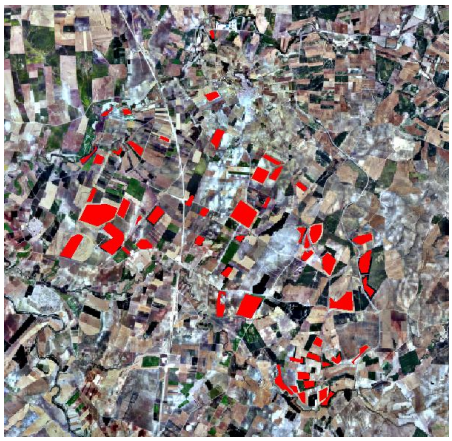


Figura 1: Distribución de las 53 parcelas de trigo de la campaña 2007/08 seleccionadas en este estudio.

En el caso del modelo GRAMI además de ε, se determinaron los grados días necesarios para alcanzar la emergencia, floración y madurez del trigo y se calibró el factor de partición que representa el porcentaje de biomasa que se acumula en forma de cosecha durante el llenado de grano. Una vez estaban adaptados los modelos se ejecutaron para las parcelas comerciales usando los valores de fPAR y LAI obtenidos a partir de los IV derivados de las imágenes.

Estimación de cosecha usando valores de evapotranspiración calculados a partir de coeficientes de cultivo derivados de IV

La última metodología empleada utiliza los IVs para estimar el coeficiente de cultivo basal del modelo FAO de requerimientos hídricos de los cultivos. Algunas relaciones entre IV y Kc han sido descritas por varios autores y se usan actualmente para el cálculo de necesidades de agua de los cultivos regados. Estos coeficientes de cultivos pueden integrarse en un modelo de balance de agua que permite cuantificar la evapotranspiración real del cultivo y que sirve de variable de entrada en el modelo propuesto por FAO (Doorenbos et al. 1979) para cuantificar el efecto del estrés hídrico sobre la cosecha.

RESULTADOS

Relaciones empíricas sencillas entre IV y cosecha

Ambos índices (NDVI y SAVI) presentaron un comportamiento similar. Se observó una relación positiva entre IV y cosecha usando las medidas realizadas en el mes de marzo y primera quincena de abril. Durante este periodo se alcanzaron coeficientes de determinación cercanos a 0.5, lo que indica que los IV en esta fecha explican aproximadamente el 50 % de la varianza de la producción. Medidas anteriores y posteriores a esas fechas no presentan relación significativa entre IV y cosecha. Relaciones similares en determinados momentos del ciclo del cultivo fueron descritas en trigo y en soja (Ma et al. 2001). Con este tipo de relaciones y utilizándolas en los meses indicados se puede predecir la cosecha con un error medio cuadrático, RMSE, igual a 550 kg/ha. Sin embargo estás relaciones empíricas no pueden ser extrapoladas a otras localizaciones por lo que su uso para discriminar genotipos en programa de mejora genética es reducido.

Uso de IV para estimar parámetros biofísicos empleados como variables de entrada en modelos de estimación de cosecha

Los índices de vegetación han demostrado su utilidad para estimar parámetros biofísicos que pueden ser usados como variables de entradas en modelos de estimación de cosecha. Los dos modelos probados, usados en combinación con las estimaciones de fPAR o LAI, han demostrado una mayor precisión en la estimación de cosecha bajo condiciones experimentales. En el experimento de Cañete de las Torres estas estimaciones presentaron RMSEs de 577 y 523 kg/ha respectivamente usando el modelo de Monteith combinado con un índice de cosecha y el modelo GRAMI. La estimación de cosecha resultante de la aplicación del modelo GRAMI a las 31 variedades del experimento de Cañete y a las 53 parcelas comerciales del 2009 se presenta en la figura 2.

En ambos modelos el error en la estimación aumentó cuando se realizaron estimaciones de cosecha de las parcelas comerciales en 2008 y 2009. La aplicación del modelo de Monteith presentó un RMSE de 930 y 790 kg/ha en 2008 y 2009 mientras que los errores obtenidos con el modelo GRAMI estuvieron cercanos a 1000 kg/ha en ambas campañas. A pesar de que los errores aumentaron al aplicar los modelos a escala regional, ambos alcanzaron estimaciones

de los valores medios de cosecha reales (4191 y 4708 kg/ha en 2008 y 2009, respectivamente) con errores cercanos al 6 % en todos los casos. Por lo tanto los dos modelos parecen tener la habilidad de estimar cosecha con un aceptable grado de precisión, a pesar del desconocimiento de algunos factores de manejo del cultivo que potencialmente afectan a la precisión de estos modelos (fundamentalmente fecha de plantación y número de grados día para alcanzar emergencia, floración y maduración).

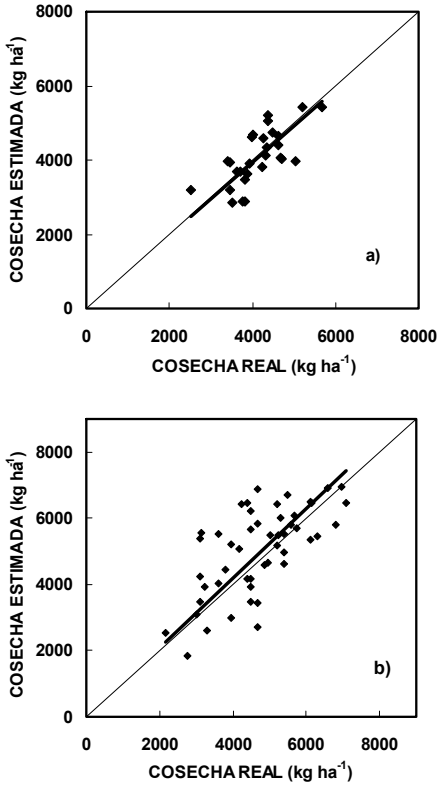


Figura 2: Relación entre cosecha real y estimada de las 31 variedades de la parcela experimental de Cañete de las Torres (a) y de las 53 parcelas comerciales de la zona de Santaella (b) usando el modelo GRAMI.

Estimación de cosecha usando valores de evapotranspiración calculados a partir de coeficientes de cultivo derivados de IV

Actualmente se está evaluando el funcionamiento del modelo propuesto por FAO para cuantificar el efecto del déficit hídrico usando valores de ET estimados con sensores remotos. Para ello, se está aplicando un modelo desarrollado en el Valle del Guadalquivir para el cálculo de ET de los cultivos con sensores remotos y validado con medidas de un sistema de covarianza de torbellinos. A pesar de no disponer aún de resultados definitivos, el estudio preliminar ha puesto de manifiesto la dificultad de disponer de toda la información requerida por este procedimiento a escala regional, lo que sin duda condicionará su uso a gran escala.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha constatado la utilidad de los IV en la estimación de cosecha de trigo en el sur de España. El uso de estos índices para la estimación de parámetros biofísicos que sirven de variables de entrada en modelos de estimación de cosecha es la metodología que presenta mejores resultados y mayores posibilidades de extrapolación a distintas zonas y años. La aplicación de estos modelos de forma regular sobre zonas extensas permitiría por un lado, mejorar las actuales estadísticas agrarias, proporcionando por otro, mapas de cultivo de parcelas individuales, de gran utilidad en las decisiones de manejo agrícola de agricultores y técnicos.

BIBLIOGRAFÍA

DOORENBOS, J. y KASSAM, A.H. 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage. Paper Nº 33. FAO, Rome.

MA, B.L., DWYER, L.M., COSTA, C., COBER, E.R. y M.J. Morrison. 2001. *Early Prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements*. Agronomy Journal, 93, 1227-1234.

MAAS, S.J. 1993. *Parameterized model of gramineous crop growth:I. Leaf area and dry mass simulation*. Agron. J. 85, 348-353.

MONTEITH, J.L. 1972. *Solar radiation and productivity in tropical ecosystems*. J. Appl. Ecol. 9,747-766.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del proyecto AGR-2317 de la CICE-Junta de Andalucía.

Estima de parámetros estructurales en cultivos herbáceos a partir de imágenes Landsat

M. Pla, L. Juarez, M. Pérez, G. Bota, D. Giralt y L. Brotons

CTFC. Centro Tecnológico Forestal de Catalunya. Carretera de Sant Llorenç, km 2. 25280 Solsona (Lleida). Tel: 973481752. E-mail: magda.pla@ctfc.cat

RESUMEN

La estructura de los cultivos herbáceos, concretamente la altura y el recubrimiento, es uno de los factores determinantes para la selección del hábitat de las aves esteparias. El objetivo principal del presente trabajo es obtener información continua de la altura y recubrimiento de los cultivos de la Plana de Lleida que pueda ser utilizada cómo variable de entrada en modelos de distribución espacial de aves esteparias. Para alcanzar este objetivo se han utilizado, por un lado, medidas realizadas en campo sobre la altura y el recubrimiento del año 2009. Por otro lado, a partir de imágenes Landsat-TM se han calculado los índices de vegetación NDVI, SAVI y EVI. A partir de dicha información se ha aplicado una regresión exponencial de crecimiento.

Los modelos de altura y recubrimiento de los cultivos herbáceos deben realizarse de manera específica para cada tipo de cultivo y para las distintas dotaciones hídricas que reciben (secano, regadío o regadío de soporte). Se han podido realizar modelos para el 2009 de cultivos de cebada en zonas de secano y regadío de soporte. Los modelos se han calibrado con el 70% de los datos seleccionados al azar y se ha testado con el 30% de puntos restantes. Los resultados de la regresión no muestran un coeficiente de regresión muy elevado pero el RMS calculado es aceptable. Se proponen mejoras en la obtención de los datos de campo para mejorar la información de base y los resultados de los modelos.

Palabras clave: altura cereales, recubrimiento, Landsat, índices vegetación, regresión exponencial, aves esteparias

ABSTRACT

The structure of arable crops, particularly the height and the cover is one of the determining factors for selection of steppe bird habitat. The main objective of this work is to obtain continuous maps of crops height and covers in the Plana de Lleida that can be used as input variables in models of spatial distribution of steppe birds. To achieve this goal have been used, on the one hand, field measurements on height and cover for the year 2009. On the other hand, vegetation indices NDVI, SAVI and EVI from Landsat images. Regression exponential growth has been applied to obtain height and cover crop maps.

The height and surface models for arable crops must be specifically for each type of crop and water management system (rainfed, irrigated or irrigated support). It has been possible to calculate models for the 2009 crop of barley in rainfed and support irrigated areas. The models are calibrated with 70% of randomly selected data and tested with 30% of remaining points. The regression results do not show a very high correlation coefficient but RMS is acceptable. Some improvements in the collection of field data to improve the results are proposed.

Keywords: *crop height, cover, Landsat, vegetation index, exponential regression, steppeland birds*

INTRODUCCIÓN

La estructura de los cultivos herbáceos es una variable ambiental fundamental para la conservación de algunas especies amenazadas tales como las aves esteparias que habitan la Plana de Lleida , al noreste de la Península Ibérica y en plena depresión del Ebro. Uno de los factores determinantes para la selección del hábitat de dichas aves en el momento de la reproducción y puesta es la altura de los cereales y el recubrimiento de la vegetación. Actualmente se están realizando diversos modelos de distribución de las especies basados en modelos del nicho ecológico que estiman la respuesta de una especie a unas determinadas condiciones ambientales (variables

ambientales) para obtener su probabilidad de aparición continua según una combinación particular de estas variables. En el caso de las aves esteparias, las variables que describen la estructura del hábitat son las que poseen un mejor poder predicción. Los modelos de distribución de especies se están utilizando cómo información de soporte en la toma de decisiones, por ejemplo: para la delimitar las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Algunas fuentes bibliográficas utilizan índices de vegetación, especialmente el NDVI para relacionarlos con parámetros estructurales de la vegetación. Las mismas fuentes también describen las limitaciones metodológicas a la hora de estimar la altura o recubrimiento directamente a partir del NDVI por el efecto de saturación que sufre, donde a partir de ciertas alturas de cereal el NDVI tiene un mismo valor. Además, la información procedente de sensores remotos de media resolución también tiene algunas limitaciones a nivel de resolución espacial y temporal. Los mejores resultados provienen de algunos trabajos de agricultura de precisión realizados a partir de sensores aerotransportados hiperespectrales como CASI otros sensores a bordo de aviones no tripulados (UAV). El uso de estos sensores implica una inversión económica importante. Así pues, se han utilizado en zonas de cultivos como la viña u otros cultivos arbolados con un valor productivo muy elevado que compensa el coste de los trabajos. Sin embargo existen algunos trabajos realizados a partir de imágenes satélite de resolución media como el Landsat (Anderson, 2004) con resultados muy óptimos para cultivos no de soja y maíz.

DATOS DE PARTIDA

La zona de estudio es la zona de cultivos cerealistas de secano y riego de apoyo de la Plana de Lleida, al noreste de la Península Ibérica y en plena depresión del Ebro.

El trabajo de campo se realizaba en el marco de otros trabajos relacionados con la conservación de aves esteparias y, por tanto, tal y como se comentará más adelante no cumplen exactamente los requerimientos de precisión necesarios que serían más idóneos para estimar la altura y recubrimiento de cultivos. La información estructural recogida era, en general, una información complementaria para los estudios en los que se enmarcaba su recogida.

En rasgos generales, se han realizado transectos de muestreo de aves, dentro de los cuáles se seleccionaba al azar un máximo de 5 parcelas de cereal dentro del buffer de 100 m del transecto. En cada una de estas parcelas se situaban 3 puntos al azar donde se medía la altura del cereal total y el recubrimiento, entendiendo cómo recubrimiento el porcentaje de superficie ocupado por el cultivo así cómo sus hojas, tallos etc. La altura se medía a través de una cinta métrica y el recubrimiento se informaba de manera subjetiva en porcentajes.

Cómo que no se disponía de la coordenada exacta de la toma de muestras, se ha trabajado a partir de la base cartográfica del SIGPAC enriquecida con información de la DUN. Para cada uno de los recintos muestreados se obtiene el valor promedio de altura y recubrimiento calculado en campo.

A nivel de imágenes satélite la imagen más cercana al trabajo de campo y libre de nubes es del 30 de Mayo del 2009. La imagen Landsat TM se ha obtenido del Departamento de Medio Ambiente y Vivienda de la Generalidad de Cataluña, corregida geométricamente por el Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Barcelona (Cristóbal et al, 2004 y Pons et al, 2005) siguiendo el método Palà & Pons (1995). Posteriormente se ha corregido radiométricamente (Pons & Solé-Sugrañes, 1994). Se han calculado los índices de vegetación NDVI, SAVI y EVI y se han calculado las medias de los índices de vegetación para cada una de las parcelas muestreadas a partir de la cartografía del SIGPAC. Para evitar el efecto del borde de las parcelas previamente se ha erosionado la parcela 10m hacia el interior y se ha calculado la media de los píxeles de la parcela sin éste borde.

Los datos de campo correspondían a mayo del 2009. A lo largo del mes de Mayo el cereal alcanza su altura màxima, la espiga empieza a decantarse y el cereal empieza a amarillear. En la zona de estudio existen algunas diferencias significativas en cuanto las fechas que empiezan a amarillear y secarse (las zonas de más al sudoeste a finales de mayo ya están amarillas mientras que las zonas del este y nor-este a finales de mayo aún están verdes). Así pues, para tener información lo más cercana a la imagen Landsat se ha utilizado la información de campo a partir del día 25 de Mayo, que a su vez correspondía con los datos de campo en que los recinto aún se encontraban de color verde.

MODELIZACIÓN

Los modelos de regresión exponencial de crecimiento tienen la forma descrita en la Ecuación 1:

$$Y = c + EXP(b0 + b1 * x1 + b2 * x2 \dots bn * xn) \quad (1)$$

donde:
Y=Variable independiente (altura o recubrimiento)
c,b0,b1, b2…n= coeficientes
X1, x2…xn=variables independientes (índices de vegetación)

Así pues, a partir de los datos de campo y la información promedio de los diferentes índices de vegetación para cada uno de los recintos con información de campo se aplicará un modelo exponencial de crecimiento típico descrito en el mismo programa estadístico (STATISTICA). La variable independiente es la altura o el recubrimiento y las variables dependientes son los 3 índices de vegetación.

En el presente estudio se disponía de una muestra suficiente de parcelas de cebada. Se ha calibrado el modelo con el 70% de los datos seleccionados al azar obteniendo un R en el ajuste y los resultados se han testado a partir del 30% de datos restantes no utilizadas en la calibración (o ajuste). A partir de los resultados esperados y observados en este 30% de datos de test se ha calculado el error mínimo cuadrático medido (RMS) en centímetros (altura) o % (recubrimiento).

RESULTADOS

Los resultados de la regresión exponencial de crecimiento (Tabla 1) de la cebada tienen, en general, el valor R de la regresión bajo, excepto para el caso de la altura en riego de apoyo que es 0,61. En todos los casos se puede explicar un % de variancia por debajo del 20%. El error cuadrático medio medido es bastante aceptable.

	Dotación de agua	R-ajuste	Var. explicada	RMS test
Altura	S (n=85)	0,39	14,87	10,63 cm
	RS (n=23)	0,61	37,59	4,57 cm
Recubrimiento	S	0,31	9,87	14,22 %
	RS	0,32	10,39	30,63 %

Tabla 1: Resultado de la regresión exponencial de crecimiento para el caso de la Cebada en 2009. (R=regadío, RS=Regadío de Soporte)

A partir de los resultados obtenidos se ha hecho una prospección muy detallada de los datos de partida y se han detectado parcelas con valores de altura y recubrimiento muy similares pero con valores de los índices de vegetación muy distintos. Se cree que puede ser debido a una falta de precisión en la toma la información.

Cartografía de altura y recubrimiento de cereales

A partir de la cartografía del SIGPAC enriquecida con datos de la DUN 2009 se han seleccionado las parcelas de cebada y a partir de los límites conocidos de los cultivos de secano se han seleccionado los recintos de cebada de secano y los recintos de regadío de apoyo. Para cada uno de los recintos también se ha erosionado el borde 10m para calcular el valor promedio de cada uno de los índices de vegetación por parcela utilizando los píxeles más puros. Se ha proyectado el modelo exponencial de crecimiento utilizando los coeficientes obtenidos en el análisis con el programa estadístico con el 100% de los datos. El resultado, se ha proyectado en el recinto completo (sin la erosión de los 10 m).

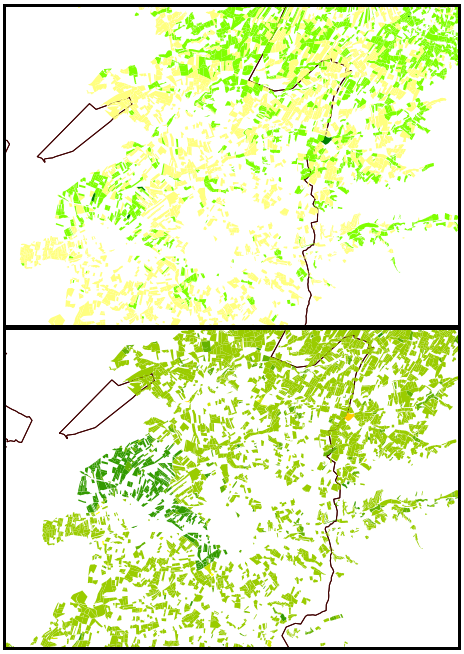


Figura 1: Modelos de altura (arriba) y recubrimiento (abajo) de la cebada en 2009 en la Plana de Lleida.

En la cartografía resultante se aprecia, especialmente en el modelo de recubrimiento una zona con valores ligeramente más altos. Esta zona corresponde a una zona de regadío de soporte.

CONCLUSIONES

A grandes rasgos podríamos concluir que la utilización de Imágenes Landsat combinadas con la cartografía del SIGPAC y la DUN para la modelización de alturas y recubrimiento de cultivos cerealistas supone una alternativa sencilla y económica en comparación a otros métodos de obtención de datos remotas (sensores aerotransportados, etc.). La resolución espacial de las imágenes Landsat es suficiente para tratar cultivos cerealistas de la Plana de Lleida. La metodología de modelos de exponenciales de crecimiento es fácil de implementar y permite incluir información de más de un índice de vegetación, así se puede contrarrestar las limitaciones de utilizar sólo uno. A su vez, las diferencias observadas en la altura y el recubrimiento de la zona de riego de apoyo puede ser útil para delimitar la zona de riego de apoyo real.

Sin embargo, conviene destacar que debe mejorarse el trabajo de campo. Una de las mejoras a implementar sería medir el recubrimiento siguiendo una metodología objetiva cómo podría ser la medida de la PAR o la propia LAI. También sería necesario recoger el punto exacto de la toma de datos para evitar trabajar con promedios de parcela. También sería preferible que los datos se tomaran en el mismo día de paso del satélite así cómo modelizar zonas homogéneas a nivel de maduración del cereal.

Cabe remarcar que dicho trabajo ha supuesto un punto de partida en el que se reutilizaba información de campo existente proveniente de otros trabajos realizados en la zona y ha sido de gran utilidad para ensayar nuevas aproximaciones que se han realizado a lo largo del 2011.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, M.C., U. NEALE, C. M, LIC, F., NORMAN, J. M., KUSTAS, W. P., JAYANTHI, H. & CHAVEZ, J.. 2004. *Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery*. Remote Sensing of Environment 92, 447–464

CRIST, P., CICONE, C. 1984. *A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data: The TM Tasseled Cap.* Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Volume GE-22, Issue 3, Page(s):256 – 263

DOMINGO, C., CRISTÓBAL, J., NINYEROLA, M. I PONS, X. 2009. *Pautas de estrés hídrico en zonas forestales de cataluña: una aproximación metodológica para su detección mediante imágenes landsat y terra-modis. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud 2009. Publicado en: Montesinos, S. y Fernández L. (eds.)* "TELEDETECCIÓN. Agua y Desarrollo Sostenible". Universidad de Zaragoza, pp. 321-324. ISBN: 978-84-613-4257-0

PONS, X. Y SOLÉ-SUGRAÑES, L. 1994. *A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data.* Remote Sensing of Environment, Vol. 47,pp. 1-14.

Servidor d'imatges satèl•lit Landsat Catalunya: SATCAT. Documentació del Departament de Medi Ambient i habitatge http://mediambient.gencat.net/Images/43_35835.pdf

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todas las personas que han participado en el trabajo de campo y a Jordi Cristóbal por sus buenos consejos.

Correlación de variables fisiologicas en frutales mediante técnicas de agricultura de precisión

P. Pérez-Cutillas[1], J.J. Alarcón [2], M. Erena[1], I. Baños [1] y D. Sanchez[1]

[1] Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA). C/ Mayor, s/n, 30150 La Alberca, Murcia (España)

[2] Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS). Campus Universitario de Espinardo. 30100, Murcia (España).

RESUMEN

Este estudio se enmarca dentro de las investigaciones llevadas a cabo en parcelas experimentales de diferentes Centros de investigación (IMIDA, CEBAS, UPCT y IVIA) que forman parte del proyecto TELERIEG, con el objetivo de perfeccionar los métodos de riego en los cultivos de regadío de la Región de Murcia, contribuyendo de manera notable a la gestión de la sequía. El trabajo se realizó en una parcela de melocotonero en donde se aplicaron varios tratamientos de riego diferentes, lo que generó distinto grado de déficit hídrico en los árboles estudiados. Esta variabilidad en la situación hídrica de los árboles fue medida en superficie por medio del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψs), y desde el aire por medio de la captación de imágenes medidas con una cámara multiesprectal que permitieron estimar los valores del espectro infrarrojo cercano (NIR) y del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los tres índices fueron sensibles al grado de déficit hídrico generado en los árboles y presentaron significativos valores de correlación cuando fueron comparados dos a dos.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Teledetección, Sequía, Relaciones hídricas, Cultivos Frutales

ABSTRACT

This work is part of the ongoing research being carried out in experimental plots from several research centres (IMIDA, CEBAS, UPCT and IVIA) as part of the project TELERIEG, with the aim of improving irrigation methods used in agriculture in the region of Murcia, contributing significantly to better drought management. Research focused on a peach orchard where different irrigation treatments were applied, inducing different degree of water stress in the trees. This water status variability was measured at field level by the use of stem water potential at midday (Ψs), and from the air by the estimation of two parameters related to the analysis of high-resolution near-infrared images (NIR and NDVI). The three parameters were sensitive to water stress induced in the trees, and they show a high correlation.

Keywords: *Precision farming, Remote sensing, Drought, Water relations, Fruit Crops*

INTRODUCCIÓN

La agricultura tradicionalmente se ha visto influenciada por los distintos elementos climáticos, siendo la sequía uno de los que más afecta de forma negativa a la producción y la calidad de los productos agrícolas, especialmente en el sureste peninsular que se caracteriza por la existencia de un clima semiárido. Por tanto, la escasez de agua para la agricultura en esta zona de elevada producción provoca periódicamente elevadas pérdidas que afectan de manera notable a la economía.

En los últimos años se ha producido un desarrollo de los sistemas de teledetección por medio de la aparición de nuevos sensores, con mayores y mejores prestaciones, que han ayudado a la mejora de los estudios realizados sobre coberturas de la superficie terrestre. En el ámbito agrícola, estas herramientas han contribuido al avance de la agricultura de precisión, mejorando los aspectos agronómicos, reduciendo los impactos ambientales vinculados a la actividad agrícola y optimizando los costes de producción.

En el presente estudio, utilizando la información obtenida a partir de imágenes de alta resolución, se pretende correlacionar los datos multiespectrales de las imágenes obtenidas por el sensor ADS40 con los valores obtenidos en campo para la caracterización del estado fisiológico de la planta, de modo que podamos profundizar en el conocimiento de las relaciones existentes entre ambas fuentes de información.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los resultados de este trabajo se centran en una parcela enmarcada, junto con otros ensayos realizados en diferentes parcelas experimentales, dentro del proyecto SUDOE - Telerieg (Figura 1) .

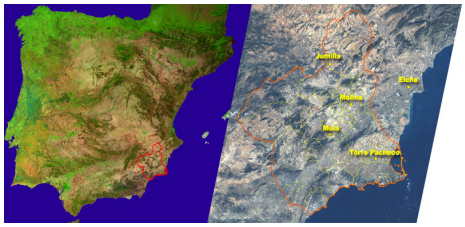
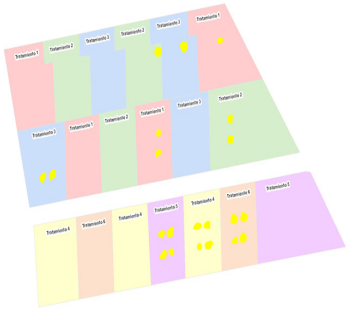


Figura 1: Parcelas experimentales controladas en el marco del Proyecto SUDOE-Telerieg.

El ensayo fue llevado a cabo en una finca comercial situada en Fuente Librilla, Mula (Murcia), sobre melocotoneros adultos (Prunus persica L. cv. 'Catherine') injertados sobre patrón GF677, con un marco de plantación 6 x 4 m. Se aplicó riego por goteo, utilizándose un único lateral de riego por fila de árboles, con cinco goteros por planta, que arrojaban un caudal de 4 l h-1.

La parcela experimental se dividió equitativamente en cinco tratamientos de riego: un tratamiento de riego control (C), que se regó satisfaciendo los requerimientos hídricos del cultivo (100% ETc), y cuatro tratamientos de riego deficitario controlado (RDC) que recibieron respectivamente el 70%, 60% 50% y 40% de agua que el tratamiento control. Este período de RDC estuvo comprendido entre el 5 Mayo al 10 Junio de 2009.

Para la realización del ensayo se controlaron específicamente 21 árboles distribuidos aleatoriamente entre los diferentes tratamientos de riego (Figura 2).



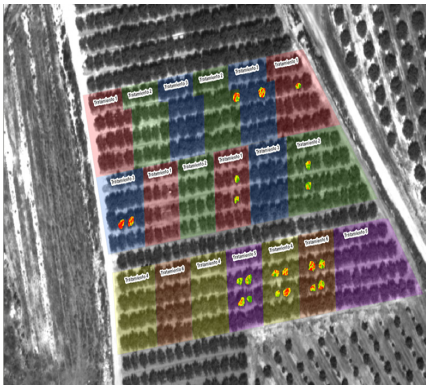


Figura 2: Distribución de tratamientos y árboles controlados en la parcela experimental. Diseño experimental y vista aérea.

En el desarrollo de este estudio, se han elaborado una serie de acciones centradas en la correlación de las variables fisiológicas obtenidas en campo y una serie de imágenes con información del infrarrojo cercano de alta resolución, obteniéndose unos valores que nos ayudan a automatizar tareas para conocer el estado hídrico de los árboles.

Para las medidas de la situación hídrica a nivel de parcela, se midió el potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψs) en hojas adultas, sanas y próximas al tronco envueltas en papel de aluminio y bolsa de plástico al menos dos horas antes de las medidas (3 por tratamiento), para ello se empleó la cámara de presión (Soil Moisture Equip. Corp., modelo 3000 Santa Barbara CA, USA), según las indicaciones de Hsiao (1990).

Para la obtención de las imágenes del área de estudio se ha utilizado la cámara multiespectral ADS40 transportada en un avión tipo Partenavia P68C, obteniéndose una resolución espacial para la imagen de 25 cm por píxel, una resolución radiométrica de 16 bits y una resolución espectral comprendida entre los 420 a los 900 nanómetros. Este vuelo se efectúo el día 14 de agosto de 2009, coincidiendo con la toma de datos en campo, realizada esa misma mañana.

La imposibilidad de obtener valores de reflectancia en el producto contratado, y por otro lado, el objetivo del proyecto centrado en un momento temporal concreto, nos obligó a utilizar los valores originales de la imagen. Por lo que los datos analizados tanto en los algoritmos realizados para la obtención de los Índices de Vegetación utilizados en este estudio, así como los procesos estadísticos realizados, han sido a partir de los niveles digitales (ND) de las imágenes originales captadas por el sensor.

Una vez recibidas las imágenes se procedió a su análisis exhaustivo con herramientas SIG para la obtención de los datos pertenecientes al infrarrojo. Para ello, se localizaron en la imagen todos los árboles controlados con la ayuda de las coordenadas tomadas en campo por GPS. Seguidamente se digitalizó el perímetro de todos los individuos para generar unas "mascaras" de corte, pero previamente se realizó una eliminación de los pixeles exteriores con el fin de minimizar el efecto borde y dejar fuera de los análisis los posibles "ruidos" que pudieran producir la "línea de suelo", es decir, valores o información que no se correspondan estrictamente con lo que realmente buscábamos en los árboles en estudio.

Con estos elementos "mascaras", mejor definidos, se inició el proceso de extracción de los datos del espectro infrarrojo cercano (NIR) y la estima del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) (Lychak, O et al. 2000), pertenecientes a las imágenes captadas.

RESULTADOS

En una primera fase se aplicaron técnicas de análisis SIG con la finalidad de extraer los datos espectrales proporcionados por las imágenes, concretando los árboles en estudio como unidad referencial de cotejo para los datos medidos en campo.

En la segunda fase del trabajo, se realizaron una serie de análisis estadísticos utilizando dos programas informáticos específicos: SPSS bajo sistema Windows; y Software R aplicado en el sistema operativo LINUX.

Los resultados obtenidos de dichos análisis son recogidos a continuación:

Realizando la prueba de Mann-Whitney , se contrastaron diferencias entre los dos tipos de aportes hídricos que resultaron significativas entre los dos tipos de aportes hídricos (control y deficitarios) (Andy Field. 2009), para las variables potencial hídrico en tallo (Ψs), valores del infrarrojo cercano (NIR), y para el índice de diferencia normalizada (NDVI). De este análisis han resultado significativas las diferencias para todas las variables consideradas (Ψs, NIR, NDVI):

Ψs: U=0.00 p<0.05,
NIR: U=12.00, p=0.002,
NDVI: U=13.00, p=0.002)

	Ψs	NIR	NDVI
U de Mann-Whitney	,0	12,0	13,0
W de Wilcoxon	66,0	67,0	68,0
Z	3,87	3,02	,95
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,002	,003
Sig. exacta (bilateral)	**,000**	**,002**	**,002**
Sig. exacta (unilateral)	,000	,001	,001
Probabilidad en el punto	,000	,000	,000

Tabla 1: Resultados de prueba de Mann-Whitney

En la tabla de correlaciones se han encontrado correlaciones significativas entre Ψs y NIR, con una correlación de tipo medio (r=0.61), y de Ψs y NVDI, con una correlación alta (r=0.746). Existió también una correlación alta entre NIR y NDVI (r=0.752), pero en este caso dicha correlación era esperada, ya que ambas variables están basadas en datos de infrarrojo cercano.

		Ψs	NIR	NDVI
Ψ_s	Corr. Pearson	1	**,610****	**,746****
	Signif.		,003	,000
	N	21	21	21
NIR	Corr. de Pearson	**,610****	1	**,752****
	Signif.	,003		,000
	N	21	21	21
NDVI	Corr. de Pearson	**,746****	**,752****	1
	Signif.	,000	,000	
	N	21	21	21

Tabla 2: Tabla de correlaciones entre distintos parámetros. ** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

CONCLUSIONES

(1) La variabilidad en la situación hídrica de los árboles, generada ante distintos aportes de agua mediante un riego diferenciado, fue medida en superficie por medio del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψs), y desde el aire por medio de la captación de imágenes medidas con una cámara multiespectral que permitieron estimar los valores del espectro infrarrojo cercano (NIR) y del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

(2) Los tres índices considerados fueron sensibles al grado de déficit hídrico generado en los árboles, según los análisis estadísticos llevados a cabo por medio de la prueba de Mann-Whitney y considerando las diferencias existentes entre árboles control y deficitarios.

(3) Los tres índices considerados presentaron significativos valores de correlación cuando fueron comparados dos a dos. La mejor correlación surgió entre los dos parámetros obtenidos a partir de los análisis de datos multiespectrales (NIR y NVDI), mientras que el potencial hídrico de tallo (Ψs) presentó una mejor correlación con NVDI que con NIR.

BIBLIOGRAFÍA

HSIAO, T.C. 1990. *Measurements of plants water status. In: Irrigation of Agricultural Crops (Stewart, B.A., Nielsen, D.R., eds.). Agronomy Monograph nº 30, pp: 243-279.* Published by ASA, CSSA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

LYCHAK, O; JAREMY, M (2000) *"Influence of possible ways of remote sensing data and digital data nonlinear transformation on the results of unsupervised classification",* Conference on Applications of Digital Image Processing XXIII. San Diego, EE.UU.

ANDY FIELD , (2009). *Discovering Statistics Using SPSS (Introducing Statistical Methods S.)* Sage Publications Ltd.

AGRADECIMIENTOS

Este ensayo ha sido financiado por el proyecto EU del programa SUDOE Telerieg-SOE1/P2/E082.

Extracción automática de información de imágenes de alta resolución para el cálculo de necesidades hídricas en parcelas de cultivos arbóreos

J. A. Recio[1], L. A. Ruiz[1], M. Erena[2], D. S. Intrigliolo[3], T. Hermosilla[2], P. Pérez[3], M. A. Jiménez[3] y J.L. Gil-Yepes[1]

[1] Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección (CGAT). Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España). Correo electrónico: jrecio@cgf.upv.es

[2] Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario (IMIDA). 30150 La Alberca (Murcia, España).

[3] Instituto Valenciano de Investigación Agraria (IVIA). Apartado Oficial 46113, Moncada (Valencia, España)

RESUMEN

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto Telerieg (SOE1/P2/E082), sobre el uso de la teledetección para la recomendación y seguimiento de las prácticas de riego en el espacio SUDOE, y en él se presentan una serie de métodos para la extracción automática de parámetros útiles para el cálculo de las necesidades hídricas de cultivos arbóreos empleando imágenes multiespectrales de alta resolución espacial mediante técnicas de análisis por parcela. Así, tras clasificar cada parcela según su tipología, se extraen automáticamente el número de árboles por parcela y su posición, las dimensiones del marco de plantación y la superficie sombreada. El proceso es automático, tomando como datos de entrada las ortoimágenes y el parcelario de una base de datos cartográfica. La metodología presentada resulta consistente mostrando un alto nivel de fiabilidad en cítricos jóvenes e independientes, y medio en el caso de árboles alineados.

Palabras clave: Eficiencia de riego, coeficiente de sombreamiento, análisis de imágenes orientado a objetos, detección de árboles, imágenes de alta resolución, Telerieg.

ABSTRACT

This work is part of the Telerieg project (SOE1/P2/E082) and analyses the use of remote sensing for irrigation management in SUDOE space. A set of methods for extracting useful parameters for estimating water needs in tree crops are presented. These methods are based on parcel-based image analysis of high resolution multispectral images. Firstly, each parcel is classified in a crop typology. Secondly, the amount of trees and their location are automatically extracted, jointly with the sizes of planting patterns and the shadowing area. These automatic processes use orthoimages and a vectorial cartography of agricultural parcels as input data. The proposed methodology is solid and consistent, showing a high accuracy level for young and isolated trees, and a medium performance in the case of aligned citrus orchards.

Keywords: *Irrigation efficiency, shadowing coefficient, object-based image analysis, tree detection, high resolution images, Telerieg.*

INTRODUCCIÓN

El manejo eficiente del riego es un aspecto clave para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos. La teledetección permite estimar de forma generalizada determinados parámetros a partir de imágenes de baja y media resolución, como por ejemplo, la evapotranspiración potencial. En algunos cultivos arbóreos, como es el caso de los olivos (García Torres, et al., 2008) o los cítricos, se viene incorporando el coeficiente de sombreamiento para el cálculo de las necesidades hídricas, normalmente estimado en función de la edad y el tipo de plantación. En este trabajo se presentan una serie de métodos para la extracción automática de parámetros útiles para el cálculo de las necesidades hídricas de cultivos arbóreos empleando imágenes multiespectrales de alta resolución espacial (0,5 metros/píxel) mediante técnicas de análisis por parcela. Tras clasificar cada parcela según su tipología, se extraen el número de árboles por parcela y su posición, el marco de plantación y la superficie sombreada.

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA

Se ha trabajado utilizando datos adquiridos en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Se emplearon ortofotos digitales adquiridas en el año 2006 con una resolución espacial de 0,5 m/píxel, y tres bandas espectrales (IR, R, G). Los datos LiDAR fueron adquiridos en agosto del 2009 con una densidad de 0,5 puntos/m^2.

A efectos de clasificación y evaluación, se han definido tres tipologías de parcelas citrícolas en el término municipal de Llíria (Valencia): Árboles independientes, árboles jóvenes y árboles alineados; estando cada tipología representada por 84, 89 y 87 parcelas respectivamente, ocupando una superficie de 226 ha.

METODOLOGÍA

Clasificación de parcelas citrícolas por tipologías de cultivos

Se ha seguido una metodología de clasificación orientada a objeto. En primer lugar, se segmentó la imagen según los límites de las parcelas contenidos en la cartografía catastral. A continuación se procedió a la extracción de características espectrales, de textura, estructurales y de altura, empleando el software de extracción de características agrícolas FETEX 2.0 (Ruiz et al., 2011). La clasificación de las parcelas se realizó empleando árboles de decisión generados con el algoritmo C5.0. Para aumentar la precisión de las clasificaciones se ha empleado el método multiclasificador *boosting*.

Extracción de parámetros

En la Figura 1 se muestra la metodología desarrollada. En primer lugar, se genera una máscara de la superficie cubierta por árboles tras la clasificación no supervisada en las clases *árbol* y *no árbol*, a partir de muestras de aprendizaje adquiridas automáticamente para cada parcela, según se describe en Recio et al. (2009). Como resultado se obtiene la **superficie sombreada** por vegetación arbórea.

A partir de la imagen binaria resultante de la segmentación y mediante operaciones morfológicas, se individualizan los árboles existentes en la parcela y se obtienen sus centroides con los que se realizan las operaciones de detección, localización y conteo de árboles.

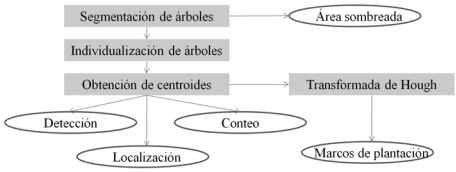


Figura 1: Procedimiento metodológico

El término **detección** hace referencia a la fiabilidad del método en encontrar los árboles reales. La evaluación de la detección de los árboles se ha realizado calculando el factor de exceso y el factor de defecto (Ecuaciones 1 y 2). Para el cálculo de estos parámetros se utilizan los valores: positivo verdadero (TP), árboles reales que son automáticamente detectados; falso positivo (FP), árboles automáticamente detectados pero que no lo son; y falso negativo (FN), árboles reales que no son detectados. Por otra parte, el factor de exceso (FE) constituye una medida del error por exceso, esto es, se detectan incorrectamente árboles que no lo son, mientras que el factor de defecto (FD) indica el error de omisión cometido, esto es, aquellos árboles que no son detectados como tales:

$$FE = \frac{FP}{TP} \qquad (1) \qquad\qquad FD = \frac{FN}{TP} \qquad (2)$$

Por su parte, el término **localización** hace referencia a la precisión del método en ubicar correctamente los árboles en su posición real. Para cada árbol delineado manualmente se obtuvo la distancia al árbol detectado más próximo siempre que esta distancia sea inferior a un umbral. El valor asignado a cada parcela es la distancia media de los árboles delineados que contiene.

El error en el **conteo** de árboles se obtuvo calculando la diferencia entre el número de árboles estimados automáticamente y el de referencia (determinado mediante fotointerpretación), dividido entre el número de referencia (Ecuación 3):

$$Tasa\ de\ error = 100 \cdot \frac{N_{estimado} - N_{referencia}}{N_{referencia}} \qquad (3)$$

Las dimensiones de los **marcos de plantación** se calcularon aplicando la transformada de Hough sobre los centroides de los árboles detectados. Se transforman las coordenadas de la imagen desde el sistema cartesiano a un sistema de coordenadas polares en el que se hallan las direcciones más frecuentes y las distancias entre

las rectas en esas direcciones (Figura 2) que corresponden con el tamaño del marco de plantación.

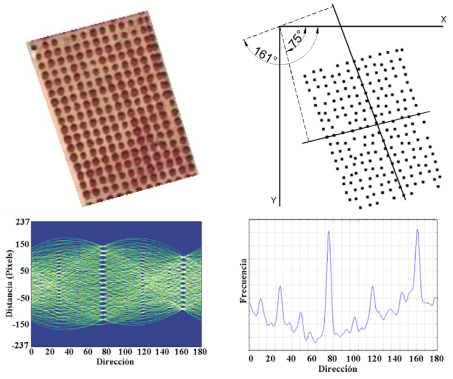


Figura 2: Obtención de las direcciones principales del marco de plantación (Fuente: Ruiz et al., en prensa).

En la evaluación de las zonas sombreadas, además del factor de exceso y de defecto se han utilizado otros índices: el porcentaje de detección (PD) denota el porcentaje de superficie de árboles reales correctamente detectado (Ecuación 4), mientras que el porcentaje de calidad (PC) informa sobre la calidad global de la detección y localización (Ecuación 5). Se trata de la medida más estricta, puesto que para la obtención de un 100% de calidad, el algoritmo debería detectar correctamente toda superficie sombreada (FN = 0), sin incluir ningún pixel que no pertenezca a esta clase (FP = 0):

$$PD = 100\frac{TP}{TP+FN} \quad (4) \qquad PC = 100\frac{TP}{TP+FP+FN} \quad (5)$$

RESULTADOS

Clasificación de parcelas citrícolas por tipologías de cultivos

La evaluación de la clasificación se realizó mediante validación cruzada, realizando tantas iteraciones como muestras disponibles y utilizando en cada iteración una única muestra como conjunto de evaluación y el resto como muestras de entrenamiento.

Las parcelas se clasificaron con una fiabilidad global del 96,5% (ver Tabla 1), mientras que las fiabilidades de usuario y productor fueron en todos los casos superiores al 92%. La confusión principal entre clases se produjo entre los árboles independientes y los árboles alineados.

Extracción de parámetros

Los valores de evaluación de la **detección** de árboles individuales (Tabla 2) indican que los mejores resultados se producen para la clase de árboles independientes, que presenta un ligero factor de exceso. Un factor de exceso similar presenta la clase árboles alineados, que presenta el mayor de los factores de defecto medio. El caso contrario se produce para la clase árboles jóvenes, con un factor de exceso alto y un factor de defecto muy bajo.

		Referencia			
		Árboles jóvenes	Árboles indepen.	Árboles alineados	**Fiab. Usuar.**
Clasificación	Árboles jóvenes	87	2		**97,7**
	Árboles indepen.	2	78	1	**96,3**
	Árboles alineados		4	86	**95,5**
	Fiab. Produc.	**97,7**	**92,8**	**98,8**	**96,5**

Tabla 1: Matriz de confusión de la clasificación en tipologías de cultivos citrícolas.

	F. exceso	F. defecto
Árboles indepen.	0,050	0,007
Árboles alineados	0,055	0,198
Árboles jóvenes	0,172	0,026

Tabla 2: Resultados estadísticos globales de la detección de los árboles para las distintas tipologías de cultivo consideradas.

Los errores en la **localización** de árboles se muestran en la Tabla 3. Las parcelas de árboles independientes y árboles jóvenes presentan unos errores en torno a medio metro, que coincide con la resolución espacial de la imagen empleada. La clase árboles alineados presenta un error medio y una desviación típica superiores a las demás.

	μ(m)	σ(m)
Árboles jóvenes	0,51	0,31
Árboles indepen.	0,52	0,29
Árboles alineados	0,71	0,44

Tabla 3: Errores en la localización de árboles para las distintas tipologías de cultivo consideradas (expresados en metros).

Los resultados de la evaluación del **conteo** de árboles se presentan en la Figura 3. En la gráfica se observa cómo la mayor parte de las parcelas de la tipología árboles independientes tiene un error de sobre-detección inferior al 5%. Por su parte,

los árboles jóvenes y los alineados presentan errores mayores por exceso y por defecto, respectivamente.

En la Tabla 4 se presentan los errores en la estimación del **marco de plantación** según las dos direcciones principales en función del tipo de parcela analizada.

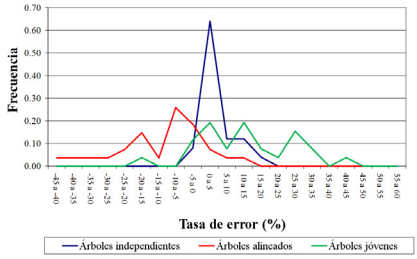


Figura 3. Resultados globales del conteo de número de árboles para las tres tipologías de cultivo consideradas.

El error se obtuvo calculando la diferencia entre la distancia media obtenida por fotointerpretación para cada una de las direcciones y la distancia obtenida automáticamente. En la mayor parte de los casos, los errores en ambas direcciones se encuentran por debajo de 0,5 m, siendo éste el tamaño del píxel de las imágenes utilizadas. Generalmente, estos errores presentan un signo positivo, lo que indica que existe una ligera subestimación del tamaño del marco de plantación.

	1ª Dirección		2ª Dirección	
	μ(m)	σ(m)	μ(m)	σ(m)
A. Jóvenes	0,29	0,23	0,29	0,22
A. Indepen.	0,24	0,18	0,14	0,09
A. Alineados	0,31	0,34	0,25	0,27

Tabla 4. Errores en la determinación de las dimensiones del marco de plantación para las tipologías de cultivo consideradas.

La Tabla 5 muestra los resultados relativos a la evaluación de la detección de la **superficie de sombreamiento**. Los mejores resultados se obtienen para los árboles alineados, cuyo porcentaje de calidad medio es superior al 90%, con una baja desviación típica. Los árboles independientes presentan también una alta tasa de aciertos, pero con una sobre-detección mayor, lo que reduce el porcentaje de calidad. La precisión en el caso de árboles jóvenes es menor, con un factor de exceso muy superior al resto de clases. Esto se debe a que el error en el perímetro de los árboles con relación a su superficie es mayor, por el menor tamaño de los árboles de esta clase.

	Árboles independ.		Árboles jóvenes		Árboles alineados	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
FE	0,15	0,10	0,29	0,19	0,06	0,04
FD	0,01	0,02	0,06	0,05	0,03	0,03
PD(%)	98,9	1,5	94,8	4,1	96,6	3,0
PC(%)	86,2	5,9	75,0	11,2	91,5	3,4

Tabla 5: Resultados estadísticos globales de la detección del área sombreada.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el potencial del análisis de imágenes de alta resolución para determinar parámetros agronómicos útiles para la gestión eficiente del riego. La metodología presentada resulta consistente, mostrando un alto nivel de fiabilidad en árboles jóvenes e independientes, y medio en el caso de árboles alineados.

BIBLIOGRAFÍA

GARCÍA TORRES,L., PEÑA BARRAGÁN, J.M., LÓPEZ-GRANADOS, F., JURADO-EXPÓSITO, M., FERNÁNDEZ-ESCOBAR, R., 2008. *Automatic assesment of agro-environmental indicators from remotely sensed images of tree orchards and its evaluation using olive plantations.* Computers and Electronics in Agriculture, 61, 179-191

RECIO, J.A., RUIZ, L.A., FERNÁNDEZ, A., HERMOSILLA, T., 2009. *Extracción de características estructurales en un sistema de clasificación de imágenes basado en parcelas.* XIII Congreso Nacional de la AET, 23-26 septiembre 2009, Calatayud, pp.577-580.

RUIZ, L.A., RECIO, J.A., FERNÁNDEZ-SARRÍA, A., HERMOSILLA, T., 2011. *A feature extraction software tool for agricultural object-based image analysis.* Computers and Electronics in Agriculture, 76(2), 284-296.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del programa SUDOE en el marco del Proyecto Telerieg SOE1/P2/E082.

Monitorización del suelo mediante reflectometría con señales de oportunidad GNSS

N. Rodriguez-Alvarez[1], E. Valencia[1], X. Bosch-Lluis[1], I. Ramos-Perez[1], H. Park[1] y A. Camps[1]

[1] Dept. de Teoria del Senyal i Comunicaions, Universitat Politècnica de Catalunya & IEEC CRAE/UPC
UPC Campus Nord, Edificio K2M, Lab-S104, 08034 Barcelona, Spain. E-mail: nereida@tsc.upc.edu

RESUMEN

Durante los últimos años muchos estudios han focalizado su atención en el uso de la reflectometría con señales Global Navigation Satellite Systems (GNSS-R) para distintas aplicaciones sobre distintos tipos de superficies como tierra, océano, hielo o nieve. Hoy en día, estas técnicas son prometedoras herramientas para recuperar parámetros geofísicos de las superficies observadas. Este trabajo presenta una técnica de GNSS-R que mide la potencia de la interferencia entre la señal GPS directa y la señal GPS reflejada, tras dispersarse sobre la superficie de observación, de ahí su nombre Técnica de Patrón de Interferencias (IPT, siglas en inglés). En este trabajo se mostrarán algunos resultados obtenidos tras aplicar la IPT para la recuperación de topografía, humedad del suelo, altura de vegetación, nivel de agua en balsas de agua y espesor de la nieve.

Palabras clave: reflectometría, GNSS, humedad terreno, altura vegetación, topografía, nivel de agua, espesor de nieve

ABSTRACT

Reflectometry using Global Navigation Satellite Systems signals (GNSS-R) has focused the attention of many studies during the last years for a number of different applications over different scenarios as land, ocean, iced or snowed surfaces. Nowadays, these techniques are considered as promising powerful tools to retrieve geophysical parameters from the observed surfaces. This work presents a GNSS-R technique that measures the power of the interference signal between the direct GPS signal and the reflected one after scattering over the observed surface, so it is called Interference Pattern Technique (IPT). Some results obtained after applying the IPT for topography, soil moisture, vegetation height, reservoir water level and snow thickness retrievals are shown.

Keywords: *reflectometry, GNSS, soil moisture, vegetation height, topography, water level, snow thickness*

INTRODUCCIÓN

La observación de los distintos tipos de superficies de la Tierra se ha llevado a cabo durante años mediante diversas técnicas de teledetección. En este trabajo se describe una nueva técnica que se basa en la medida de las señales de oportunidad Global Navigation Satellite Systems (GNSS-R), concretamente señales de los satélites Global Positioning System (GPS). Muchos trabajos anteriores han utilizado las GNSS para la recuperación de parámetros geofísicos como la humedad del suelo en terrenos (Masters *et al.*, 2000), el estado del mar en océanos (Rius *et al.*, 2002, Marchan-Hernandez *et al.,* 2008), o el espesor de las capas de hielo en terrenos helados (Komjathy *et al.*, 2000). Este trabajo describe una técnica denominada Técnica de Patrón de Interferencias (IPT, siglas en inglés) que consiste en medir las fluctuaciones de potencia de la interferencia que se produce entre la señal directa y la señal reflejada a medida que GPS avanzan en su órbita. Algunos estudios previos describen una técnica similar (Kavak, *et al.*, 1998 and Jacobson, 2008) que, utilizando una antena polarizada circular a izquierdas (LHCP, siglas en inglés), conseguían recuperar las propiedades dieléctricas de los suelos. En (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2009 and Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2011) se demostró que cuando se usa una antena LHCP la polarización horizontal enmascara la información angular, ya que esta polarización no muestra el nulo en la reflectividad que se produce en ángulo de Brewster y que la polarización vertical sí muestra. De esta forma, la IPT aplicada con una antena en polarización vertical presenta sensibilidad a la información que aporta el ángulo de Brewster, (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2009 and Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2011). La

IPT ha sido aplicada con éxito sobre terrenos agrícolas, reservas de agua y zonas nevadas para implementar distintos tipos de recuperación de parámetros geofísicos: topografía de la superficie, altura de la vegetación, humedad del suelo, nivel en una reserva de agua, y espesor de la capa de nieve. En este trabajo se presentan los resultados más relevantes.

LA TÉCNICA Y EL INSTRUMENTO DESARROLLADOS

Aspectos teóricos de la Técnica de Patrón de Interferencias

La IPT se basa principalmente en el análisis del impacto que tiene la reflectividad sobre la potencia de la señal resultado de la suma de la señal directa y reflejada. Cuando se mide sobre una capa semi-infinita (a efectos prácticos > 300 cm), ya sea suelo descubierto, vegetación o nieve, la reflectividad presenta claramente el ángulo de Brewster sin ningún tipo de perturbación. Sin embargo cuando la capa de vegetación o de nieve está en un punto intermedio (> 0 cm y < 300 cm), la curva de reflectividad presenta perturbaciones debidas a las múltiples reflexiones. La Fig. 1 resume este efecto.

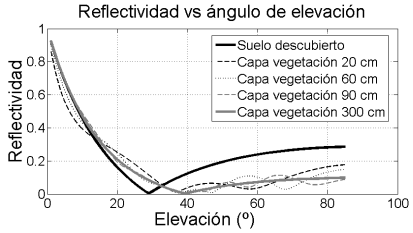


Figura 1: Perturbaciones producidas por distintos espesores de la capa de vegetación en la curva de reflectividad.

El ángulo de Brewster y las demás perturbaciones que se observan en la reflectividad aparecen reflejadas en las curvas de potencia interferente en forma de oscilaciones de mínima amplitud ("notches"), ver Fig. 2. La Fig. 2 muestra la potencia interferente teórica que sería recibida en la antena considerando una capa de vegetación de 60 cm. En la Fig. 2, se muestran las amplitudes (afectadas por la humedad del terreno) y posiciones de los distintos notches (afectadas por el espesor de la capa superior).

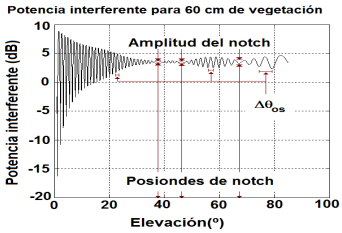


Figura 2: Potencia interferente teórica recibida en la antena en función del ángulo de elevación para una capa de 60 cm.

Así mismo, se muestra la distancia entre dos mínimos y dos máximos en las oscilaciones de la potencia interferente ($\Delta\theta_{os}$) que depende del ángulo de elevación y se ve afectada por la distancia del instrumento al suelo para cada ángulo de elevación, cuyo parámetro es equivalente a la topografía.

El reflectómetro SMIGOL

El instrumento Soil Moisture Interference-pattern GNSS Observations at L-band (SMIGOL) es un instrumento terrestre que opera en la banda L1 de GPS (1.57542 GHz) y mide la potencia de la señal resultante de la interferencia entre la señal GPS directa y la señal GPS reflejada sobre la superficie de observación usando una antena de polarización vertical apuntando al horizonte. Nótese que esta interferencia se produce automáticamente cuando los dos campos se suman en la antena receptora. La Fig. 3 muestra un esquema del reflectómetro SMIGOL captando la señal del satélite GPS.

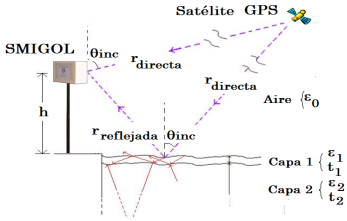


Figura 3: Esquema del reflectómetro SMIGOL y de las señales GPS directa y reflejada sobre una superficie compuesta de distintas capas.

El reflectómetro SMIGOL observa la escena durante varias horas captando las señales de los satélites GPS. Como los satélites GPS se mueven, las medidas temporales del instrumento son en realidad función de los ángulos de elevación y azimut que determinan la posición de los satélites. Cada pareja de ángulos se traduce en punto de la superficie, obteniendo por simple observación mapas de los diferentes parámetros geofísicos.

RECUPERACIÓN DE PARÁMETROS GEOFÍSICOS

Aplicando los aspectos teóricos de la IPT, se han obtenido una serie de resultados en diferentes campañas de medida que se pasan a mostrar brevemente en las siguientes sub-secciones.

Topografía

Basado en el estudio del parámetro $\Delta\theta_{os}$ descrito anteriormente (Fig. 2), (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2011), se han obtenido los resultados mostrados en la Fig. 4.

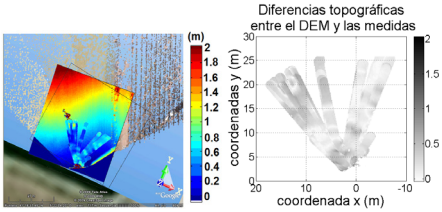


Figura 4: *De izquierda a derecha:* **a)** Topografía recuperada de las medidas de SMIGOL sobrepuesta al DEM del campo observado, proporcionado por CIALE, Universidad de Salamanca, (escala del mapa 27 m); y **b)** Mapa del error entre las medidas y el DEM.

A partir de las medidas y el DEM (Fig. 4a) se obtuvo el mapa de error (Fig. 4b). Aunque la mayor parte del mapa recuperado tiene un 10% de error (RMSE = 27 cm, σ = 16 cm, bias = 22 cm), hay dos áreas con un error mayor: en las coordenadas (0, 0) el error está relacionado con la atenuación del patrón de la antena y las dispersiones de la estructura dónde estaba anclado el instrumento, y en las coordenadas (-12, 20) el error se asocia con la presencia de un mástil metálico en medio del campo.

Humedad del suelo

Basado en el estudio de amplitud los notches (Fig. 2) de las curvas de potencia se han obtenido los resultados mostrados en la Fig. 5.

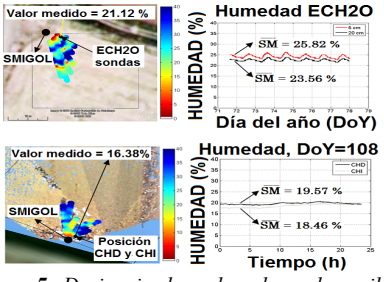


Figura 5: *De izquierda a derecha y de arriba a abajo.* **a)** Mapa de humedad recuperado sobre un campo de trigo, Palau d'Anglesola, Lleida, España, 2008; **b)** ground-truth; **c)** mapa de humedad recuperado sobre un campo de cebada, Vadillo de la Guareña, Zamora, España, 2009; y **d)** ground-truth medido.

La Fig. 5 muestra dos mapas recuperados en distintas campañas de medida así como el ground-truth obtenido para cada uno de los días. Como puede verse, observando los valores de los mapas y del ground-truth correspondiente, las medidas de SMIGOL son cercanas a los valores de ground-truth. Para las medidas sobre el campo de trigo (Fig. 5a y 5b) el error es 2.5 – 4.7 % y para las medidas sobre el campo de cebada (Fig. 5c y 5d), el error es 2.1 – 3.2 %.

Altura de la vegetación

Basado en el estudio de la posición y el número los notches (Fig. 2) de las curvas de potencia, se han obtenido los resultados mostrados en la Fig. 6.

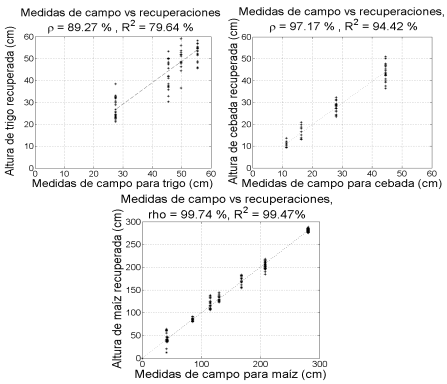


Figura 6: Altura de la vegetación recuperada vs ground-truth para distintas campañas de medida. *De izquierda a derecha y de arriba a abajo.* **a)** campo de trigo, Palau d'Anglesola, Lleida, España, 2008; **b)** campo de cebada, Vadillo de la Guareña, Zamora, España 2009; y **c)** campo de maíz, Palau d'Anglesola, Lleida, España, 2010.

Cada uno de estas figuras tiene en su cabecera los valores del coeficiente de correlación de Pearson (ρ) y el coeficiente de determinación (R^2), como descriptores principales de la correspondencia entre la recuperación de altura y el ground-truth medido.

Nivel de reservas de agua

Basándose en el mismo efecto que la recuperación topográfica (Fig. 2), a partir del parámetro $\Delta\theta_{os}$ se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 1.

SAT	Nivel medio recuperado	Media del error	σ	rmse
16	2.133 m	0.7 cm	5.7 cm	5.8 cm
32	2.126 m	1.4 cm	0.7 cm	1.6 cm

Tabla 1: Medidas del refelctómetro y cálculos respecto al valor de ground-truth medido (2.140 m).

Teniendo en cuenta el ground-truth medido (2.140 m), las medidas del reflectómetro SMIGOL son de precisión centimétrica.

Altura de la nieve

Basado en el mismo efecto que la recuperación de altura de la vegetación (Fig. 2) se han obtenido los resultados mostrados en la Fig. 7.

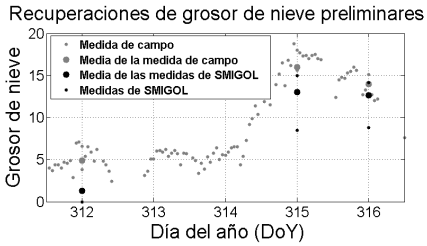


Figura 7: Resultados preliminares de la recuperación del grosor de la nieve.

El experimento se está llevando a cabo en Comalada, Val d'Aran, Lleida, España, de Noviembre 2010 a Mayo 2011. Es un trabajo conjunto con el Institut Geològic de Catalunya. Los resultados son muy preliminares y los algoritmos deben aún ser perfeccionados. Resultados más precisos serán mostrados en la conferencia.

CONCLUSIONES

Mediante el uso del reflectómetro SMIGOL y la IPT es posible recuperar parámetros geofísicos con la suficiente precisión como para ser considerados herramientas adecuadas para la observación de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

JACOBSON, M. D., 2008. *Dielectric-Covered Ground Reflectors in GPS Multipath Reception—Theory and Measurement*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 5 n. 3, pp. 396-399.

KAVAK, A., VOGEL, W.J., y XU, G., 1998. *Using GPS to measure ground complex permittivity*. Electronic Letters, vol. 34 n. 3, pp. 254-255.

KOMJATHY, A., MASLANIK, J., ZAVOROTNY, V., ET AL., 2000. *Sea Ice Remote Sensing Using Surface Reflected GPS Signals*. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000, vol.7 pp. 2855-2857.

MARCHAN-HERNANDEZ, J.F., RODRIGUEZ -ALVAREZ, N., CAMPS, A., Et AL., 2008. *Correction of the Sea State Impact in the L-Band Brightness Temperature by Means of Delay-Doppler Maps of Global Navigation Satellite Signals Reflected Over the Sea Surface* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, n.10, Part 1. pp. 2914-2923.

MASTERS, D., ZAVOROTNY V., KATZBERG, S. y EMERY, W., 2000. *GPS signal scattering from land for moisture content determination*. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000, Vol.7 pp. 3090-3092, July 24 - 28.

RIUS, A., APARICIO, J. M., CARDELLACH, E., MARTÍN-NEIRA, M., y CHAPRON, B., 2002. *Sea surface state measured using GPS reflected signals*. Geophysical Research Letters, Vol. 29 (23), pp. 2122.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., BOSCH-LLUIS, X., CAMPS, A., ET AL., 2009. *Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: experimental results over a bare soil field*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, n.11, pp. 3616-3624.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N., CAMPS, A., VALL-LLOSSERA, M., ET AL., 2011. *Land Geophysical Parameters Retrieval Using The Interference Pattern GNSS-R Technique*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, n.1, pp. 71-84.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CIALE, Universidad de Salamanca, al Institut Geològic de Catalunya (IGC), y al Conselh de la Val d'Aran, la información proporcionada y la posibilidad de medir en sus instalaciones. Este estudio ha sido financiado con fondos de proyectos del Plan Nacional Español: ESP2007-65667-C04-02, AYA2008-05906-C0201/ESP, y ESP2007-65667-C4-04.

Cuantificación de la rugosidad del suelo mediante medidas diurnas de reflectancia multiespectral de alta resolución espacial obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado

J. Rodríguez González[1], P. J. Zarco-Tejada[1] y J. A. Gómez[1]

[1] Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), (Córdoba, España). Correo electrónico: jrodriguez@ias.csic.es

RESUMEN

Sobre una finca experimental con diferentes niveles de rugosidad del suelo (RSS), se obtuvieron imágenes multiespectrales de alta resolución espacial (12.5cm) a diferentes horas del día. La posibilidad de cuantificar la RSS a partir de medidas de reflectancia se investigo aplicando el modelo de Hapke en modo inverso. La segunda metodología aplicada utiliza directamente la reflectancia medida mediante índices espectrales. Los resultados obtenidos con ambas metodologías demuestran que es factible obtener medidas cuantitativas de la RSS y su potencial para obtener mapas de rugosidad de alta resolución espacial a escala de campo.

Palabras clave: teledetección, rugosidad del suelo, modelo de Hapke, UAV.

ABSTRACT

High resolution (12.5cm) multispectral imagery was acquired at different times of the day over an experimental field site with different levels of soil surface roughness (SSR). Two methodologies were applied to investigate the possibility to estimate SSR using measured reflectance. First, we applied the Hapke model in inverse mode. The second methodology is based on using measured reflectance values directly by means of spectral indices. The results obtained indicate that both approaches could be useful for providing quantitative measures of SSR at very high spatial resolution, providing SSR maps at field or plot scales.

Keywords: *remote sensing, soil roughness, Hapke model, UAV.*

INTRODUCCIÓN

La rugosidad superficial del suelo (RSS) es un factor importante en muchos procesos en superficies terrestres sin cubierta vegetal, así como en suelos de uso agrícola. Influye, por ejemplo, de manera determinante en procesos de difusión de CO_2 y vapor de agua, así como en procesos de escorrentía y de erosión eólica e hídrica. Debido a su importancia, modelos de erosión como RUSLE, WEPP, Kineros o STREAM incluyen la RSS mediante parámetros o índices cuantitativos. Para la medición de la RSS generalmente se suelen utilizar perfilómetros o escáneres láser, estereo-fotogrametría y, recientemente, sistemas avanzados de LIDAR terrestres. Sin embargo, todos estos métodos son inadecuados para cubrir áreas más extensas a escala de campo o de explotaciones agrarias (Jester y Klik, 2005).

Numerosos trabajos han investigado las características de la reflectancia de suelos y superficies en el rango óptico del espectro electromagnético. El consenso generalizado es que la anisotropía en la reflectancia de suelos o la función de reflectividad bidireccional (BRDF) está causada por la cuantía variable de sombras expuestas al observador o sensor. Estas sombras son proyectadas por partículas y agregados del suelo, terrones, glebas y otros elementos topográficos – es decir por la rugosidad de la superficie (Cierniewski y Karnieli, 2002). Este concepto es generalmente conocido bajo el termino de '*shadow-hiding theory*' (Hapke, 1993). En consecuencia, métodos y técnicas de teledetección tienen en teoría el potencial de obtener información cuantitativa sobre la RSS a partir de medidas de reflectancia en el rango óptico del espectro.

El modelo BRDF semi-físico de Hapke (1993), estándar en el ámbito de la teledetección planetaria para la interpretación de medidas de reflectancia, permite incluir la influencia de la RSS mediante su función de rugosidad o de sombra ('*shadow function*') y su correspondiente parámetro de rugosidad θ. Recientemente, el modelo completo, incluyendo su función de sombra, ha sido utilizado para investigar la rugosidad de superficies terrestres a partir de datos MISR (1100m de resolución), demostrando así el potencial del parámetro θ como descriptor cuantitativo de la SSR (Wu *et al*., 2009).

Alternativamente, otros autores han sugerido la aplicación de métodos empíricos. Se ha demostrado con éxito la posibilidad de cuantificar la RSS de muestras de suelo tamizado utilizando directamente medidas hiperespectrales obtenidas bajo diferentes geometrías angulares a muy pequeña escala (mm) (Croft *et al*., 2009), así como usando fotografías digitales tomadas *in situ* sobre suelos labrados con diferentes aperos (García Moreno *et al*., 2008).

Sin embargo, ninguna de estas dos metodologías ha sido utilizada bajo condiciones reales y a escalas más adecuadas desde el punto de vista operativo. Esta comunicación presenta los resultados de la aplicación de ambas metodologías, la aplicación del modelo de Hapke y correlaciones empíricas, para la cuantificación de RSS en una finca experimental utilizando medidas de reflectancia multiespectral obtenidas mediante un sensor a bordo de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) a diferentes horas del día y con alta resolución espacial.

EXPERIMENTO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En una finca experimental (100x40m) sin desnivel se usaron 5 aperos (rulo, rotocultor, cultivador, chisel, vertedera) para obtener diferentes niveles de rugosidad representativos de laboreos convencionales en explotaciones agrarias (Figura 1).

Mediante un escáner láser (resolución en z = 0.1 mm) se obtuvieron 15 modelos digitales de elevación (DEM), tres por cada uno de los tratamientos. Cada DEM cubre una superficie de 900 x 900mm con una resolución de malla de 7.2x7.2mm (Figura 2). Para su localización exacta en las imágenes se utilizó un GPS diferencial con una precisión horizontal < 10 cm para obtener las coordenadas de cada uno de los DEM. Para cada uno de los DEM se calcularon cuatro índices cuantitativos de rugosidad (desviación estándar *RMSH*, pendiente media *S* y los índices de tortuosidad T_A y T_B), así como los valores medios para cada tratamiento.

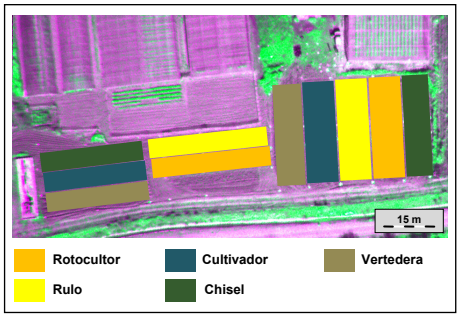


Figura 1: Detalle de la zona de estudio. Imagen multiespectral obtenida mediante el sensor ADC.

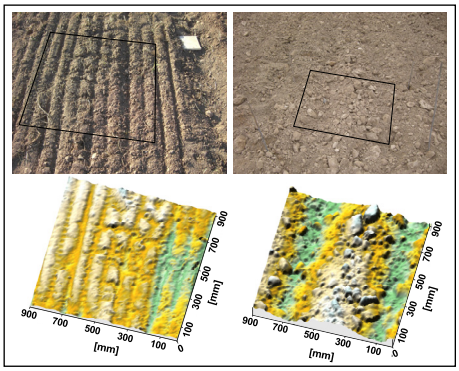


Figura 2: DEM correspondientes a los tratamientos de rulo (izda.) y chisel (dcha.)

Mediante una plataforma aérea no tripulada (UAV) equipada con un sensor multiespectral ADC (Tetracam Inc., USA) de tres bandas (B1=550, B2=670, B3=800 nm) se obtuvieron imágenes con una resolución espacial de 12.5cm. Se llevaron a cabo cuatro sobrevuelos a diferentes horas del día (8:30, 9:30, 11:00, 12:30 GMT) una semana después del laboreo. Después de la corrección geométrica y la georreferenciación, las imágenes fueron sometidas a una corrección atmosférica para obtener valores de reflectancia. A continuación se utilizaron las coordenadas GPS para extraer la reflectancia multiespectral de los píxeles correspondientes a cada uno de los DEM y se calculó el valor medio de reflectancia con el que se trabajó.

METODOLOGÍA

El modelo de Hapke y su aplicación

El modelo de Hapke está basado en la teoría de transferencia de radiación y describe el campo de radiación emergente de una superficie o suelo iluminado en función de la geometría angular de observación y varios parámetros invariantes para un suelo que se caracteriza por unas propiedades ópticas constantes (Jacquemoud *et al*., 1992). La función de rugosidad o sombra describe la influencia de la RSS de una superficie arbitrariamente rugosa mediante al parámetro de rugosidad θ. De forma abreviada (para más detalle ver Hapke, 1993), el modelo normalizado con respecto a una superficie de Lambert puede expresarse de la siguiente forma:

$$r_{(i,e,g,\theta)} = \frac{w}{4\times\mu_{0e}\times\mu_e}\times\left[\left(1+B_{(g)}\right)\times p_{(g)} + \mathrm{M}_{(\mu_{0e},\mu_e)}\right]\times S_{(i,e,g,\theta)} \quad (1)$$

donde:
w=single-scattering albedo.
i,e,g = respectivamente, ángulos de iluminación, observación y ángulo de fase .
$\mu_{(0e)}$, $\mu_{(e)}$*= coseno de los ángulos efectivos de iluminación y observación.*
$M_{(\mu(0e),\,\mu(e))}$*= multiple-scattering function*
$B_{(g)}$*=función del back-scattering.*
$p_{(g)}$ *= función de fase.*
$S_{(i,e,g,\theta)}$ *= función de rugosidad o sombra.*
θ*=parámetro de rugosidad*

El modelo se invirtió usando la conocida metodología de *look-up-table* (LUT) para minimizar el error cuadrático medio (RMSE) entre la reflectancia medida en las tres bandas, a las cuatro horas del día para cada uno de los 15 DEM (n=180). Los valores del parámetro de rugosidad θ obtenidos mediante la inversión se compararon luego con los índices cuantitativos de rugosidad mediante un análisis de correlación y regresión.

Índices multiespectrales

A partir de la reflectancia correspondiente a cada uno de los 15 DEM se calcularon varios índices espectrales de los tipos (B_X/B_Y) y (B_X+/-B_Y)/(B_X+/-B_Y) para cada hora del día y utilizando las tres bandas disponibles. Para estudiar la relación entre índices espectrales e índices cuantitativos de rugosidad, se aplicó un análisis de correlación y regresión simple.

RESULTADOS

Modelo de Hapke

La inversión del modelo se validó con un error cuadrático de 0.03 en unidades de reflectancia. La reflectancia modelada sobreestimó moderadamente los valores medidos en la longitud de onda de 550 nm, subestimo los obtenidos a 800 nm, mientras los valores a 670 nm solamente se desviaron ligeramente de la línea ideal (Figura 3).

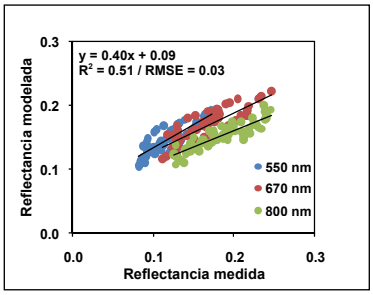


Figura 3: Resultado del ajuste del modelo de Hapke mediante LUT.

El parámetro θ obtenido mediante la inversión y los diferentes índices cuantitativos de rugosidad muestran correlaciones estadísticamente significativas. Los modelos de regresión obtenidos a partir de las medidas individuales tienen coeficientes de determinación (r2) superiores a 0.40 ($p<0.1$). Para los modelos de regresión utilizando los valores medios de los cinco tratamientos, los coeficientes de determinación son superiores a 0.70 (Figura 4).

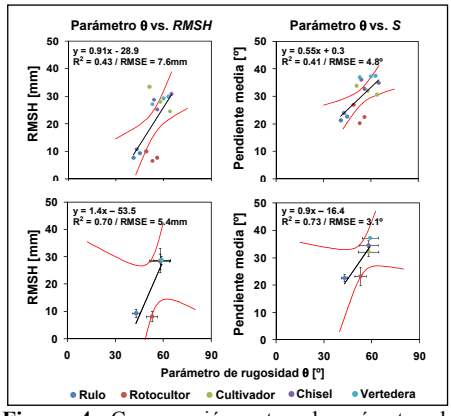


Figura 4: Comparación entre el parámetro de rugosidad θ y los índices de rugosidad *RMSH* y *S*. Modelos de regresión obtenidos mediante medidas individuales (arriba), y mediante los valores medios de tratamientos (abajo).

Índices espectrales

Para todos los índices cuantitativos de rugosidad se encontraron correlaciones estadísticamente significativas con diferentes índices espectrales. Destacan sobre todo aquellos índices espectrales basados en combinaciones de las longitudes de onda de 670 y 800 nm y de 550 y 800 nm.

Los coeficientes de determinación para los modelos de regresión a partir de las medidas individuales se sitúan a un nivel alrededor de 0.40 ($p<0.1$), utilizando las medias de los tratamientos estos valores aumentan a valores superiores a 0.70 (Figura 5). En general, las correlaciones son mejores utilizando las medidas de reflectancia obtenidas a primera hora del día (8:30 GMT) cuando la cantidad de sombra es máxima.

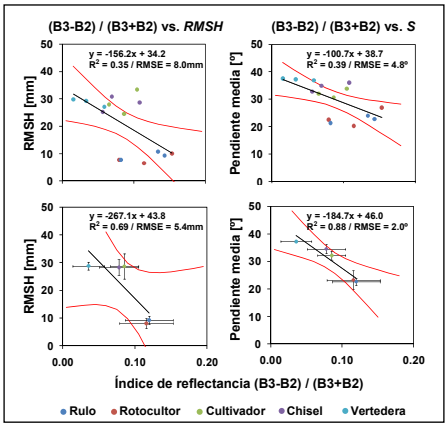


Figura 5: Modelos de regresión para los índices de rugosidad *RMSH* y *S* obtenidos con medidas individuales (arriba), y mediante los valores medios de tratamientos (abajo).

CONCLUSIONES

Mediante la inversión del modelo de Hapke es posible obtener medidas cuantitativas de la RSS a través de su parámetro de rugosidad. También se obtuvo diferentes modelos de predicción estadísticamente significativos utilizando directamente medidas de reflectancia.

Estos resultados demuestran que es factible obtener medidas cuantitativas de la RSS con ambas metodologías y su potencial para obtener mapas de rugosidad de alta resolución espacial a escala de campo.

BIBLIOGRAFÍA

CIERNIEWSKI, J. y KARNIELI, A., 2002: *Virtual surfaces simulating the bidirectional reflectance of semi-arid soils.* International Journal of Remote Sensing, 23 (19), 4019-4037.

CROFT, H., ANDERSON, K. y KUHN, N.J., 2009: *Characterizing soil surface roughness using a combined structural and spectral approach.* European Journal of Soil Science, 60 (3), 431-442.

GARCÍA MORENO, R., SAA REQUEJO, A., TARQUIS ALONSO, A.M., BARRINGTON, S. y DÍAZ, M.C., 2008: *Shadow analysis: A method for measuring soil surface roughness.* Geoderma, 146 (1-2), 201-208.

HAPKE, B., 1983: *Theory of reflectance and emittance spectroscopy (Topics in Remote Sensing 3)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

JACQUEMOUD, S., BARET, F. y HANOCQ, J. F., 1992: *Modeling spectral and bidirectional soil reflectance*. Remote Sensing of Environment, 41, 123-132.

JESTER, W. y KLIK, A., 2005: *Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface representation*. Catena, 64 (2-3), 174-192.

WU., Y., GONG, P., LIU, Q. y CHAPPELL A., 2009: *Retrieving photometric properties of desert surfaces in China using the Hapke model and MISR data*. Remote Sensing of Environment 113 (1), 213-223.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación (BES-2005-8691-AGL2005-04049, AGL2009-12936-C03-01, AGL2009-13105) y fondos FEDER.

Estimación del contenido hídrico de hojas de vid mediante medidas in-situ con espectro-radiómetro y sonda de contacto

J.R. Rodríguez-Pérez, A.B. González-Fernández y M.F. Álvarez Taboada

Grupo de Investigación GI202: Geomática e Ingeniería Cartográfica (GEOINCA). Universidad de León. Campus de Ponferrada. Avenida de Astorga, s/n. 24400 Ponferrada (León, España). Tel: 987442000-Ext.: 2022, Fax: 987442070. Correo electrónico: jr.rodriguez@unileon.es

RESUMEN

En este trabajo se ha evaluado la utilidad de las lecturas de espectro-radiómetros capturadas con sonda de contacto para estimar el contenido en agua de hojas de vid. Los datos de campo se tomaron sobre tres hojas de 161 cepas de cuatro variedades de vid (Cabernet Sauvignon, Mencía, Merlot y Tempranillo). En cada hoja se tomaron datos in situ de reflectancia (350-2500 nm) con una sonda de contacto acoplada al espectro-radiómetro y se recolectaron para la determinación del contenido en agua. Los datos de reflectancia sirvieron para determinar índices aplicando la técnica continuum-removal a seis rangos de longitudes de onda. El contenido en agua se determinó mediante EWT (Equivalent Water Thickness). Los resultados fueron variables en función de la variedad, rango de longitud de onda considerado e índice para la estimación del contenido en agua. Los mejores resultados se obtuvieron para los rangos del espectro 1260-1660 nm y 1660-1825 nm, logrando coeficientes de correlación lineal superiores a 0.70 para la estimación del EWT.

Palabras clave: contenido en agua, viticultura, espectro-radiómetro, continuum-removal.

ABSTRACT

This work evaluates the use of spectroradiometer readings taken with a plant probe to estimate the water content of vine leaves. The field data were taken on three different leaves for 161 vines for four different varieties of grapes (Cabernet Sauvignon, Mencia, Merlot and Tempranillo). For each leaf the reflectance data in situ (350-2500 nm) was taken by using a contact probe coupled with the spectroradiometer. These data were collected to determine the water content in each leaf. The reflectance data were used to determine the index by using the continuum-removal technique with six different ranges of wavelengths. The water content was determined from the EWT (Equivalent Water Thickness). The results were variable depending on the grape variety, the range of wavelengths that were considered and the index used for estimating the water content. The best results were obtained for the spectral ranges 1260-1660 nm and 1660-1825nm, achieving linear correlation coefficients above 0.70 for estimation of EWT.

Keywords: *water content, viticulture, spectroradiometer, continuum-removal.*

INTRODUCCIÓN

El estado hídrico de las cepas condiciona la producción y calidad de la uva, por lo que es necesario estimarlo adecuadamente para conseguir los objetivos productivos de la bodega. El cambio climático está obligando a modificar alguna técnicas vitícolas, especialmente en la gestión del régimen hídrico y en otras técnicas (como cobertura del suelo) para minimizar la erosión por el aumento de las lluvias intensas (Chaves *et al.,* 2010).

La falta de agua en las plantas provoca un déficit hídrico que afecta a la fotosíntesis y por tanto al crecimiento de la baya (disminuye la producción) y su composición (calidad del mosto). Para identificar situaciones de estrés y estimar el estado hídrico (Battaglia *et al.*, 1998; Chuvieco *et al.,* 2000) y vegetativos de plantas de vid se pueden usar técnicas de teledetección con imágenes (Cernicharo *et al*., 2010, Martínez-Casasnovas *et al*., 2010) y con espectro-radiómetro de campo (Serrano *et al.,* 2010). Estos métodos permiten detectar los problemas de estrés antes de que se produzcan síntomas visuales y son métodos no destructivos, frente al tedioso método tradicional de medir el potencial hídrico en hoja.

El objetivo de este trabajo fue identificar los índices de vegetación y los rangos de longitud de

onda más adecuados para la estimación de contenido en agua de las hojas de vid, con el fin de identificar situaciones de estrés hídrico en la planta que puedan condicionar la producción de uva y calidad del mosto, y así actuar para conseguir los objetivos de producción de la bodega.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en cuatro parcelas de vid de las variedades Merlot, Tempranillo, Cabernet y Mencía (D.O. Bierzo) pertenecientes a la bodega Ribas de Cúa. S.A, situadas entre las coordenadas 4720400(N), 4719500(S), 687600(O) y 688800(E) (ETRS89/UTM-29N).

Para seleccionar las cepas de muestreo se creó una malla rectangular regular, muestreándose 161 cepas (14 cepas/ha). En cada cepa se tomaron muestras en 3 hojas,

Para la captura de los datos de radiancia se utilizó un espectro-radiómetro modelo ASD FS3 Full Range, al que se le acopló una sonda de contacto (plant-probe) con fuente autónoma de energía radiante que permitió tomar los datos directamente en la hoja. El trabajo de campo hizo durante los días 18 - 20 de agosto de 2009.

Las medidas de radiancia se hicieron sobre las hojas en su estado natural (antes de ser cortadas). Para asegurar la representatividad de las medidas, en cada hoja se tomaron tres mediciones en dos puntos del haz diferentes.

Tras tomar las mediciones de radiancia, se cortaron las hojas y se introdujeron en bolsas herméticas y se trasladaron en neveras portátiles refrigeradas al laboratorio.

El contenido en agua se determinó por la resta entre el peso de la hoja húmeda (fresh mass: FM) y seca (dry mass: DM). Las hojas se secaron en estufa de ventilación forzada durante 72 horas a 65ºC. La superficie foliar (leaf área: LA) se calculó sobre las hojas húmedas. Para estimar el contenido en agua de cada hoja se calculó el contenido en agua por unidad de superficie (equivalent water thickness: EWT): EWT = (FM - DM)/LA.

La captura, volcado al PC y transformación de valores de radiancia a reflectancia se hizo con el software RS3™ Spectral Acquisition Software. Este paquete informático incluye el ViewSpec™Pro con el que se hizo un análisis exploratorio de cada signatura espectral.

Los cálculos de las variables relativas al continuum-removal, se hicieron con un aplicativo IDL desarrollado por Shruti Khanna (CSTARS. UC-DAVIS). El estudio en detalle de cada signatura espectral, eliminación de datos anómalos, cálculo de promedios y su exportación a formato texto se hizo con el software SAMS (http://sams.projects.atlas.ca.gov/).

La técnica denominada continuum removal analysis (CRA) es muy utilizada en teledetección hiperespectral. El CRA se basa en normalizar los valores de reflectancia para poder compararlos desde una línea base común (Kokaly and Clark, 1999). Las variables medidas sobre las reflectancias normalizadas para cada rango fueron: profundidad máxima (maximum band depth of the absorption feature: MBD) y área (band area of the absorption feature: BA). Los rangos estudiados (Tabla 1) fueron utilizados en otros trabajos similares (Sims and Gamon, 2003; Rodríguez-Pérez *et al.,* 2007)

Valor central (nm)	Intervalo (nm)	Rango
715	550-880	330
975	880-1070	190
1165	1070-1260	190
1460	1260-1660	400
1745	1660-1825	165
2025	1825-2225	400

Tabla 1: Intervalos de longitudes de onda estudiados en el CRA

Además del CRA, para estimar los valores del contenido en humedad de las hojas, también se calcularon índices relacionados con el contenido en agua y utilizados en otros trabajos con vid. Los índices estudiados fueron (las referencias originales se pueden consultar en Rodríguez-Pérez *et al.,* 2007; Serrano *et al.,* 2010):

$$NDII = \frac{R_{835} - R_{1650}}{R_{835} + R_{1650}} \qquad SIPI = \frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} + R_{680}};\ RGI = \frac{R_{695}}{R_{554}}$$

$$NDVI = \frac{R_{858.5} - R_{645}}{R_{585.5} + R_{645}} \qquad WI = \frac{R_{900}}{R_{970}};\ SRWI = \frac{R_{1350}}{R_{870}}$$

$$NDWI = \frac{R_{870} - R_{1260}}{R_{870} + R_{1260}} \qquad SIWSI = \frac{R_{858.5} - R_{1640}}{R_{858.5} + R_{1640}}$$

Para cada variable se desecharon los valores erróneos. Se calcularon estadísticos básicos y las correlaciones lineales (R de Pearson) entre EWT y las variables CRA y los índices de vegetación. Finalmente se calcularon las mejores regresiones lineales (SPSS v.17-http://www.spss.com/).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 muestra los estadísticos básicos por variedad y para el total de las 483 hojas muestreadas en las 161 cepas. Las hojas de Tempranillo tienen un mayor contenido en agua que el resto de variedades.

Variedad	LA (cm^2)	FM (g)	DM (g)	EWT (g/cm^2)
Cabernet S	124.98	2.51	0.71	0.014
Mencía	139.68	2.86	0.81	0.015
Merlot	182.35	3.42	1.05	0.013
Tempranillo	250.07	5.95	1.52	0.017
Total	172.78	3.72	1.02	0.015

Tabla 3: Valores promedio del contendido en agua de las hojas de vid (por variedad y total)

L. onda (nm)	Cuatro variedades	Tempranillo
550-880	-0.26**/-0.33**	-0.10**/-0.36**
880-1070	0.48**/0.48**	0.56**/0.58**
1070-1260	0.13**/0.17**	0.25**/0.29**
1260-1660	0.60**/0.55**	0.76**/0.68**
1660-1825	0.54**/0.66**	0.68**/0.74**
1825-2225	0.22**/-0.16**	0.21*/-0.30**

Tabla 4: Correlaciones lineales (R) entre EWT y las variables CRA para las cuatro variedades y para Tempranillo (se muestran "BA"/"1-MBD").

En las tablas 4 y 5 se muestran los valores de R de Pearson (* y ** indican significación bilateral 95% y 99%, respectivamente). Considerando todos los datos, la mejor correlación con ETW se obtuvo para MBD a 1660-1825 nm (R= 0,66), mientras que para Tempranillo el mejor coeficiente se obtuvo con BA a 1260-1660nm (R=0,76) (Tabla 4). Dichas correlaciones se pueden ver en las Figuras 1 y 2.

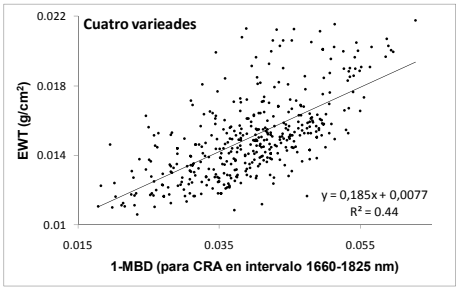


Figura 1: Regresión lineal entre el contenido en agua (EWT) y la profundidad en el CRA (1-MBD) para todas las variedades.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en trabajos anteriores (Rodríguez-Pérez *et al*., 2007) en los que obtenían buenas relaciones de intervalos espectrales del infrarrojo medio (1520-1540nm) con otras variables de estado hídrico de las cepas.

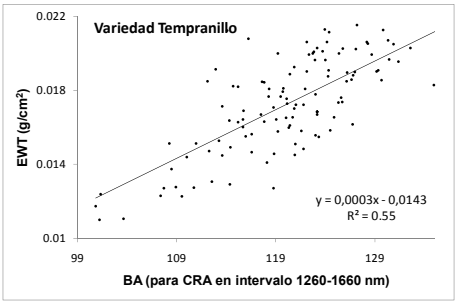


Figura 2: Regresión lineal entre el contenido en agua (EWT) y el área en el CRA (1-MBD) para la variedad Tempranillo.

Índice	Cuatro variedades	Tempranillo
RGI	0.16**	0.25**
SIPI	-0.34**	-0.35**
WI	0.46**	0.53**
SRWI2	-0.42**	-0.57**
CAI	0.36**	0.64**
NDVI2	-0.29**	-0.22*
NDWI2	0.37**	0.47**
SIWSI	0.37**	0.54**
NDII	0.71**	0.70**

Tabla 5: Correlaciones lineales (R de Pearson) entre EWT y los índices de vegetación.

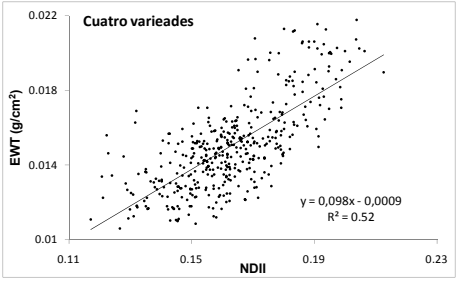


Figura 3: Regresión lineal entre el contenido en agua (EWT) y el índice NDII para todas las variedades

Con los índices de vegetación, los mejores resultados se obtuvieron con NDII (Figura 3). Otros trabajos han obtenido buenas correlaciones con variables calculadas en la banda 970 nm (Serrano el al., 2010) pero se trabajó con vides sometidas a distintos niveles de estrés hídrico y plantadas en maceta, mientras que este trabajo utilizó mediciones sobre viñas comerciales donde las condiciones hídricas no están tan controladas. Strever (2005) también trabajo con datos tomados

en viñedos comerciales y no consiguió altas correlaciones entre el potencial hídrico en hojas y la respuesta espectral.

Los resultados de este trabajo están condicionados por la variedad y el estado vegetativo de las plantas. Las mediciones se hicieron en un verano con muy poca precipitación con lo cual las cepas eran poco vigorosas (excepto las de Tempranillo) y en esta situación la respuesta espectral se produce en las longitudes de onda más cortas más que a nivel de contenido en agua (Strever, 2005).

CONCLUSIONES

En este trabajo se han contrastado dos métodos (continuum-removal analisys-CRA e índices de vegetación-VI) para estimar el contenido en agua de hojas de vid en viñas comerciales mediante datos de reflectancias medidos con un espetro-radiómetro. Los dependen de la variedad: los mejores resultados fueron con Tempranillo (mayor contenido hídrico). El rango 1260-1660 nm ha permitido hacer las mejores estimaciones del contenido hídrico con ambas técnicas. También se han logrado buenas estimaciones con las variables CRA calculadas en el rango 1660-1825 nm. Se identificado al NDII como el mejor índice de vegetación. Futuros trabajos deben contrastar estos resultados.

BIBLIOGRAFÍA

BATTAGLIA, M., CHERRY, M., BEADLE, C., SANDS, P. and HINGSTON, A., 1998. *Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature.* Tree physiology, 18(8-9), 521-528.

CHAVES M. M., ZARROUK O., FRANCISCO R., COSTA J. M., SANTOS T., REGALADO A. P., RODRIGUES M. L., LOPES C. M., 2010 *Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data.* Annals of Botany, 105(5). p.661

CERNICHARO, J., CAMACHO, F., MARTÍNEZ, B. y LÓPEZ-BAEZA, E., 2010. *Estimación del contenido de agua de la vegetación en la zona VAS de validación de SMOS mediante la extensión espacial de medidas de campo con imágenes CHRIS y MODIS.* Revista de Teledetección, 33, 64-79.

CHUVIECO, E., VAUGHAN, P. y RIAÑO, D., 2000. *Bases para estimar el contenido de humedad en plantas mediterráneas a partir de la teledetección.* Mediterranea, 17, 27-34.

KOKALY, R.F. and CLARK, R.N., 1999. *Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression*. Remote Sensing of Environment, 67(3), 267-287.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J., AGELET, J., ARNÓ, J., BORDES, X. y RAMOS, M., 2010. *Protocolo para la zonificación intraparcelaria de la viña para vendimia selectiva a partir de imágenes multiespectrales*. Revista de Teledetección, 33, 47-52.

RODRIGUEZ-PEREZ, J.R., RIANO, D., CARLISLE, E., USTIN, S. and SMART, D.R., 2007. *Evaluation of hyperspectral reflectance indexes to detect grapevine water status in vineyards*. American Journal of Enology and Viticulture, 58(3), 302.

SERRANO, L., GONZÁLEZ-FLOR, C. and GORCHS, G., 2010. *Assessing vineyard water status using the reflectance based Water Index*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 193, 490-499.

SIMS, D.A. and GAMON, J.A., 2003. *Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features*. Remote Sensing of Environment, 84(4), 526-537.

STREVER, A.E., 2005. *Estimating water stress in Vitis vinifera L. using field spectrometry: A preliminary study incorporating multispectral vigour classification*. Frutic (Sustainable Fruit and Nut production) Conference, Montpellier, France, 10 pp.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha podido ser desarrollado gracias a la financiación del proyecto GEOVID, financiado por el ITACYL. También expresamos nuestro agradecimiento a Bonsai Advanced Technologies S.L. (en especial a Fernando López), a la Bodega Ribas del Cúa S.A. y al personal de CSTARS (UC-Davis, CA).

Aplicación de técnicas de teledetección y geostadística en la optimización de muestreos del LAI, en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura

M. Romero y S. Montesinos

GEOSYS, S.L. Sector Foresta 23, locales 7 y 8. 28760 Tres Cantos (Madrid, España). Correo electrónico: smontesinos@geosys.es

RESUMEN

Este trabajo pretende establecer unas bases metodológicas, que permitan optimizar el seguimiento espacial y temporal del Índice de Área Foliar (LAI) relacionado con el consumo hídrico en cultivo superintensivo de olivar en Andalucía, dentro del concepto de Agricultura de Precisión (AP).

La estimación del LAI para toda la finca se ha realizado mediante dos técnicas, una de extrapolación espacial mediante Teledetección espacial y otra, de interpolación mediante Geoestadística, que han permitido su comparación en términos de eficacia predictiva de esta variable con respecto a un muestreo de campo previo.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Índice de Área Foliar (LAI), Olivar superintensivo, Geoestadistica, Teledetección.

ABSTRACT

The present communication tries to establish a methodological basis, to optimize the spatial and temporal monitoring of the Leaf Area Index (LAI) in relation to water consumption in olive crop in Andalusia region within the concept of Precision Farming.

The estimation of LAI for the whole farm was performed using two different techniques, first one a spatial extrapolation using remote sensing, and second one using geostatistics, which have allowed their analysis in terms of predictive effectiveness of this variable with regard to field sampling prior.

Keywords: *Precision Agriculture, Leaf Area Index (LAI), Olives, Geostatistics, Remote Sensing.*

INTRODUCCIÓN

El estudio pretende establecer cuál de las dos técnicas espaciales, una de extrapolación espacial mediante teledetección espacial y otra de interpolación mediante modelos geoestadísticos, permite mejores resultados en cuanto a la eficacia predictiva respecto a un muestreo previo del LAI, bajo condiciones de cultivos superintensivos de olivar en Andalucía.

El análisis de la variabilidad espacial del LAI en una explotación superintensiva de olivar utilizando métodos de teledetección y de interpolación espacial, se fundamenta en que constituye un parámetro biofísico relacionado con la estructura de la planta, por ello, en teledetección se ha convertido en objetivo básico de estudio que se usa en modelos climáticos e hidrológicos a escala regional y global (Fensholt et al., 2004). Existen importantes trabajos donde se han relacionado los Índices de Vegetación (IV) con esta variable agronómica, mostrando en la mayoría de los casos importantes niveles de correlación (Wang et al., 2005), aunque con ciertas restricciones, ya que se trata de relaciones empíricas que en muchos casos hay que ponderar si se quieren comparar interanualmente o extrapolar a otras zonas (Wang et al., 2005).

El LAI es un parámetro biofísico del cultivo que tiene gran importancia agronómica y es un indicador de la capacidad fotosintética del cultivo, estando estrechamente relacionado con la Evapotranspiración Potencial y Real (ETP-ETR) (McNaughton y Jarvis, 1983), el balance hídrico (Grier y Running, 1977), la intercepción de la radiación (Pierce y Running, 1988), la producción primaria liquida de la cubierta vegetal (Gholz, 1982) y la producción primaria total (Gower et al., 1991).

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología propuesta se desglosa en los siguientes pasos:

1. Obtención de Mapas de Vigor de la vegetación a partir de imágenes multiespectrales, donde se observa la variación espacial entre densidad y vigor de la cubierta vegetal.

2. Zonificación mediante técnicas estadísticas, con objeto de optimizar el diseño de muestreos de campo para obtener datos de LAI.

3. Correlación espacial de los valores de IV derivados de imágenes multiespectrales con los datos LAI obtenidos del muestro de campo.

4. Georreferenciación de la variabilidad espacial del LAI mediante localización GPS y su integración en un Sistema de Información Geográfico.

5. Estudio Geoestadistico de los valores obtenidos en el estudio del muestreo del LAI (Kriging Ordinario Circular, Simple y Universal).

6. Comparación entre ambos métodos.

Trabajo de Campo.

La zona de estudio se localiza en el término municipal de Fuente Obejuna, (Figura 1) en el límite noroccidental de la provincia de Córdoba y suroriental de la provincia de Badajoz, donde el río Zújar actúa como frontera natural entre ambas provincias.



Figura 1: Localización del área de estudio. Imagen del MDT de Andalucía.

La finca que se ha seleccionado, presenta una explotación superintensiva de olivar con un marco de plantación de 1,35 x 4 metros, lo que supone una densidad media de 1.850 plantas por hectárea.

La adquisición de datos sobre la explotación se ha realizado durante los días 11 al 14 de Julio de 2009, donde se han sincronizado el muestreo de LAI en campo, con la adquisición de una imagen del satélite QuickBird. Este periodo de toma de datos ha coincidido con el momento de engorde de la aceituna y con el de máxima actividad fotosintética. Dentro de este periodo, se considera que la cobertura foliar se encuentra totalmente desarrollada, siendo además una fase crítica para la obtención de un fruto de calidad. En esta fase de desarrollo, la planta ya ha sufrido o está sufriendo ciclos de estrés que determinarán en gran medida la variabilidad en el estado de las plantas en la fecha de recogida.

Las imágenes del satélite QuickBird cuentasn con una resolución que permite la discriminación de la vegetación debido al marco de plantación existente. La información de campo ha sido obtenida mediante mediciones indirectas del LAI realizadas con un instrumental LICOR 2000 (LiCor, Inc, Lincoln, NE) diseñado específicamente para medir el LAI (Welles & Norman, 1 991; Mateos, 1995).

Adquisición y tratamiento de Imágenes multiespectrales QUICKBIRD.

Los puntos muestreados fueron previamente seleccionados atendiendo a la reclasificación de los valores positivos (0-1) del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), obtenido de la imagen multiespectral original. La Zonificación se basa en el estudio y análisis de la distribución de las frecuencias acumuladas de estos valores (Histograma de Frecuencias), de manera que se ha establecido como óptima la reclasificación en tres cluster separados por los dos cuantiles Q33 y Q66 del histograma de frecuencias acumuladas.

En la figura 2, se aprecian los valores positivos del NDVI y su transformación mediante la reclasificación de tres cluster.

La técnica de muestreo estratificado - sistemático ha sido la óptima, dado que conocemos la variabilidad espacial del estado de la vegetación, se han establecido tres zonas diferenciadas **Clase 1(0,36-0,51)**, **Clase2 (0,3-0,36)**, **Clase3 (0,1-0,3)** según los tres cluster anteriormente reseñados. El estudio estadístico previo, ha establecido el tamaño muestral óptimo en 40 unidades de muestreo, siguiendo las líneas de plantación acorde a un esquema regular o malla ISONOMIAS (Kersaw. 1973). La resolución espacial de la imagen presenta un tamaño de

2,50x 2,50 metros, similar al marco de plantación, por lo que hemos podido utilizar el valor del IV del píxel para correlacionar el muestreo del LAI por unidad arbórea. La unidad de muestreo es el árbol central de cada píxel, pudiendo repetir esta unidad tantas veces como deseemos. La correcta ubicación de las unidades se ha realizado mediante GPS submétrico.

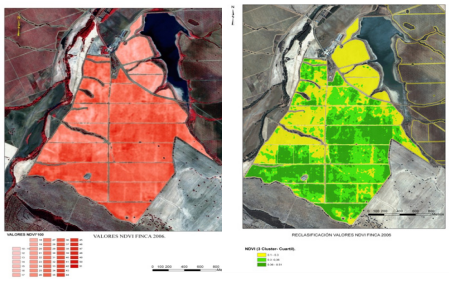


Figura 2: Mapa de Vigor de la vegetación. Reclasificación del NDVI en tres cluster. Zonificación de la explotación. Imagen completa.

Tras comprobar el adecuado tamaño de la muestra y de su consistencia a través del análisis de la varianza y del nivel de confianza de la media, se ha procedido, por un lado a extrapolar el valor del LAI para toda la finca, a partir de los datos del NDVI, mediante la correlación espacial de ambas variables por cada punto muestreado y clase y por otro, a realizar una interpolación espacial del LAI muestreado, mediante distintas técnicas geoestadisticas kriging (Ordinario, Simple y Universal), basados en el análisis de la semivarianza entre pares de puntos de las muestras (semivariograma).

Los parámetros de entrada han podido ser modificados ya que los semivariogramas se han realizado dependiendo de la orientación geográfica deseada, buscando posibles anisotropías de la variable LAI. De esta manera se han efectuado seis variogramas correspondientes a las direcciones Norte (0º), Este (90º), Sureste (135º), Sur (180º), Oeste (275º) y Noroeste (315º) tanto para la finca completa como para la variedad Arbequina. Los variogramas representan en el eje de las abscisas la distancia entre dos pares de puntos del parámetro a estudiar y en el eje de ordenadas la varianza estadística de sus valores.

RESULTADOS

La utilización de las ecuaciones de transformación obtenidas de la correlación bivariable (NDVI –LAI), dan como resultado la correspondiente salida cartográfica del LAI estimado tal y como se aprecia en la figura 3. La interpolación espacial mediante técnicas Kriging ha dado como resultado la siguiente cartografía del LAI estimado. Figura 3.

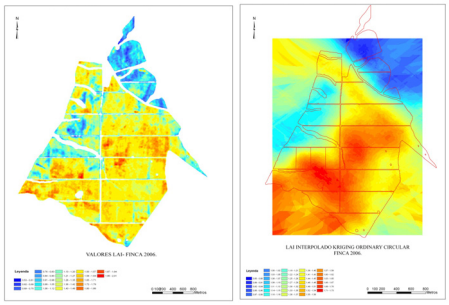


Figura 3: Salida cartográfica del LAI estimado mediante extrapolación espacial (Izquierda) e Interpolación (Derecha).

La matriz de confusión realizada para comprobar la fiabilidad de los datos nos da un coeficiente R2 de 0.97, para la técnica de extrapolación espacial mediante imágenes multiespectrales, mientras que los resultados obtenidos para la interpolación espacial mediante técnicas Kriging del muestreo de LAI presentan, en el mejor de los casos, un coeficiente R2 de 0,61.

CONCLUSIONES

La imagen original presenta una clara asimetría a la izquierda (negativa) en el histograma de frecuencias de los valores digitales correspondientes a los valores NDVI inferiores a 0,36, que explica la interferencia varietal procedente de distintas parcelas de la finca en estudio, que repercute en la zonificación del cultivo.

La primera zonificación de tres cluster ha sido más que satisfactoria no siendo preciso continuar con nuevas reclasificaciones. El aumento del número de clases, conlleva una complejidad de difícil manejo e interpretación.

El método de muestreo seleccionado (Estratificado-Sistemático) ha sido el adecuado para la estima del LAI. En conjunto, se ha comprobado que el nivel de confianza no varía significativa-

mente a partir de 25 unidades muestrales para cada clase. Al mismo tiempo se observa como la varianza de las muestras permanece en valores muy bajos y prácticamente constantes.

Existe una alta correlación lineal positiva entre las dos variables LAI y NDVI, si bien tomado todo el conjunto muestreado esta correlación es mucho mayor que las correlaciones establecidas según el muestreo estratificado. Es interesante reseñar como la regresión de todos los valores sin mediar clasificación alguna, enmascara las diferencias intramuestrales, ofreciendo una alta correlación positiva del conjunto, ratificando la idoneidad del tipo de muestreo elegido para esta variable, que evita el sesgo del conjunto muestral.

Existe una mejor correlación en la matriz de confusión de los valores medidos y estimados en el método de extrapolación de la imagen satélite con respecto a los métodos geoestadísticos de interpolación.

En el caso que nos ocupa, para alcanzar un mejor ajuste de los datos, utilizando métodos geoestadísticos, se requiere de un mayor número de muestras (Tamaño Muestral) y que su disposición y distribución espaciales (Distancias menores y optimización geométrica) sean mejores a las estudiadas. Esto evidentemente repercute en un mayor coste del muestreo, tanto económico como técnico. Habría que estudiar la relación de este coste de muestreo con el coste de obtención y manejo de las imágenes satélite.

BIBLIOGRAFÍA

DEBLONDE, PENNER y ROYER 1994. *Measuring leaf area index with de LI-COR LAI2000 in pine stands*. Ecology. 73(5), pp 1 507-1 511.

FENSHOLT, R., SANDHOLT, I. Y RASMUSSEN, S. 2004. *Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements*. Remote Sensing of Environment, vol. 91, pp. 490-507.

GHOLZ, H.L. 1982. *Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest.* Ecology 63 (2), pp. 469–481.

GOWER & NORMAN 1991. *Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad leaf plantations Ecology*, 72(5) 1896-1900.

GRIER AND RUNNING 1977. *Leaf area of mature northwestern coniferous forests: relation to site water balance*. Ecology 58 (1977), pp. 893–899.

KERSHAW 1973. *Quantitative and dynamic plant ecology.* Edward Arnold.Londres.

MCNAUGHTON,M.K. 1983. *The direct effect of shelter on evaporation rates: theory and an experimental test.* Agric. Meteorol. 29, pp. 125–136.

PIERCE, L. L., S.W. RUNNING. 1988. *Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer.* Ecology 69, pp. 1,762-1,767.

VILLALOBOS, F. J., ORGAZ, F., MATEOS L. 1995. *Non-destructive measurement of leaf area in olive (Olea europea L.) trees using a gap inversion method*. Agriculture, Forest and Meteorology, 73, pp. 29-42.

WANG, Q., ADIKU, S., TENHUNEN, J. Y GRANIER, A. 2005. *On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site.* Remote Sensing of Environment, vol. 94, pp. 244-255.

WARING y RUNNING. 1998. *Forest Ecosystems. Analysis at multiple scales*. Academic Press. Pag 29

WELLES & NORMAN. 1991. *Instrument for indirect measurement of canopy architecture.* Agronomy Journal, 83, pp. 818-825.

Efectos de la construcción de terrazas en el desarrollo del cultivo en nuevas plantaciones de viña de la D.O.C. Priorat (Cataluña)

A. Solaní[1], J. A. Martínez-Casasnovas[1] y M. C. Ramos[1]

[1] Universidad de Lleida, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Av. Rovira Roure 191, 25198 Lleida (Cataluña, España). Correo electrónico: j.martinez@macs.udl.cat

RESUMEN

Se evaluó el efecto de los movimientos de tierra realizados para la construcción de terrazas en el desarrollo del cultivo de la viña en la D.O.C. Priorat. Para ello, se seleccionó una nueva plantación de viña de 14,4 ha plantada en 2003 donde, en primer lugar, se evaluaron los movimientos de tierra realizados para la construcción de las terrazas. Esta evaluación se basó en la construcción de modelos digitales de elevación (MDE) de alta resolución espacial (0,5 m) de antes (2003) y después (2009) de la construcción de las terrazas a partir de vuelos fotogramétricos. Los volúmenes de tierra movilizados para la construcción de las terrazas se calcularon a partir de la diferencia de los MDE. Por otra parte, el desarrollo de la viña se cartografió a través del NDVI extraído de una imagen aérea con una cámara multiespectral DMSI (fecha de adquisición 14/08/2009), y con una resolución espacial de 0,5 m, y de medidas de diámetro de tronco (42 zonas de control de corte y relleno del terreno). Se observaron diferencias significativas en el desarrollo de la viña estimado a través del NDVI entre las zonas de corte (0,1701) y relleno (0,2102) (p-valor < 0,05). Este efecto fue mayor en función de la magnitud de los movimientos de tierra realizados. Se observaron resultados similares cuando se compararon las zonas de corte y relleno con los diámetros de los troncos de las cepas: 1,39±0,27 cm (zona de corte) y 3,07±0,49 cm (zona de relleno). Los resultados muestran que los movimientos de tierra para la construcción de terrazas producen una heterogeneidad no deseada, que puede conllevar diferencias en el rendimiento y calidad de la uva en diferentes zonas de una misma plantación.

Palabras clave: viticultura de precisión, NDVI, terrazas, Priorat.

ABSTRACT

The present work evaluated the effects of land movements for terrace construction in the development of vineyards in the D.O.C. Priorat. For that, a vineyard of 14.4 ha planted in 2003 was selected. Lands movements were assessed on the basis of the construction of detailed digital elevation models (DEM) (0.5 m) of before (2003) and after (2009) the construction of terraces from photogrammetric surveys. The volume of soil that was moved was computed by the subtraction of DEMs. The development of the crop was mapped by means of the NDVI computed from aerial image (0.5 m resolution) acquired by the multispectral camera DMSI (acquisition date 14/08/2009) and trunk diameter measures in 42 zones of cut and filled land. Significant differences were observed on the development of vines estimated from the NDVI between cut (0.1701) and filled zones (0.2102) (p-value < 0,05). This effect was higher depending on the magnitude of the land movements. Similar results were observed for trunk diameters measured in cut and fill zones. The results show that land movements for land terrace construction produce a non-desired heterogeneity, that can involve differences on yield and grape quality in zones of the same plantation.

Keywords: *precision viticulture, NDVI, terraces, Priorat.*

INTRODUCCIÓN

A partir de la década de 1960 la región mediterránea ha experimentado profundas transformaciones ambientales y sociales, destacando, por un lado, la especialización y la intensificación agraria (con la premisa de facilitar la mecanización de los cultivos) y por otro un proceso de abandono de tierras con determinados usos agrícolas (Cots-Folch et al, 2009). En las zonas montañosas, como la zona de la D.O.C. Priorat (con pendientes medias de 30-50%), la intensificación de determinados usos agrícolas, como la viña, ha conllevado la construcción de terrazas (realizada con la ayuda de grandes retroexcavadoras y *bulldozers*). Los grandes

movimientos de tierras realizados alteran las propiedades de los suelos así como su régimen hidrológico (Ramos et al., 2007), creando condiciones heterogéneas para el desarrollo de la viña.



Figura 1: Detalle de la construcción de terrazas por medio de retroexcavadoras en la zona de estudio.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es evaluar los efectos de los movimientos de tierra realizados para la construcción de terrazas en el desarrollo del cultivo de la viña en la D.O.C. Priorat.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolla en el municipio de Porrera (Tarragona), representativo de los usos del suelo y transformaciones producidas en la D.O.C. Priorat en las últimas décadas. En este municipio se seleccionó una finca modelo de 14,4 ha, con una pendiente media del 43%. El material original de los suelos son rocas metamórficas (esquistos) que han dado lugar a suelos superficiales (*Xerorthents líticos*), ligeramente ácidos, de texturas franco-arenosas, pobres en materia orgànica y con gran abundancia de elementos gruesos (Ramos et al., 2007).

El área de estudio fue aterrazada en el año 2005 y plantada con viña de la variedad Garnacha negra en el año 2006. Está plantada en espaldera y tiene riego de apoyo por goteo. La construcción de las terrazas, bancales conectados sin protección del talud con muros de piedra, fue realizada por medio de una retroexcavadora, sin un diseño previo de los bancales (Figura 1).

Movimientos de tierra para la construcción de terrazas

Los movimientos de tierras para la construcción de las terrazas se determinaron a partir de la diferencia de modelos digitales de terreno (MDT) de alta resolución (0,5 m) derivados de fotografías aéreas detalladas de antes (año 2003) y después (año 2009) del aterrazamiento de la finca. Estos modelos fueron construidos a partir de los datos de elevación: curvas de nivel y cotas; y líneas de ruptura extraídas de la restitución fotogramétrica de los pares estereoscópicos. La diferencia de los MDT fue corregida en 0,02 m para compensar los errores sistemáticos medidos en 25 zonas de control, sin cambios entre las dos fechas. Las clases de cambio en la morfología del terreno se detallan en la Tabla 1.

Clase	Zona de cambio de elevación (3 clases)	Zona de cambio de elevación (6 clases)
1	< -0,15 m	< -0,50
2	-0,15 – 0,15	-0,50 - -0,15
3	> 0,15	-0,15 – 0,15
4		0,15 – 0,50
5		0,50 – 1,50
6		> 1,50

Tabla 1: Clases de diferencia de elevación para el análisis de cambios morfológicos del terreno debidos a los movimientos de tierra.

Desarrollo vegetativo de la viña

El desarrollo vegetativo de la viña en las diferentes zonas de corte (diferencias de elevación < -0,15 m) y relleno (diferencias de elevación > 0,15 m) fue evaluado para el año 2009 por medio de un mapa de NDVI (Rouse et al., 1973) obtenido a partir de una imagen multiespectral de 0,5 m/píxel con centros de banda en: azul (452 nm), verde (552 nm), rojo (676 nm) e infrarrojo próximo 781 nm (ancho de banda de 20 nm). La imagen fue adquirida el 14/08/2009 por medio de una cámara DMSC-2K System de SpecterraServices Pty Ltd (Au) montada en un avión Cessna 182. La imagen fue corregida radiométricamente por el efecto de distorsión de la lente y del brillo. También fue ortorectificada usando el MDT de 2009. El desarrollo vegetativo de la viña también se determinó en campo mediante la medición del diámetro del tronco de cepas seleccionadas en 42 zonas de control (21 en zona de corte y 21 en zona de relleno). En cada zona se midieron 8 cepas, con un total de 336 plantas muestreadas.

Análisis estadístico

La relación entre las zonas de corte / relleno del terreno y el NDVI en las filas de viña se estableció mediante una operación de estadística zonal con ArcGIS 9.3. Posteriormente se llevó a cabo un análisis de varianza y un test de comparación de medias y análisis de rango múltiple, para determinar qué medias son significativamente diferentes con un p-valor del 95%. También se estableció la relación entre el NDVI y el diámetro del tronco mediante un análisis de regresión simple.

RESULTADOS

El volumen de tierra estimado para la construcción de las terrazas de cultivo fue de 7847 m^3 ha^{-1}. El balance entre diferencias de elevación positivas (relleno) y negativas (corte) fue positivo, con un resultado de 5167 m^3 ha^{-1} (Figura 2). En comparación con un trabajo anterior de Cots-Folch et al. (2006), en el que dicho balance fue negativo (-3000 m^3 ha^{-1}), las diferencias son atribuidas a la no trituración del material resultante de los movimientos de tierra y, por tanto, a la menor compactación en el presente caso de estudio.

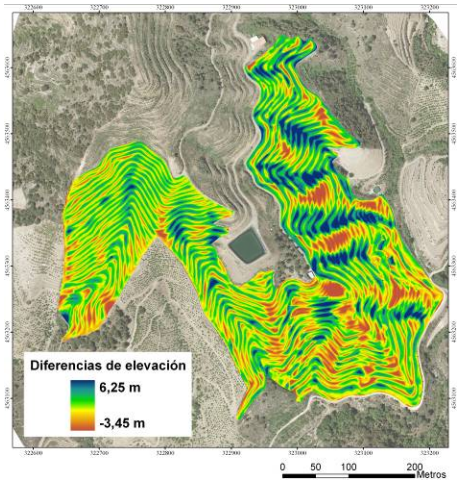


Figura 2: Diferencias de elevación calculadas a partir de los modelos digitales de elevación de antes (2003) y después (2009) de la construcción de terrazas en el área de estudio.

La Figura 3 muestra el mapa de NDVI para las filas de viña en las terrazas del área de estudio. El análisis visual de este mapa (Figura 3) muestra una correspondencia entre las zonas de mayor desarrollo vegetativo del cultivo con las zonas de relleno de materiales (Figura 2), y un menor desarrollo en las zonas de corte, con condiciones de suelo menos idóneas para el desarrollo de las plantas.

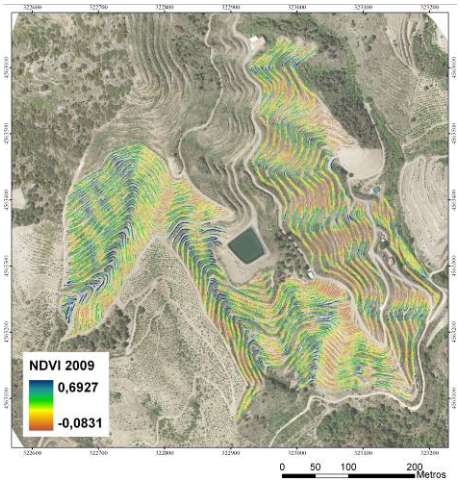


Figura 3: NDVI de las filas de viña en las terrazas de la parcela de estudio calculado a partir de una imagen DMSI adquirida el 14/08/2009.

Esta hipótesis se confirmó con el resultado del análisis de varianza en las zonas de corte y relleno (3 ó 6 clases) (Tabla 2), donde se muestra que existen diferencias significativas (p-valor < 0,05) en la media del NDVI en las diferentes zonas, con un mayor desarrollo vegetativo (mayor NDVI) en las zonas de relleno que no en las zonas de corte. En la Tabla 2 también se muestra el resultado del análisis de rangos múltiples de Fisher, el cual indica las diferencias significativas entre las medias de NDVI de las diferentes clases de corte / relleno.

En el caso de la zonificación de movimientos de tierra en 3 clases, se confirman las diferencias entre zonas de corte y relleno, con valores NDVI medio de 0,1701 y 0,2102 respectivamente. En el caso de la clasificación en 6 clases se observó que no existían diferencias significativas para las dos zonas de corte (entre 0,15 - 0, 50 m de corte, o bien > 0,50 m de corte), pero si entre estas y las zonas de relleno. Esto es debido a que como los suelos originales son superficiales (profundidad < 0,50 m), los movimientos de tierra realizados en estas zonas suponen la eliminación del suelo original y la puesta en superficie de la roca madre (esquistos en este caso), lo cual confiere propiedades poco idóneas al suelo resultante para el

desarrollo de las plantas. En el caso de las zonas de relleno sí se observaron diferencias significativas entre las diferentes clases (Tabla 2), con un mayor valor de NDVI medio a mayor profundidad del suelo resultante de los movimientos de tierra.

Zona de cambio elevación (3 clases)	Media NDVI 2009	Zona de cambio elevación (6 clases)	Media NDVI 2009
< -0,15 m	0,1701 b	< -0,50	0,1678 e
-0,15 – 0,15	0,1890 a	-0,50 - -0,15	0,1703 e
> 0,15	0,2102 a	-0,15 – 0,15	0,1889 d
		0,15 – 0,50	0,2122 c
		0,50 – 1,50	0,2368 b
		> 1,50	0,3281 a

Tabla 2: Zonas de cambio de elevación (3 y 6 clases) y valores de NDVI medio en cada zona. Las letras indican las diferencias entre grupos según el resultado del análisis estadístico de rangos múltiples (p-valor < 0,05).

Estos mismos resultados se obtuvieron cuando se compararon los diámetros de los troncos de las cepas medidos en las diferentes zonas de diferencias de elevación. A modo de ejemplo se ofrecen los resultados del análisis de rangos múltiples de los diámetros medidos en las zonas de corte y relleno (Tabla 3).

Zona de cambio elevación (corte / relleno)	Media diámetro tronco cepas cm
< -0,15 m	1,394 b
> 0,15	3,073 a

Tabla 3: Zonas de cambio de elevación (corte y relleno) y valores medios de diámetro de los troncos de las cepas. Las letras indican las diferencias entre grupos según el resultado del análisis estadístico de rangos múltiples (p-valor < 0,05).

De aquí también se deriva que existe una relación entre el NDVI de la viña y el diámetro de los troncos de las cepas, como indicadores del desarrollo vegetativo de la planta. En este caso se obtuvo una coeficiente de correlación R entre ambas variables de 0,88 (p-valor < 0,01).

CONCLUSIONES

La construcción de terrazas con la realización de grandes movimientos de tierra en montañas del ámbito mediterráneo español (p.e. Priorat, Cataluña), ha introducido una amplia variabilidad espacial en la respuesta del cultivo de la viña, medida tanto a partir de imágenes aéreas multiespectrales como a partir de parámetros vegetativos del cultivo (diámetro de los troncos de las cepas). Así mismo, se comprueba que el desarrollo vegetativo del cultivo posterior a la construcción de terrazas es función de las condiciones de suelo resultantes, habiendo diferencias significativas entre las zonas de corte y relleno, y entre las zonas de relleno con mayor o menor profundidad del suelo resultante.

Estos cambios, que afectan a la variabilidad espacial de la respuesta del cultivo, hacen que surja la necesidad de un tratamiento y manejo diferencial (viticultura de precisión), con el fin de poder mejorar el rendimiento y calidad de la uva.

BIBLIOGRAFÍA

COTS-FOLCH, R., MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., RAMOS, M.C., 2006. *Land terracing for new vineyard plantations in the north-eastern Spanish Mediterranean region: Landscape effects of the EU Council Regulation policy for vineyards' restructuring*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 115, 88 - 96.

COTS-FOLCH, R., MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., RAMOS, M.C., 2009. *Agricultural trajectories in a mediterranean mountain region (Priorat, NE Spain) as a consequence of vineyard conversion plans*. Land Degradation & Development, 20, 1 - 13.

RAMOS, M.C., COTS-FOLCH, R., MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 2007. *Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in Northeastern Spain: A multivariate analysis*. Geoderma, 142, 251 - 261.

ROUSE, J. W. JR., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. AND DEERING, D. W. 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.* En: *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 1, U.S. Government Printing Office, Washington DC, pp. 309–317.

AGRADECIMIENTOS

Proyectos CICYT AGL2005-00091/AGR. AGL2009-08353/AGR.

Estimación de las necesidades hídricas del sorgo forrajero a partir del balance de energía y radiometría térmica

J.M. Sánchez[1], R. López-Urrea[2], E. Rubio[1] y V. Caselles[3]

[1] Departamento de Física Aplicada. Universidad de Castilla-La Mancha. Av. España, s/n. 02071 Albacete (España). Correo electrónico: juan.m.sanchez@uclm.es

[2] Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete y FUNDESCAM. Av. Gregorio Arcos, s/n. 02006 Albacete (España).

[3] Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia, C/ Dr. Moliner, 50 46100 Burjassot (España).

RESUMEN

En este trabajo se presenta la radiometría térmica como una herramienta muy útil para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. La estimación de la evapotranspiración real en superficie (ET) puede ayudar a la predicción de las necesidades de riego. Los modelos de balance de energía se presentan como una alternativa a los métodos tradicionales de coeficiente de cultivo. El objetivo de este trabajo es mostrar como la temperatura de superficie se puede usar, junto con un modelo de balance de energía de dos fuentes, para determinar el consumo de agua de un cultivo. Este artículo se centra en las medidas tomadas en un cultivo de sorgo en Barrax (Albacete, centro de España) durante el verano de 2010. Los resultados del modelo STSEB se compararon con las medidas tomadas en un lisímetro de pesada. Se obtuvieron errores de ±0,14 mm h^{-1} y ±1,0 mm d^{-1} a escala horaria y diaria, respectivamente. El consumo de agua por ET acumulado a lo largo de la campaña resultó 500 mm frente a los 524 mm medidos en el lisímetro.

Palabras clave: temperatura de superficie, necesidad hídrica, sorgo, radiómetro.

ABSTRACT

In this work thermal radiometry is shown as a very useful tool for providing crop water necessities. Estimates of surface actual evapotranspiration (ET) can assist in predicting crop water requirements. An alternative to the traditional crop-coefficient methods are the energy balance models. The objective of this research was to show how surface temperature observations can be used, together with a two-source energy balance model, to determine crop water use. This research focuses on the measurements collected in a sorghum field in Barrax (Albacete, Central Spain) during the 2010 summer growing season. Performance of the STSEB model was evaluated by comparison of estimated ET with values measured on a weighing lysimeter. Errors of ±0.14 mm h^{-1} and ±1.0 mm d^{-1} were obtained at hourly and daily scales, respectively. Accumulated crop water use during the campaign resulted 500 mm versus the total 524 mm measured by the lysimeter.

Keywords: *surface temperature, water requirement, sorghum, radiometer.*

INTRODUCCIÓN

Un buen conocimiento de la evapotranspiración real en superficie (ET) es esencial para la gestión y planificación de los recursos hídricos, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la demanda de agua excede a la precipitación y se requiere del riego para cubrir este déficit. En los últimos años, la producción de cultivos energéticos ha suscitado gran interés en regiones como Castilla-La Mancha, donde al mismo tiempo los temas relacionados con el agua y el riego adquieren una especial relevancia. Por este motivo es necesario avanzar en nuestro conocimiento de las necesidades hídricas de estos cultivos.

Uno de los objetivos de este trabajo es mostrar el potencial del Modelo Simplificado de Balance de Energía de Dos Fuentes (STSEB) (Sánchez et al. 2008 y 2009), junto con medidas radiométricas de temperatura de la superficie, para determinar valores precisos de ET bajo distintas condiciones ambientales y de fracción de cobertura. De esta forma, presentamos una técnica simple y eficaz para estimar el consumo de agua a corto y

largo plazo, a partir de radiometría térmica y algunos datos meteorológicos adicionales, que nos sirva de alternativa a las costosas y laboriosas medidas de un lisímetro de pesada, y a los resultados de los tradicionales modelos de coeficiente de cultivo, que requieren de la calibración previa del valor genérico del mismo (Allen et al. 1998).

ZONA DE ESTUDIO Y MEDIDAS

Este estudio se llevó a cabo durante el verano de 2010 en la finca experimental de "Las Tiesas", entre Barrax y Albacete, en la zona centro de España (2º 5´W, 39º 14´N, 695 m altitud) (Figura 1). El clima en esta región es semi-árido, mediterráneo templado con una precipitación media anual de 320 mm, y una temperatura media de 24,0 ºC (López-Urrea et al. 2006).



Figura 1: Localización geográfica de la zona, y fotografía aérea de la parcela experimental.

Se instaló un lisímetro de pesada (López-Urrea et al. 2009) en el centro de una parcela de 100 m × 100 m en la que se sembró sorgo forrajero (*Sorghum bicolor (L)* Moench cv. H-133) el día 27 de Mayo en hileras con orientación N-S, con una separación de 35 cm entre filas de plantas, y una densidad de 21 plantas m^{-2}. De forma periódica a lo largo de la campaña se tomaron muestras de plantas para determinar el Índice de Area Foliar (LAI), la fracción de cubierta vegetal y la altura de cultivo (h), hasta su recolección el día 23 de septiembre. El cultivo se mantuvo en condiciones óptimas de riego gracias a un sistema de riego por aspersión, activado en función de los datos registrados en el lisímetro a intervalos de 15 minutos y con una resolución de 0,04 mm.

A partir del 19 de junio se realizaron medidas de temperatura de la superficie, empleando un radiómetro de infrarrojo térmico (IRT) Apogee SI-211, de banda ancha (6-14 µm), con un campo de visión de 28º, y precisión de ±0,3 ºC, colocado a 2 m sobre la superficie del cultivo en todo momento y con visión vertical (Figura 2). Con un segundo radiómetro, apuntando al cielo con una inclinación de 53º, se registraron las medidas de radiancia de onda larga descendente, necesarias para la corrección atmosférica de las temperaturas (Figura 2). En una estación meteorológica situada en una parcela de césped adyacente se registraron las medidas necesarias de irradiancia solar, radiación incidente de onda larga, velocidad de viento, temperatura del aire y humedad relativa, necesarias para aplicar el modelo STSEB.

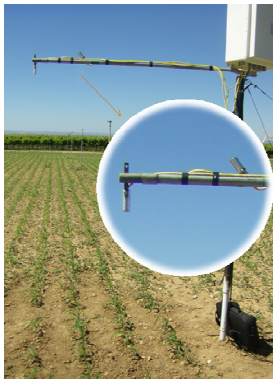


Figura 2: Montaje experimental de los dos IRTs sobre el cultivo de sorgo.

MODELO

El punto de partida del modelo STSEB (Sánchez et al. 2008 y 2009) es la estimación de ET como un término residual de la Ecuación de Balance de Energía (EBE) en el sistema suelo-vegetación-atmósfera:

$$R_n = H + \lambda ET + G \qquad (1)$$

donde R_n es la radiación neta, H es el flujo de calor sensible, λET es el flujo de calor latente, y G es el flujo de calor en el suelo. La temperatura radiométrica efectiva en el mismo sistema, T_R, se obtiene a partir de las temperaturas del suelo, T_s, y de la vegetación, T_c, como:

$$T_R = \left[\frac{P_v \varepsilon_c T_c^4 + (1 - P_v)\varepsilon_s T_s^4}{\varepsilon} \right]^{1/4} \qquad (2)$$

donde P_v es la fracción de cubierta vegetal, y ε_s, ε_c, y ε son las emisividades del suelo, la vegetación, y efectiva, respectivamente. A partir de las medidas de T_R, y de los valores de radiación

registrados en la estación meteorológica colindante, se obtuvieron los valores de R_n mediante un balance de radiación de onda larga y onda corta. El cálculo de H fue posible gracias, además, de las medidas de velocidad del viento y temperatura del aire, T_a. Finalmente, los valores de G se obtuvieron a través de una relación directa con R_n. De acuerdo con este esquema, la suma de las contribuciones parciales del suelo y la vegetación a los flujos totales viene también ponderada por sus respectivas áreas parciales de ocupación (ver esquema de ecuaciones y todos los detalles del modelo STSEB en Sánchez et al. 2008 y 2009).

RESULTADOS

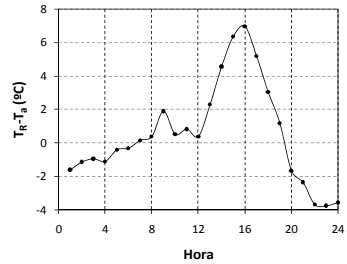
Temperaturas radiométricas

El desarrollo del sorgo fue espectacular durante las primeras semanas de crecimiento, alcanzando una fracción de cobertura completa (P_v=1) ya en el día juliano 200. Bajo estas condiciones de cobertura completa, el esquema de dos fuentes del STSEB se reduce al de una sola fuente, la transpiración es la responsable de la práctica totalidad de la ET del cultivo, que además se convierte en el flujo dominante del término derecho de la Ecuación (1). Como no se tomaron medidas directas de la temperatura del suelo, para condiciones de cobertura parcial, asumimos T_c~T_a, mientras que los valores de T_s se obtuvieron de la Ecuación (2) y a partir de las medidas de T_R. Las medidas de los Apogee se corrigieron de los efectos de emisividad y de la atmósfera empleando la ecuación de transferencia radiativa adaptada a medidas de superficie (Sánchez et al. 2008).

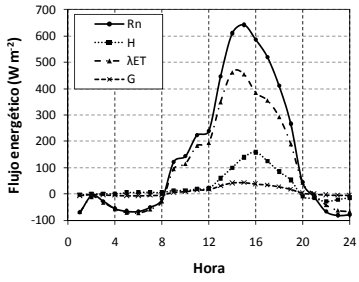
Los valores de temperatura de la superficie son generalmente más elevados a los de temperatura del aire durante las horas centrales del día, si bien esta diferencia es mínima en condiciones de cobertura completa (<1 ºC). Durante la noche, se observa una inversión térmica y la temperatura de la superficie es entre 2 y 3 ºC inferior a la del aire, diferencia que aumenta durante los episodios de lluvia o riego (ver ejemplo en Figura 3a).

Resultados de ET

La Figura 3b muestra un ejemplo de la evolución diurna de los flujos energéticos incluidos en la Ecuación (1). Para nuestro periodo de estudio la mayor parte de la energía se destina a *ET*, siendo *H* el término dominante en las primeras semanas después de la siembra, cuando P_v era todavía muy baja.



(a)



(b)

Figura 3: (a) Evolución diurna del gradiente entre la temperatura del sorgo y la del aire para el día juliano 185. (b) Evolución diurna de los flujos energéticos sobre el sorgo para el día juliano 185.

Un total de más de 1000 datos (medias horarias entre las 7-21 h) sirvieron para validar los resultados de ET obtenidos a escala horaria (Figura 4a). Se observó un error de estimación cuadrático medio de ±0,14 mm h^{-1}, con una desviación sistemática prácticamente nula.

La capacidad del modelo para predecir valores diarios de ET se puede comprobar en la Figura 4b. Los resultados obtenidos subestiman en 0,3 mm d^{-1} las medidas del lisímetro, con un error cuadrático medio de ±1,0 mm d^{-1}. Este error es aceptable, teniendo en cuenta que ±0,6 mm d^{-1} corresponden al error sistemático.

Finalmente, la Figura 5 muestra la evolución de los valores acumulados de ET a lo largo de la campaña. Para los 75 días de estudio el modelo predijo un total de 500 mm frente a los 524 mm acumulados en el lisímetro, lo que supone una subestimación inferior al 5%.

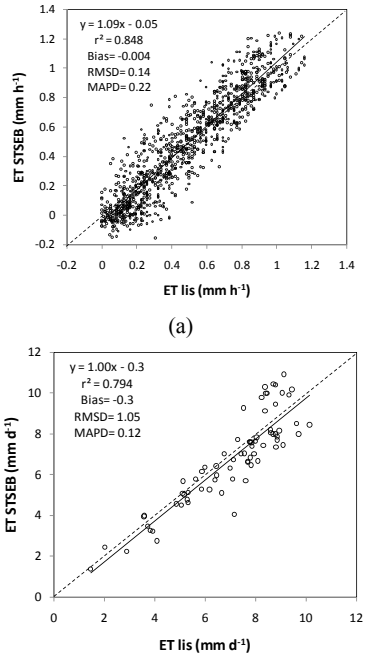


Figura 4: Ajuste lineal entre los valores calculados y observados de ET a escala horaria (a) y diaria (b).

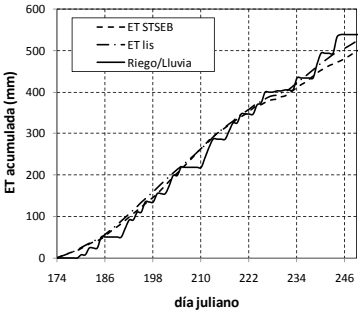


Figura 5: Valores acumulados de ET, estimados y observados, a lo largo de la campaña. También se incluyen los aportes externos de agua (lluvia+riego).

CONCLUSIONES

La medida de la temperatura radiométrica de un cultivo permite, junto con un modelo de balance de energía, calcular de forma precisa las pérdidas de agua por evapotranspiración que experimenta y posibilita, por tanto, una planificación de los riegos ajustada al máximo a las necesidades hídricas de dicho cultivo. Los resultados sobre el sorgo muestran errores medios del 22 y 12% para la estimación de los valores de ET horarios y diarios, respectivamente. Estos buenos resultados confirman al balance de energía de dos fuentes como una técnica alternativa para determinar la evapotranspiración real a corto y largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. In: Proceedings of the Irrigation and Drainage Paper No.56. Food and Agricultural Organization, United Nations, Rome, Italy.

LÓPEZ-URREA, R., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., and MORATALLA, A., 2006. *Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate*. Agric. Water Manage., 85, 15–26.

LÓPEZ-URREA, R., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F, MONTORO, A, and LÓPEZ-FUSTER, P., 2009. *Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (Allium cepa L.) under semiarid conditions*. Agric. Water Manage., 96(6), 1031–1036.

SÁNCHEZ, J. M., KUSTAS, W. P., CASELLES, V., and ANDERSON, M., 2008. *Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations*. Remote Sensing of Environment, 112, 1130-1143.

SÁNCHEZ, J.M., CASELLES, V., NICLÒS, R., COLL, C., KUSTAS, W.P., 2009. *Estimating energy balance fluxes above a boreal forest from radiometric temperature observations*. Agricultural and Forest Meteorology, 149, 1037-1049.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyectos AGL2009-13124 CGL2010-17577 y CSD2008-00040 y contrato Juan de la Cierva del Dr. J.M. Sánchez), Generalitat Valenciana (Proyecto PROMETEO/2009/086) y JCCM (Proyecto PEIC11-0170-8185). Los autores agradecen el apoyo logístico prestado en el mantenimiento de la instrumentación por Laura Martínez, Ángel García y Miguel Gómez.

Generación de compuestos sin nubes Landsat semanales para el Plan Nacional de Teledetección

G. Villa[1], J. Moreno[2], A. Calera[3], X. Pons[4], S. Molina[6], J. Amorós-López[2], G. Camps-Valls[2], J. Garrido[3], J. González-Matesanz[1], L. Gómez-Chova[2], J.A. Martínez[1], J.J. Peces[1], Ll. Pesquer[5], N. Plaza[1], A. Porcuna[6] y J.A. Tejeiro[1]

[1] Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. c/ General Ibáñez de Ibero, 3. 28003 Madrid. E-mail: gmvilla@fomento.es;

[2] Image Processing Laboratory (IPL). Universitat de València;

[3] Instituto de Desarrollo Regional (IDR). Universidad de Castilla-La Mancha;

[4]. Dept. Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB);

[5] Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) (UAB); [6] Tecnologías y Servicios Agrarios (TRAGSATEC)

RESUMEN

El principal obstáculo que ha tenido la teledetección desde sus inicios para que aplicaciones potenciales o teóricas se conviertan en operacionales, ha sido la dificultad de disponer de imágenes libres de nubes de toda la zona de trabajo con la periodicidad y las fechas adecuadas para cada aplicación. En este artículo se propone una metodología para paliar este problema, aplicable tanto a datos actuales como históricos y futuros, de Landsat así como de muchos otros sensores.

Palabras clave: integración de datos, multisensor, downscaling, interpolación, series temporales, compuestos sin nubes.

ABSTRACT

The main problem of remote sensing to transform potential applications into operational, has always been the difficulty to get cloud free images of the working area with the adequate frequency and of the adequate dates for each application. In this paper, we propose a methodology to overcome this problem, which can be used for present, as well as historical, data of Landsat satellites and many other sensors.

Keywords: *data integration, data fusion, multisensor, downscaling, interpolation, multi-temporal series, cloudless composites.*

INTRODUCCIÓN

El Plan Nacional de Teledetección (PNT) pone a disposición de los organismos de las Administraciones Públicas españolas todas las imágenes captadas sobre nuestro territorio por el sensor Thematic Mapper de Landsat 5, independientemente de su cobertura nubosa. Esto tiene la ventaja de que cualquier punto del terreno aparece libre de nubes en la serie anual un número de veces suficiente para permitir estudios multitemporales de vegetación, hidrología y otros. (ver Figura 1). Diversos grupos de teledetección de nuestro país han desarrollado técnicas avanzadas para el análisis multitemporal de estas series de imágenes, en aplicaciones tales como asesoría de regadíos, gestión del uso del agua y otras, haciendo uso de lo que podemos llamar "signaturas temporales" (CALERA et al, 2010).

Sin embargo, la gran mayoría de los algoritmos utilizados hoy en día necesitan como entrada una secuencia de imágenes de un mismo sensor y libre de nubes en toda la superficie de trabajo. Si queremos que estos algoritmos se puedan aplicar a una zona amplia (eventualmente toda España) y no sólo a una pequeña zona piloto, resulta muy conveniente generar compuestos sin nubes (CSN), similares a los que se obtienen rutinariamente para sensores de alta frecuencia temporal como por ej. MODIS.

El problema es que la frecuencia temporal de Landsat no es suficiente para permitir deducir correctamente en todos los casos los valores radiométricos de los píxeles cubiertos por nubes.

Para eludir este problema, intentaremos combinar la información radiométrica de Landsat con la de otros sensores, aunque estos tengan distinta resolución espacial y configuración espectral. En particular, sensores de baja resolución espacial como MODIS o MERIS, pueden aportar la frecuencia temporal que le falta a la serie Landsat, pero para ello necesitamos una técnica que nos permita integrar toda esta información radiométrica diversa.

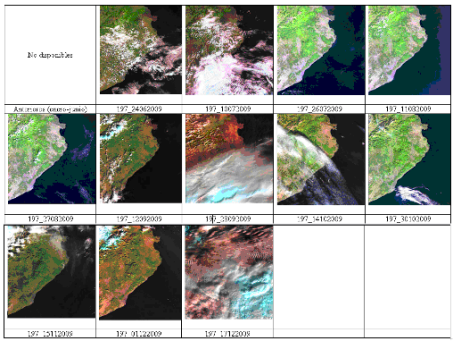


Figura 1: imágenes TM 197-31 en 2009

METODOLOGÍA

La metodología propuesta se basa en el concepto de STRS (Spectro-Temporal Reflectance Surfaces) (VIEIRA et al, 2000) combinado con otras técnicas existentes tales como: "downscaling" espacial, "spectral unmixing", interpolaciones espectrales y temporales, intercalibración de series de imágenes y otras, en un marco conceptual integrador de todas ellas, para permitir su utilización conjunta y sinérgica.

Concepto de STRS

Cada "píxel del terreno" o "ground cell" (GC en adelante) en un instante dado, queda representado por su "signatura espectral:

$$\rho = \rho(\lambda)$$

donde: ρ= reflectancia; λ= longitud de onda.

Por otra parte, la reflectancia de la superficie de la tierra puede cambiar constantemente en el tiempo debido a la evolución de la vegetación natural y los cultivos, actuaciones humanas como labores agrícolas, actividades de extracción, construcción o vertidos, etc… En consecuencia, las signaturas espectrales también pueden ser variables en el tiempo. Por tanto, la caracterización más adecuada de un GC no es una curva sino una superficie:

$$\rho = \rho(\lambda, t)$$

donde: t= tiempo (en días julianos)

Esta función es la "superficie espectro-temporal de reflectancias ("Spectro Temporal Reflectance Surface"), STRS en adelante (ver Figura 2).

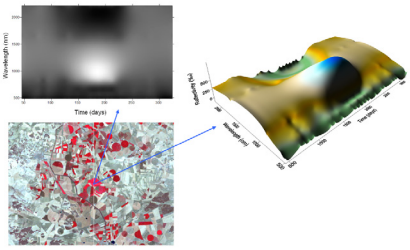


Figura 2: STRS de un GC en una parcela de maíz. Arriba: visualizada como imagen; derecha: visualizada como superficie

El objetivo es determinar o "reconstruir" lo más exactamente posible dicha STRS, para cada uno de los GC de nuestro ámbito (espacial y temporal) de estudio. Para ello, lógicamente, tenemos que partir de las imágenes disponibles. Cada píxel libre de nubes nos proporciona, en principio, un punto de dicha STRS por cada una de las bandas del sensor. Como las imágenes disponibles nos proporcionan puntos aislados en el tiempo de dicha STRS, habrá que implementar estrategias de interpolación para completar la superficie STRS de cada GC, ajustando una superficie por métodos de interpolación bidimensional tales como: polinomios, splines, mínima curvatura, etc… (GONZÁLEZ-MATESANZ, 2007). Como la densidad temporal de una serie Landsat 5 no es, en general, suficiente para que dicha interpolación proporcione resultados correctos, nos proponemos utilizar series MODIS y MERIS de la misma zona y época para salvar los huecos excesivamente grandes en la secuencia temporal Landsat. El flujo de trabajo propuesto se compone de las siguientes fases:

1) Precorrección de series MODIS, MERIS y Landsat: paso de niveles digitales (DN) a reflectancias "normalizadas", libres de efectos ajenos al propio GC: cálculo de radiancias TOA, máscaras de nubes, bruma, sombras de nubes y nieve, corrección geométrica, atmosférica y topográfica, corrección de efectos direccionales (BRDF), etc. 2) Generación de series de CSN MODIS, MERIS y Landsat por separado, mediante interpolación espectro-temporal en cada serie, ignorando los valores inútiles de los píxeles enmascarados) 3) Densificación de las series MODIS y MERIS a la resolución submúltiplo de Landsat más próxima (25m): se propone usar la técnica de

"downscaling espacial" (ZURITA-MILLA et al, 2008; AMOROS, 2010). Esta técnica aplica un "unmixing" espacial que permite combinar la información de los distintos sensores para obtener una imagen sintética con la resolución espacial de Landsat pero con la información radiométrica proporcionada por MERIS o MODIS para una determinada fecha.

4) Intercalibración de la serie de CSN Landsat con las series MODIS y MERIS densificadas: para esta fase proponemos utilizar la misma técnica que se aplica en el equilibrado radiométrico de las coberturas SPOT 5 del PNT: aplicando a cada banda una ganancia y un bias calculados utilizando como referencia la imagen MODIS de la misma fecha (VILLA y MONTORO 1993, XANDRI, et al. 2005; TEJEIRO, 2010); 5) Interpolación espectro-temporal conjunta de ambas series con detección y eliminación de errores groseros. Los valores procedentes de "downscaling" tendrán menor peso en el ajuste, por ser menos precisos que los valores Landsat reales; 6) Detección de cambios bruscos e introducción de "breaklines" en las STRS; 7) Filtrado de errores aleatorios; 8) Síntesis de la serie Landsat a partir de la STRS de cada GC; 9) Comparación de la serie Landsat sintetizada con las imágenes de entrada y evaluación de la precisión (residuos, error estimado, calidad visual,...) especialmente en zonas de solape entre dos órbitas Landsat.

RESULTADOS

En este trabajo se presentan resultados preliminares y parciales de cada una de las fases que integran el flujo propuesto en el apartado 2. Los resultados obtenidos por ahora son prometedores y actualmente se está avanzando en su integración y validación en las dos zonas de test: i) Dentro de la zona de solape de los frames 197-31 y 198-31, se ha elegido un área de 30 x 30 Km, en un paisaje semimontañoso y predominantemente boscoso localizado en las comarcas de Osona y Ripollès. La ventana temporal elegida es el año 2009. De esta zona hay disponibles 21 escenas TM y 15 ETM+. ii) En la zona de solape de los frames 199-33 y 200-33, una zona llana de la provincia de Albacete, de clima semiárido, con uso predominantemente agrícola, con grandes áreas en regadío de alta dinámica temporal de acuerdo con sus ciclos de crecimiento anuales. De esta zona se dispone de 22 escenas TM.

En la Figura 2 se muestra la STRS de un GC perteneciente a una parcela de maíz, calculada a partir de una la serie temporal Landsat 5, mediante interpolación espectro-temporal por el método de mínima curvatura: se aprecia la variación de la reflectancia de la banda 4 (NIR) a lo largo del año y su alto valor durante el verano. En la Figura 3 se muestra la generación de un compuesto sin nubes por interpolación temporal en la serie Landsat TM de imágenes parcialmente nubosas. En las siguientes direcciones se pueden ver películas de dos fragmentos de la zona test de de La Mancha, generadas sintéticamente por interpolación en la serie Landsat:
http://www.youtube.com/watch?v=Lm6A61A2Z4w
http://www.youtube.com/watch?v=YBtSnbvojtE

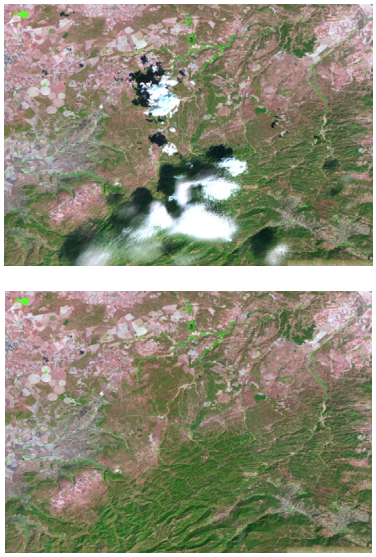


Figura 3: Arriba: imagen Landsat TM con nubes; abajo: imagen con las nubes eliminadas por interpolación temporal

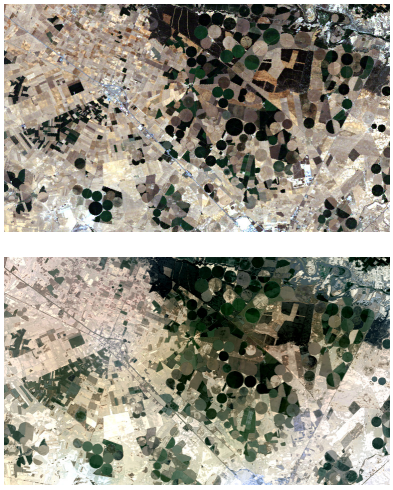


Figura 4: Arriba: imagen adquirida por Landsat; abajo: imagen MERIS densificada

En la Figura 4 se muestra la comparación de una imagen Landsat real, con la correspondiente sintetizada a partir de MERIS mediante downscaling espacial.

CONCLUSIONES Y APLICACIONES

En la aplicación operacional de la Teledetección siempre se ha adolecido de la escasez de datos radiométricos adecuados. A pesar de los avances de futuras constelaciones de satélites, que serán capaces de proporcionar alta frecuencia temporal al mismo tiempo que una buena resolución espacial y espectral. (Ej: SENTINEL 2 de la ESA), el gran ancho de traza de estos sensores conllevará con seguridad que gran parte de las imágenes estén total ó parcialmente cubiertas por nubes. Por otra parte, para estudios históricos (algunos de los cuales son tan importantes como el control del cumplimiento del Protocolo de Kioto), las únicas imágenes disponibles serán las que ya figuran en los archivos, para las cuales la metodología propuesta permitirá utilizar muchas de las imágenes que actualmente se descartan por su elevado porcentaje de nubes.

El análisis STRS deberá permitir "reciclar", integrar y sacar partido a la enorme cantidad de datos radiométricos aparentemente incoherentes procedentes de los distintos sensores que se han lanzado hasta ahora, y los que se van a lanzar en el futuro. Algunas aplicaciones del análisis STRS pueden ser: clasificaciones "dinámicas" (ej: de un cultivo a suelo desnudo y a otro cultivo), evolución de parámetros biofísicos, intercalibración de sensores, detección de cambios en el uso del suelo, pansharpening (que, como un caso particular de downscaling debería beneficiarse del concepto STRS), etc.

Una aplicación muy interesante para España sería la integración de las imágenes del futuro satélite óptico español INGENIO, con 2.5 m de resolución en pancromático y 10 m en VNIR con las imágenes SENTINEL 2 de 10/20/60 m, disponibles cada 5 días, para obtener compuestos sin nubes de 2.5 m de GSD, que deben ser muy útiles para muchas aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

AMORÓS-LÓPEZ, J., GÓMEZ-CHOVA, L., GUANTER, L., ALONSO, L., MORENO, J., and CAMPS-VALLS, G., 2010, *Regularized multiresolution spatial unmixing for MERIS and Landsat image fusion*, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, submitted in 2010.

CALERA, A, ODI, M; MARTINEZ-BELTRAN, C; CAMPOS,I; GONZALEZ-PIQUERAS, J. 2010 *Satellite constellation for crop monitoring: Formosat-2; Deimos-DMC, Landsat 5-TM and Landsat 7-ETM+*. RAQRS 2010. Valencia.

GONZÁLEZ-MATESANZ, J., 2007, *Aportaciones al estudio de los modelos de distorsión para el cambio de datum entre ED50 y ETRS89*. Phd. thesis, Universidad de Alcalá.

TEJEIRO, J.A, 2010, *Procedimiento operativo estándar. Plan Nacional de Teledetección. Procesado básico alta resolución*. IGN.

VIEIRA, C. A. O., MATHER, P. M., and MCCULLAGH, M., 2000, *The Spectral-Temporal Response Surface and its use in the multi-sensor, multi-temporal classification of agricultural crops*. In ISPRS: IAPRS, v. 33, Amsterdam, The Netherlands, Part B2.

VILLA, G., MORENO, J., CALERA, A., AMORÓS, J., CAMPS, G., DOMENECH, E., GARRIDO, J., GONZÁLEZ-MATESANZ, J., GÓMEZ-CHOVA|, L, MARTÍNEZ, J.A., MOLINA, S., PECES, J.J., PLAZA, N., PORCUNA, A., TEJEIRO, J.A. y VALCÁRCEL, N., "*STRS: a new conceptual framework for the integration of remote sensing data from multiple different sensors*". RAQRS 2010. Valencia.

VILLA, G., MONTORO, M.A., *Ajuste radiométrico conjunto de varias imágenes de satélite para la realización de mosaicos de ortoimágenes,*V Reunión de la Asociación Española de Teledetección. Las Palmas, 1993.

XANDRI, R., PÉREZ, F., PALÀ, V., ARBIOL, R., 2005b. *Automatic Generation of Seamless Mosaics over Extensive Areas from High Resolution Imagery*. World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI). Orlando, USA.

ZURITA-MILLA, R., CLEVERS, J., and SCHAEPMAN, M.E, 2008, *Unmixing-based landsat TM and MERIS FR data fusion*, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE.

BOSQUES

Técnicas de teledetección para la evaluación del inventario forestal de la isla de Tenerife

A. Alonso-Benito, M. Arbelo, P. Hernández-Leal y A. González-Calvo

Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Departamento de Física F. E. Universidad de La Laguna. Av. Astrofísico Francisco Sánchez, s/n. 38206 San Cristóbal de La Laguna. Tel: 922318248, Fax: 922318228. Correo electrónico: aaloben@ull.es

RESUMEN

En este estudio se evaluó el potencial de las imágenes del sensor TERRA-ASTER para estimar diferentes variables dasométricas en la superficie forestal de la isla de Tenerife (Canarias). Las variables dasométricas objeto de estudio fueron: volumen con corteza (VCC), área basimétrica (AB), pies por hectárea (N), altura del árbol (H) y fracción de cabida cubierta (FCC). Todas ellas, referidas exclusivamente a las masas puras de Pino Canario (*Pinus canariensis L.*). Se tomaron como valores de referencia los datos proporcionados por el III Inventario Forestal Nacional realizado a finales de 2002. Los datos de satélite se corresponden con una imagen adquirida en marzo de 2003. Se analizaron diferentes combinaciones de las bandas VNIR y SWIR del ASTER, las componentes principales del visible y del infrarrojo próximo y nueve índices de vegetación. En general, los resultados mostraron que la resolución espacial y espectral del sensor ASTER resulta adecuada para estimar algunos de los parámetros estructurales considerados, si bien se deben reconocer sus limitaciones, especialmente en relación con la altura de los árboles. Los mejores resultados se obtuvieron para VCC y AB, con coeficientes de correlación superiores al 84%, mientras que la H sólo pudo ser explicada en un 40% de los casos.

Palabras clave: ASTER, Tenerife, III Inventario Forestal Nacional, dasometría.

ABSTRACT

The potential of Terra-ASTER sensor images to estimate several forest variables in the forest area of Tenerife (Canary Islands) has been evaluated. The forest variables under consideration were: stem wood volume with bark (VCC), basal area (BA), stems per hectare (N), tree height (H) and canopy cover (FCC). All of them refer only to pure stands of Canary Island pine (Pinus canariensis L.). Data provided by the III National Forest Inventory conducted in late 2002, were taken as reference values. Satellite data correspond with an image acquired in March 2003. Different combinations of VNIR and SWIR bands of ASTER, the main components of these bands and nine vegetation indices were analyzed. The results showed that the spatial and spectral resolution of ASTER sensor data is suitable to estimate some of the considered structural parameters, although some limitations arise, especially in relation to the height of trees. The best results were obtained for DC and AB, with correlation coefficients above 84%, while the H could be explained only in a 40% of the cases.

Keywords: *ASTER, Tenerife Island, III national forestry inventory, multiple regression.*

INTRODUCCIÓN

Los gestores forestales necesitan tener una información detallada y precisa de aquellos parámetros que definen el estado y cantidad de una masa forestal. Durante los últimos 100 años, la dasonomía se ha realizado mediante trabajos de campo, los cuales son costosos y conllevan mucho tiempo. Con el desarrollo de la teledetección en esta primera década del siglo XXI, estos parámetros forestales podrían ser adquiridos de forma rápida y precisa, permitiendo la realización de actualizaciones y facilitando la integración de los mismos, con sistemas de información geográfica. Algunos trabajos en este sentido son Trotter *et al*. (1997), Gebreslasie *et al*. (2010), Ärdo (1992) y Muukkonen & Heiskanen (2007).

El objetivo del presente trabajo, es analizar las posibles relaciones funcionales entre variables forestales en masas puras de pino canario y la información obtenida de imágenes del sensor ASTER, mediante técnicas estadísticas.

DATOS Y METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio fue la Isla de Tenerife (Figura 1) ubicada entre los 28º 35' y 27º 58'de latitud norte y los 16º 06' y 18º 56' de longitud oeste, y con una extensión de 2.035 km^2.

El pinar canario ocupa la franja de terreno situada entre 700 y 2.000 m.s.n.m., y está sometida a distintas situaciones climáticas características, desde el mar de nubes a unos 1.000 m.s.n.m., hasta condiciones de clima alpino (2.000 m.s.n.m.), formando un pinar húmedo en la vertiente norte de la isla, y un pinar seco en la sur, claramente diferenciables.

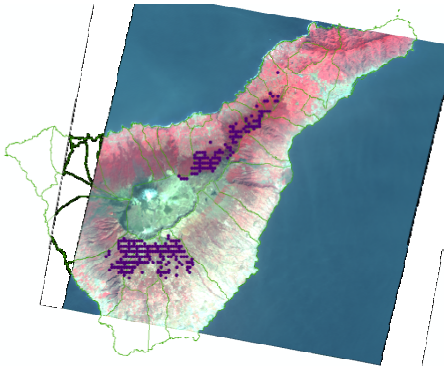


Figura 1: Imagen ASTER de la zona de estudio (RGB= 321). Los puntos de color violeta son las parcelas usadas.

Datos de campo

Los datos de campo provienen del III Inventario Forestal Nacional (IFN3) realizado en el segundo semestre de 2002. De las casi 1000 parcelas que se encuentran en la Isla de Tenerife, el 81% tienen presencia de pino canario, pero sólo un 34% son consideradas como masas puras. De este 34%, se eligieron aleatoriamente 137 parcelas situadas en ambas vertientes, 97 se usaron para obtener los modelos de regresión, y 40 para la validación.

Datos de satélite

Se procesó una imagen ASTER Level 1B del 3 de marzo de 2003. Las bandas del SWIR se convirtieron a 15 m mediante convolución cúbica, para formar una única imagen con 9 bandas (VNIR+SWIR), la cual se georeferenció y ortorectificó a la proyección UTM WGS 84 zona 28N. Se realizó una corrección topográfica mediante el método corrección-c, usando un MDT obtenido a partir de la cartografía 1:5.000 disponible de la zona. Y, se realizó una corrección para reducir el efecto *crosstalk* de las bandas 5 y 9 del SWIR.

Se evaluaron las 9 componentes principales, para analizar su relación con los parámetros forestales, seleccionando sólo las correspondientes a las bandas del VNIR. Así mismo, se calcularon nueve índices de vegetación: índice de vegetación diferencia normalizada (NDVI), índice simple de vegetación (SVI), índice de vegetación modificado con ajuste por efecto del suelo (MSAVI), índice mejorado de vegetación adaptado a ASTER (EVI2), índice de vegetación con ajuste por efecto del suelo (SAVI), índice de vegetación perpendicular (PVI), índice de vegetación transformado con ajuste por efecto del suelo (TSAVI), índice diferencial de agua normalizado (NDWI) e índice infrarrojo de diferencia normalizada (NDII), estos dos últimos adaptados a ASTER.

Extracción de datos espectrales

Tomando el centro de cada parcela del IFN3, se seleccionó una ventana de 5x5 píxeles, obteniendo los valores medios que se usaron como datos de entrada en los modelos de regresión (Heiskanen, 2006).

Análisis estadístico

La información final, compuesta por 21 variables independientes (datos espectrales) y 5 variables dependientes (parámetros forestales) para las 97 parcelas de entrenamiento, se utilizó en busca de una regresión lineal, con un máximo de tres variables, que explicara la relación entre los datos del inventario y los espectrales.

Se aplicaron los siguientes métodos de regresión lineal múltiple: eliminación progresiva (Backward Stepwise), introducción progresiva (Fordward Stepwise) y paso a paso (Stepwise). Todos los modelos se han analizado al nivel de probabilidad del 95% ($P<0,05$).

RESULTADOS

De los tres tipos de regresión lineal múltiple estudiados, el método de paso a paso es el que ha aportado mejores resultados. De forma que para la altura (Ecuación 1), el modelo de regresión múltiple basado en las bandas 3, 4 y el índice

NDII, presenta un R^2= 0,38; con un RMSE de 3,67 m. Analizando la Figura 1, se observa que cuanto menor es la altura, el modelo subestima, y al contrario, cuanto mayor es la altura, el modelo sobrestima.

$$H = 3{,}1886 - 137{,}8513 * B3 + 150{,}0905 * B4 + 44{,}3728 * NDII \quad (1)$$

Para la densidad de pies por hectárea (Ecuación 2), el modelo de regresión múltiple basado en las bandas 4, 6 y la tercera componente principal, presenta un R^2= 0,44; con un RMSE de 137 pies/ha. Si vemos la Figura 2, sólo en el 10% de las parcelas de validación, el modelo subestima, en el resto de parcelas, cuanto mayor es la densidad de pies, mayor es la sobreestimación.

$$N = 153{,}2964 - 7.410{,}09914 * B4 + 10.032{,}7486 * B6 - 5.763{,}2357 * PCAB3 \quad (2)$$

Para el área basimétrica (Ecuación 3), el modelo de regresión múltiple basado en los índices NDVI, EVI2 y NDII, presenta un R^2= 0,84; con un RMSE de 3,42 m^2/ha. De la Figura 3 podemos deducir que en el 15% de las parcelas, el área basal se sobreestima (sobre todo con valores situados entre 10 y 20 m^2/ha), en el resto de parcelas se subestima el valor, siendo más acusado en el mismo rango anterior.

$$AB = 6{,}7608 - 33{,}3575 * NDVI + 32{,}3560 * EVI2 + 56{,}5850 * NDII \quad (3)$$

Para el volumen con corteza (Ecuación 4), el modelo de regresión múltiple basado en los índices NDVI, SVI y NDII, presenta un R^2= 0,85; con un RMSE de 30,333 m^3/ha. Observando la Figura 4, podemos decir que a menor volumen, mayor es la subestimación (sobre todo, alrededor de valor de 100 m^3/ha), por contrario, cuanto mayor es el volumen, el modelo sobreestima.

$$VCC = -70{,}8238 - 1.158{,}8286 * NDVI + 216{,}9068 * SVI + 388{,}0183 * NDII \quad (4)$$

Para la fracción de cabida cubierta (Ecuación 5), el modelo de regresión múltiple basado en las bandas 1, 2 y el índice PVI, presenta un R^2= 0,61; con un RMSE de 10,7%. Si vemos la Figura 5, el modelo subestima con valores pequeños de FCC, y a mayor FCC, el modelo subestima y sobreestima por igual.

$$FCC = 34{,}0181 + 1.942{,}5320 * B1 - 1.852{,}9484 * B2 + 33{,}6719 * PVI \quad (5)$$

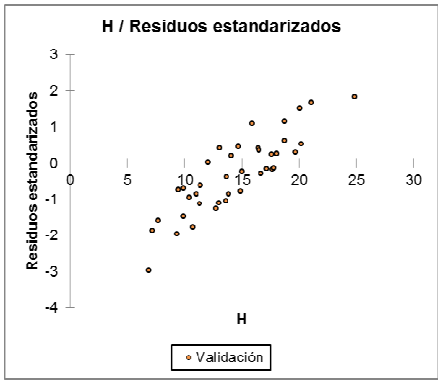


Figura 1: Residuos en función de los valores de altura.

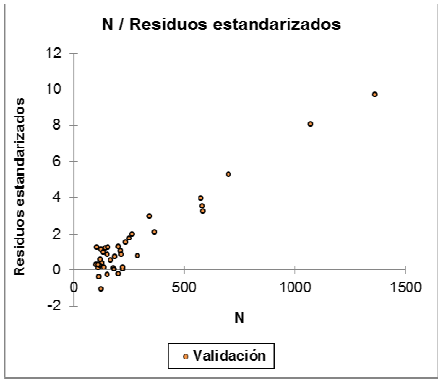


Figura 2: Residuos en función de los valores de densidad de pies.

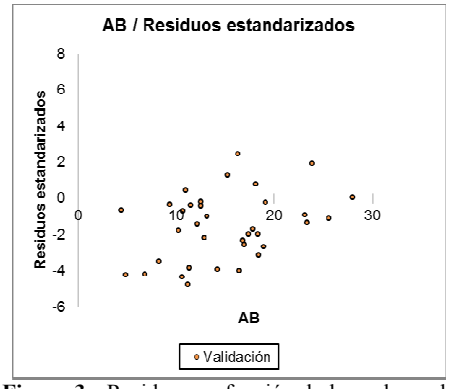


Figura 3: Residuos en función de los valores de área basimétrica.

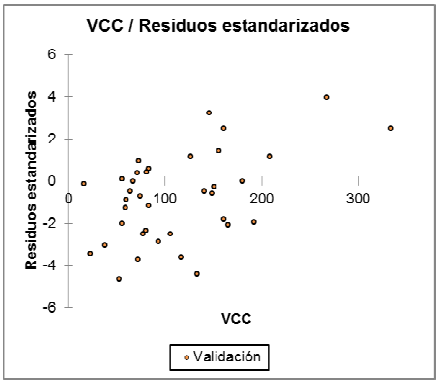


Figura 4: Residuos en función de los valores de volumen con corteza.

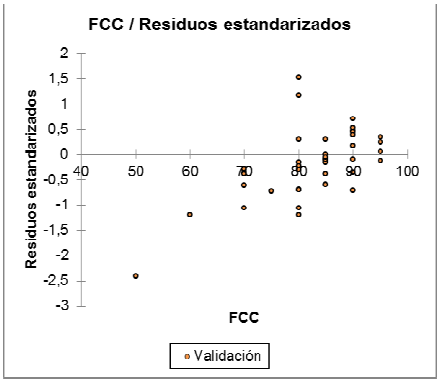


Figura 5: Residuos en función de los valores de fracción de cabida cubierta

CONCLUSIÓN

La resolución espacial y espectral del sensor ASTER resultó adecuada para estimar algunos de los parámetros estructurales del bosque de pino canario, Sin embargo, existen limitaciones, principalmente en relación con la altura de los árboles. En cuanto al volumen con corteza y el área basimétrica, los resultados se pueden considerar satisfactorios, con coeficientes de correlación cercanos al 85%.

BIBLIOGRAFÍA

ARDÖ, J., 1992. *Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper*. International Journal of Remote Sensing, 13: 9, 1779 — 1786.

GEBRESLASIE, M.T., AHMED, F. and VAN AARDT, J.A., 2010. *Predicting forest structural attributes using ancillary data and ASTER satellite data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12S, 2010, pp. S23-S26.

HEISKANEN, J., 2006. *Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data*. International Journal of Remote Sensing 27: 1135–1158.

MUUKKONEN, P. and HEISKANEN, J., 2007. *Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories*. Remote Sensing of Environment, 107: 617–624.

TROTTER, C.M., DYMOND, J.R. and GOULDING, C.J., 1997. *Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM*. International Journal of Remote Sensing 18: 10, 2209 — 2223.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto SATELMAC del PCT-MAC 2007-2013 co-financiado con fondos FEDER de la Unión Europea y el proyecto CGL2010-22189-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Determinación de la temperatura de la superficie forestal de Tenerife usando datos de radiometría infrarrojo-térmica

M. Arbelo, A. Barreto, P. A. Hernández-Leal y A. González-Calvo

Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Departamento de Física F. E. E. S. Universidad de La Laguna. Avda. Astrof. Fco. Sánchez s/n. 38206 La Laguna (Tenerife, Canarias, España). Correo electrónico: marbelo@ull.es

RESUMEN

Se proponen dos algoritmos para obtener la temperatura de la superficie forestal con datos ASTER: un algoritmo multibanda (MB) y un modelo aditivo generalizado (MAG). Los algoritmos se determinaron mediante simulación con MODTRAN. Se dispuso de 524 perfiles atmosféricos libres de nubes, 381 diurnos y 143 nocturnos, lanzados desde la estación de la AEMET en Tenerife. Estos algoritmos se aplicaron al bosque de pino canario del Parque Natural de la Corona Forestal. El algoritmo MAG mostró mejores resultados que el MB, tanto para día como para noche. La temperatura forestal estimada por estos algoritmos, se comparó con el producto estándar AST-08 obtenido a partir del algoritmo TES y dependiente de las condiciones atmosféricas. MAG presenta resultados similares a TES pero con una metodología mucha más sencilla e independiente de la información atmosférica.

Palabras clave: temperatura, bosques, ASTER, corrección atmosférica, emisividad.

ABSTRACT

This study proposes an approach to obtain forest surface temperature by means of ASTER multiband algorithms: a multiband (MB) linear model and a Generalized Additive Model (GAM). The algorithms are obtained from simulated atmospheric data using MODTRAN and 524 (381 day-time and 143 night-time) atmospheric soundings launched by AEMET in Tenerife, Spain. These algorithms have been applied to a fully vegetated forest covered with Pinus canariensis. GAM algorithm showed improved residual statistics with respect to the MB both for night and day. Differences between ASTER Product (AST-08) and GAM are in the order of the standard performance of ASTER TES algorithm.

Keywords: *temperature, forest, ASTER, atmospheric correction, emissivity.*

INTRODUCCIÓN

La temperatura de la superficie forestal (*TSF*) es un parámetro clave en multitud de estudios medioambientales, tanto para la estimación del balance de energía a nivel superficial como para el desarrollo de índices de riesgo de incendios que conformen una herramienta eficaz para su alerta anticipada (Hernández-Leal *et al.,* 2008). Los datos proporcionados por los sistemas remotos en el Infrarrojo Térmico (IRT) proporcionan una oportunidad única para determinar la temperatura de la superficie terrestre con una adecuada precisión y resolución espacial, permitiendo obtener esta variable tanto a nivel regional como global. Entre los distintos sensores remotos, el sensor ASTER destaca por su capacidad multiespectral, con cinco canales dentro del intervalo del IRT, y una resolución espacial de 90 m. El proyecto ASTER ofrece a los usuarios una serie de productos, entre los que destacan el AST-08, que proporciona información de la temperatura de la superficie terrestre (*TST*). Éste se obtiene por medio del algoritmo de Separación de Temperatura y Emisividad (TES) desarrollado por Gillespie *et al*., (1998), que usa una relación empírica para predecir el mínimo en la emisividad superficial (ε_{min}) a partir del contraste espectral. Con esta metodología se puede obtener la temperatura y emisividad superficial con una precisión de ±1.5 K y ±0.015, respectivamente. Sin embargo, tal y como muestran Barreto *et al*., (2010), existen discrepancias en la emisividad obtenida a través de esta metodología para el caso de superficies de bajo contraste espectral, como es el caso de la superficie del mar o superficies vegetales. Estas diferencias tienden a amplificar cualquier error externo, como los que pudieran

ser introducidos en el proceso de calibración del sensor, de corrección atmosférica o en los procesos de medición *in situ* de las variables superficiales.

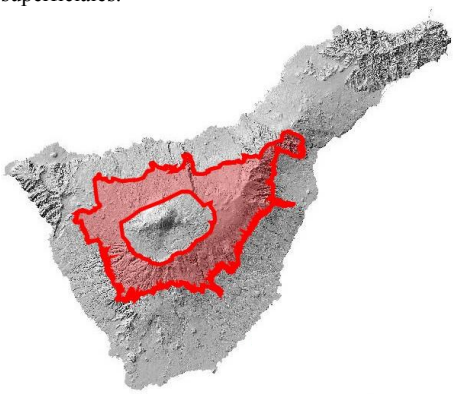


Figura 1: Isla de Tenerife. Límites del Parque Natural de la Corona Forestal (en rojo).

El objetivo de este estudio es la comparación de los resultados de dos algoritmos regionales multibanda con datos IRT procedentes del sensor ASTER aplicados a un bosque de coníferas situado en la Isla de Tenerife. La primera metodología consiste en un algoritmo multibanda (MB) basado en el principio de absorción diferencial que hace uso de una combinación lineal de los cinco canales térmicos de ASTER, y la segunda, un Modelo Aditivo Generalizado (MAG), con el que se pretende la minimización de los sesgos y la dispersión que normalmente se introduce en los algoritmos lineales tradicionales. Los resultados de estos algoritmos serán comparados con el producto ASTER AST-08, que tomaremos como referencia para su evaluación.

DATOS Y METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio está localizada en la Isla de Tenerife (28.20ºN 16.30ºW). Se trata de un zona que conforma un cinturón (Parque Natural de la Corona Forestal) densamente cubierto de *Pinus canariensis*, una conífera endémica de las Islas Canarias (España), situada a una altura media de 1400 m sobre el nivel del mar, entre 800 m y 1200 m (Figura 1). Se extiende predominantemente por la cara norte de la Isla, apareciendo también en el lado sur, aunque con menor densidad vegetal. Esta zona presenta unas características climáticas muy particulares, dominadas por la presencia de una inversión térmica de subsidencia con base a una altura media de 1254 m (desde los 1488 m de la estación invernal a los 962 m de la estival). Ésta mantiene el aire oceánico húmedo confinado en las capas bajas atmosféricas, garantizando una baja concentración de vapor de agua atmosférico en las capas superiores al nivel de su base. Debido a las características vegetales del bosque de pinos y a su alta densidad en la vertiente norte de la isla, se ha considerado la masa vegetal relativamente homogénea, de modo que ni la temperatura superficial ni la emisividad se espera que varíen debido a efectos temporales ni espaciales.

Datos ASTER

El sensor ASTER, a bordo de la plataforma TERRA de la NASA, proporciona datos en cinco canales térmicos (10-14), entre 8 y 12 µm con una resolución espacial de 90 m. Su exactitud en temperatura absoluta es de ±3 K a 200-240 K, ±2 K a 240-270 K y ±1 K a 270-340 K, siendo su resolución radiométrica de 0.3 K a 300 K. Se dispuso de imágenes ASTER de los días 02/03/03, 15/09/05, 26/03/06, 31/03/08, 16/04/08, 02/05/08, 05/07/08 y 09/10/08.

Corrección atmosférica y simulación

La corrección atmosférica se fundamenta en la ecuación de transferencia radiativa:

$$L_{sensor,j} = \left[\varepsilon_j \cdot B_j(T_s) + (1-\varepsilon_j)\cdot L_j^{\downarrow}\right]\cdot \tau_j + L_j^{\uparrow} \quad (1)$$

donde $L_{sensor,j}$ representa la radiancia que llega al sensor, que en este caso es la radiancia medida por ASTER en un canal determinado j, τ_j representa la transmitancia atmosférica espectral, $L_j^{\uparrow}$ es la radiancia espectral ascendente y $L_j^{\downarrow}$ la radiancia atmosférica espectral descendente. Por su parte, B_j es la radiancia de un cuerpo negro a la temperatura T_s, que coincide con *TSF* (Temperatura de la superficie forestal), y ε_j es la emisividad espectral de la superficie. Estos parámetros atmosféricos (τ_j, $L_j^{\uparrow}$, $L_j^{\downarrow}$ y $L_{sensor,j}$) se obtuvieron por medio del código de tranferencia radiativa MODTRAN. Se usaron un total de 524 perfiles atmosféricos libres de nubes, obtenidos desde enero de 2006 hasta diciembre de 2008 (381 diurnos y 143 nocturnos) por la estación de la AEMET en Tenerife. También se consideraron seis valores diferentes de T_s (K), entre T_0 - 5, T_0, T_0 + 5, T_0 + 10, T_0 + 15, y T_0 + 20 para datos diurnos, y T_0 - 10, T_0 - 5, T_0, T_0 + 5, T_0 + 10 y T_0 + 15 para nocturnos. Donde T_0 representa la temperatura de la primera capa del radiosondeo. Con el

fin de introducir el efecto de la compleja orografía de la isla y evitar así las posibles incertidumbres que pudieran aparecer sobre los distintos parámetros atmosféricos, cada perfil fue dividido en tres capas, cada una de ellas comenzando desde los niveles de 500 m, 1000 m y 1500 m, respectivamente. De esta manera, las simulaciones fueron realizadas para cada uno de los tres perfiles.

El valor de la emisividad del *Pinus canariensis* es también un dato necesario para resolver la ecuación 1. En este estudio se han considerado 17 espectros distintos de emisividad para este tipo de vegetación. Dos de ellos fueron medidos por medio del método de la caja en su versión de dos tapas (Rubio *et al*., 2003). Para su aplicación se hizo uso del radiómetro infrarrojo CIMEL 312-2, que posee cinco canales que coinciden con las bandas IRT ASTER. Se tomaron dos muestras representativas de árboles individuales y mediante una pila de acículas se simuló la estructura vegetal para su medida. Los valores de la emisividad espectral medida para la primera muestra fueron 0.972±0.004, 0.972±0.009, 0.972±0.008, 0.975±0.005 y 0.971±0.009 para las bandas ASTER de 10 a 14. Para la segunda muestra fueron 0.958±0.007, 0.960±0.009, 0.958±0.010, 0.960±0.010 y 0.966±0.010, respectivamente. Además, se hizo uso de la información de la emisividad superficial extraída del producto estándar ASTER AST-05 para garantizar la representatividad del valor introducido en dichas simulaciones. Se extrajeron 15 valores promedio de emisividades procedentes de 15 zonas de prueba diferentes uniformemente repartidas dentro del bosque de pinos, cada una con una extensión de 8x8 píxeles ASTER. Este proceso se realizó para las imágenes de los ocho días considerados entre 2003 y 2008.

Teniendo en cuenta todas las variables consideradas, se han obtenido del proceso de simulación un total de 116.586 datos diurnos (381 x 17 x 6 x 3) y 43.758 nocturnos (143 x 17 x 6 x 3) para el desarrollo y validación de los algoritmos.

Algoritmo MultiBanda (MB)

El algoritmo MB (TSF_{MB}) se estimó por medio de una regresión lineal múltiple entre las temperaturas de brillo del sensor para cada uno de los cinco canales IRT ASTER (T_i) y la temperatura superficial (T_s), considerada como la temperatura de la primera capa medida por medio del radiosondeo local. Su forma funcional responde a la Ecuación 2:

$$TSF_{MB} = a_0 + \sum_{i=1}^{5} a_i \cdot T_i \qquad (2)$$

Algoritmo MAG

Los MAG son una técnica de modelado no paramétrica capaz de estimar de manera objetiva la relación funcional para cada uno de los términos predictores del modelo (Hastie y Tibshirani, 1990). Su fórmula general viene dada por la Ecuación 3:

$$TSF_{MAG} = \alpha + \sum_{i=1}^{q} g_i(X_i) \qquad (3)$$

donde α es un término constante análogo al que aparece en las regresiones lineales (a_0), X_i son las variables predictoras y g_i un conjunto de funciones no lineales de ellas. De esta manera, la idea principal consiste en reemplazar la típica función lineal por una función de suavizado. En particular, en este estudio se hace uso de funciones de suavizado del tipo *splines* cúbicos (*s*). Se seleccionó el mejor ajuste por medio de una técnica automatizada de selección paso a paso hacia atrás y hacia adelante. Otra ventaja de la metodología MAG es que nos permite incorporar información sobre la altura (*h*) y/o el mes (*m*) como variables predictoras continuas.

RESULTADOS

El cálculo de los coeficientes de los algoritmos se realizó para datos diurnos y nocturnos hacienda uso de un conjunto de entrenamiento, que incluyó los años 2007 y 2008. Por simplicidad, se muestran en las ecuaciones 4 y 5 ambos algoritmos para el caso de día:

$$TSF_{MB} = 0.77T_{10} - 1.35T_{11} + 3.88T_{12} - 2.88T_{13} + 0.38T_{14} + 65.17 \qquad (4)$$

$$TSF_{MAG} = 0.54s(T_{10}) - 1.25T_{11} + 3.82s(T_{12}) - 2.71T_{13} + 0.42s(T_{14}) + 0.12s(h) + 0.002s(m) \qquad (5)$$

Cabe destacar que el mejor algoritmo MAG seleccionado solo mantiene como términos lineales clásicos las temperaturas de brillo de los canales 11 y 13 del sensor ASTER. Todas las demás variables predictoras son términos suavizados ($s(X_i)$).

Los resultados globales extraídos para ambos algoritmos usando el conjunto independiente de validación se presentan en la Tabla 1. Los mejores resultados son los obtenidos por medio del algoritmo MAG, mostrando una disminución del RMSE respecto al algoritmo MB de 0.29 K para día y de 0.44 K para noche.

	DIA		NOCHE	
Alg.	*RMSE*	*Error medio*	*RMSE*	*Error medio*
MB	2,89	0,63	2,87	0,19
MAG	2,60	0,53	2,43	0,09

Tabla 1: RMSE (K), error medio (K) y correlación obtenidas para los algoritmos MB y MAG para datos diurnos y nocturnos.

También se realizó la comparación entre los valores de la *TSF* obtenidos mediante MB y MAG con un valor de referencia extraído del producto estándar ASTER AST-08 para una imagen del día 02/02/2003, seleccionando seis zonas de prueba dentro del bosque, a altitudes de entre 1711 m y 947 m sobre el nivel del mar (Tabla 2).

Para el algoritmo GAM, se obtuvo un error medio de -1.21 K, incluyendo las seis zonas, y un RSME de 1.74 K.

Zona	1	2	3	4	5	6
Altura (m)	1415	1710	1711	1558	1094	947
ΔMAG (K)	-2,48	0,29	-2,36	-2.07	-0,70	0,07
ΔMB (K)	-2,89	0,44	-2,00	-2,95	-2,56	-1,46

Tabla 2: Diferencias de temperatura (Δ) entre el producto AST-08 y la obtenida por medio de MAG y MB para el día 02/03/2003 (diurno).

CONCLUSIONES

Se han propuesto dos algoritmos alternativos al algoritmo TES, usado tradicionalmente para la obtención de la temperatura superficial usando datos ASTER. Ambos algoritmos son independientes de las condiciones atmosféricas locales en el momento de la toma de datos remota y de la emisividad de la superficie, al considerar su aplicación sobre un área homogénea y densamente cubierta de *Pinus Canariensis*. El algoritmo MAG muestra unas estadísticas de los residuos mejores que el algoritmo MB. Al compararlo con el producto AST-08, MB presenta errores superiores en 1 K al valor de precisión promedio del algoritmo TES (±1.5 K). Sin embargo, MAG muestra resultados similares pero con una metodología mucha más simple e independiente.

BIBLIOGRAFÍA

BARRETO, A., ARBELO, M., HERNÁNDEZ-LEAL, P. A., NÚÑEZ-CASILLAS, L., MIRA, M. y C. COLL, 2010: *Evaluation of surface temperature and emissivity derived from ASTER data: a case study using ground-based measurements at a volcanic site*. J. Atmos. Ocean Tech., 27(10), 1677–1688.

GILLESPIE, A. R., T. MATSUNAGA, S. ROKUGAWA, y S. J. HOOK, 1998: *Temperature and emissivity separation from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 36(4), 1113-1125.

HASTIE, T. J., y R. J. TIBSHIRANI, 1990: *Generalized Additive Models*, Chapman and Hall, London.

HERNANDEZ-LEAL, P. A., GONZÁLEZ-CALVO, A., ARBELO, M.; BARRETO, A. y A. ALONSO-BENITO, 2008: *Synergy of GIS and Remote Sensing Data in Forest Fire Danger Modeling*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 1(2), 240-247.

RUBIO, E., V. CASELLES, C. COLL, E.VALOR y F. SOSPEDRA, 2003: *Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: improvements on the experimental set-up and new measurements*. Int. J. Remote Sens., 24(24), 5379-5390.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2010-22189-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación y el proyecto PCT-MAC 2007-2013 SATELMAC co-financiado con fondos FEDER de la Unión Europea.

Grado de recubrimiento vegetal de las paredes de grandes barrancos a través del TSAVI derivado de imágenes Quickbird-2

D. Balcells[1], J. A. Martínez-Casasnovas[1] y M. C. Ramos[1]

[1] Universidad de Lleida, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Av. Rovira Roure 191, 25198 Lleida (Cataluña, España). Correo electrónico: j.martinez@macs.udl.cat

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es la cartografía del grado de cobertura vegetal en las paredes de grandes barrancos localizados en la región vitícola del Penedés (Cataluña) a partir de imágenes Quickbird-2, con el fin de localizar las zonas potencialmente más activas desde el punto de vista de la erosión hídrica. Se utilizó una imagen de Quickbird-2 adquirida el 04/07/2004. La estimación del grado de cobertura vegetal se realizó a través del TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) y su posterior relación con la cobertura vegetal medida en zonas de verdad-terreno. El TSAVI minimiza el brillo del suelo en la estimación de la respuesta espectral de la vegetación en la región del rojo e infrarrojo cercano, si bien es conveniente ajustarlo a la línea del suelo específica del área de estudio (en este caso las paredes sin vegetación de los barrancos). El TSAVI calculado varia entre 0,0886, en zonas con un grado muy bajo de cobertura vegetal, y 1 para zonas totalmente cubiertas por la vegetación. Los valores del TSAVI fueron comparados con el porcentaje de cobertura vegetal medida en 140 zonas de verdad terreno, pudiendo ajustar un modelo logístico de variación del grado de recubrimiento vegetal respecto al TSAVI: Cobertura vegetal (%) = 100 (1 + exp(14,11 − 36,69 TSAVI)), R^2= 0,819. El modelo logístico subestima las áreas con escasa cobertura vegetal. Los mayores errores, no obstante, se obtienen zonas con porcentajes de recubrimiento vegetal intermedio, que tenían una menor representación en el conjunto de muestras de verdad – terreno.

Palabras clave: erosión por barrancos, TSAVI, Quickbird-2, Penedés

ABSTRACT

The objective of the present work is the mapping of vegetation cover on the walls of big gullies located in the Penedés vineyard region (Catalonia) from Quickbird-2 images, in order to locate the erosion prone areas. A Quickbird-2 image acquired on 04/07/2004 was used. The estimation of the vegetation cover degree was made by means of TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) and its relation with the vegetation cover measured on the ground. TSAVI minimizes soil brigtness in the estimation of the spectral response of vegetation in the red and infrared region. However it is necessary to adjust the index to the soil line specific for the study area (in the present case the non-vegetated gully walls). The resulting TSAVI varies between 0.0886, in areas with very low vegetation cover, and 1 in zones fully vegetated. TSAVI values were compared with the vegetation cover percentage measured in 140 control zones, and a logistic model was developed: Vegetation Cover (%) = 100 (1 + exp(14.11 − 36.69 TSAVI)), R^2= 0.819. The logistic model underestimates the areas with low vegetation cover. The main errors occur in areas with intermediate vegetation cover degree, which coger representation in the set of ground truth data.

Keywords: *gully erosion , TSAVI, Quickbird-2, Penedés*

INTRODUCCIÓN

La erosión por barrancos es un proceso erosivo que puede suponer entre el 50-80% de la producción de sedimentos en áreas donde se dan este tipo de fenómenos. La determinación del grado de recubrimiento vegetal es fundamental como indicador del grado de actividad de los procesos erosivos de los barrancos. Trabajos anteriores de cartografía de la cubierta vegetal en barrancos mediante imágenes Landsat TM han puesto de manifiesto la necesidad de utilizar imágenes de una mayor resolución espacial para este propósito (Martínez-Casasnovas, 2000). Además, existen pocos estudios específicos sobre la vegetación en barrancos, especialmente con imágenes de satélite (Martínez-Casasnovas et al., 2009), por lo que el presente trabajo pretende

contribuir a ampliar las posibilidades de la teledetección en este campo. Así, el objetivo principal del presente trabajo es la cartografía del grado de cobertura vegetal en las paredes de grandes barrancos a partir de imágenes de alta resolución espacial (Quickbird-2), con el fin de localizar las zonas potencialmente más activas desde el punto de vista de la erosión hídrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en las comarcas de l'Anoia i de l'Alt Penedès, en las cuencas de los barrancos de la Rierussa y de Can Cairot, a unos 30 km al noroeste de Barcelona. Tiene una extensión de 830 ha. El área se incluye en la Depresión Terciaria del Penedés, rellena de materiales poco consolidados (margas, areniscas y conglomerados). El clima es mediterráneo, con una T y P media anuales de 15ºC y 550 mm respectivamente. Son frecuentes las precipitaciones de alta intensidad (p.e. > 100 mm h-1 en periodos de 5 minutos). El factor de erosividad de la lluvia (R) varía entre 1049 - 1200 MJ mm ha^{-1} h^{-1} $año^{-1}$ (Ramos, 2002). Una de las principales características de esta área es la disección del paisaje por una densa y profunda red de barrancos (Figura 1 y Figura 2). Los barrancos tienen anchuras entre 75 y 300 m y profundidades entre 10 y 60 m. El desarrollo del sistema de cárcavas y barrancos ha estado favorecido por el cultivo de viñedos, que es el principal cultivo de la zona.



Figura 1: Cabecera del barranco de la Rierussa. Se observan paredes casi verticales desprovistas de vegetación donde la erosión es muy activa y diferente grado de recubrimiento en las partes inferiores y medias de las paredes.

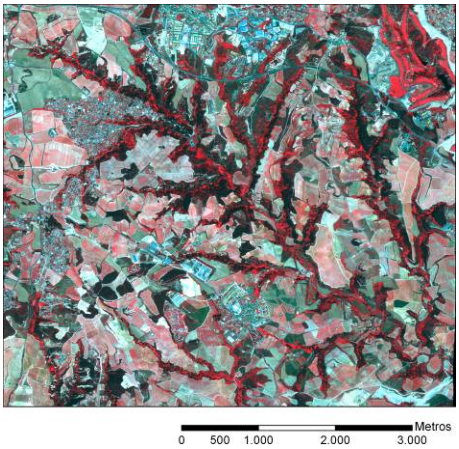


Figura 2: Composición en falso color RGB 432 de la imagen del satélite Quickbird-2 utilizada en el presente estudio. La imagen muestra el sistema de barrancos de Rierussa.

Procesamiento de la imagen de satélite

Para realizar la caracterización de la cubierta vegetal en los barrancos se utilizó una imagen multiespectral Quickbird-2 (resolución 2,8 m) adquirida el 04/07/2004 (Figura 2).

La imagen se ortorectificó mediante utilizando el programa Leica Photogrametry en base a puntos de control y utilizando un modelo digital de terreno de 5 m de resolución del área de estudio. Después se obtuvieron valores de radiancia y de reflectancia espectral según las especificaciones del documento "Radiance Conversión of QuickBird Data" (Technical Note July 2003), según la Ecuación 1.

$$L_{P,B} = absCalfactor_B \cdot q_{P,B} \qquad (1)$$

donde: $L_{P,B}$ es la radiancia en la parte alta de la atmósfera (W m^{-2} sr^{-1}), $absCalfactor_B$ es el factor de calibración radiométrica absoluto (W m^{-2} sr^{-1} ND^{-1}) y $q_{P,B}$ es el valor digital de los píxeles de la imagen.

La conversión de radiancia a reflectancia se realizó usando la ecuación para el cálculo de la reflectancia planetaria (Ecuación 2).

$$R_{P,B} = \frac{L_{P,B} \cdot d^2 \cdot \pi}{E \cdot \cos\phi} \qquad (2)$$

donde: $L_{P,B}$ es la radiancia espectral calculada según la ecuación 1, d es la distancia entre la

Tierra y el sol en unidades astronómicas, E es la Irradiancia solar espectral exoatmosférica y Φ es 90 menos el ángulo de elevación solar en el momento de la adquisición de la imagen.

A partir de aquí se calculó el índice de vegetación TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index, Baret et al., 1989) (Ecuación 3), el cual mide el ángulo entre la línea del suelo la línea de la vegetación según la respuesta del rojo e infrarrojo próximo, lo cual compensa el brillo de la respuesta del suelo en la determinación de la respuesta de la cubierta vegetal. En este caso, para el cálculo de la línea del suelo se seleccionaron 24 zonas de control (200 m^2, de paredes de barranco sin vegetación) donde se muestrearon los valores de reflectancia en las bandas del rojo e infrarrojo próximo.

$$TSAVI = \frac{a \cdot (R_{IR} - a \cdot R_R - b)}{(R_R + a \cdot R_{IR} - a \cdot b)} \qquad (3)$$

donde: a es la pendiente de la línea del suelo, b es el valor de intercepción de la línea del suelo en el eje de la banda del infrarrojo próximo, R_{IR} es la reflectancia en la banda del infrarrojo próximo y R_R es la reflectancia en la banda del rojo.

Una vez calculado el TSAVI se muestrearon un total de 140 zonas de control, equivalentes a 1100 m^2, mediante observaciones de campo en píxeles de la imagen seleccionados. En estas zonas se estimó el porcentaje de cobertura vegetal (mediante estimación visual) con el fin de obtener una relación con el TSAVI.

RESULTADOS

A partir de los 24 zonas de verdad-terreno en las paredes de barranco en las que se muestrearon los valores de reflectividad en el rojo e infrarrojo próximo se obtuvo la línea del suelo (Ecuación 4). El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,90, lo cual indica una buena correlación de la respuesta de las paredes desnudas de los barrancos entre el rojo e infrarrojo próximo.

$$Y = 0{,}4243 \cdot X + 0{,}0128; R^2 = 0{,}90 \qquad (4)$$

donde: Y es la reflectancia en el infrarrojo próximo y X la reflectancia en el rojo.

Los valores de intercepción y pendiente de la ecuación 4 fueron utilizados para el cálculo del TSAVI (Figura 3). Estos valores varían entre 0,0886, en zonas con muy baja cobertura vegetal, hasta 1, en zonas totalmente cubiertas con vegetación. El valor medio obtenido en las zonas de barranco fue de 0,5160±0,0174.

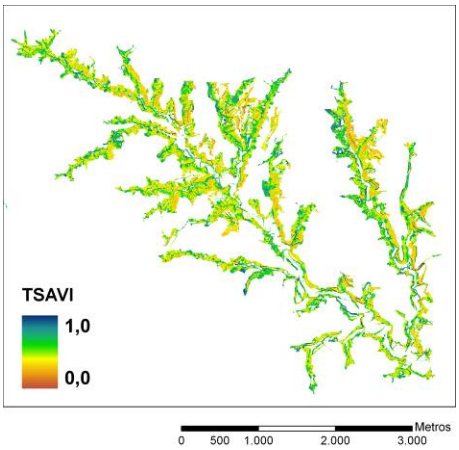


Figura 3: Mapa TSAVI. Se muestra el ejemplo del sistema de barrancos de Rierussa.

A partir de los 140 puntos de control donde se midió el porcentaje de recubrimiento de la cubierta vegetal, se obtuvo la relación entre este parámetro y el TSAVI (Figura 4).

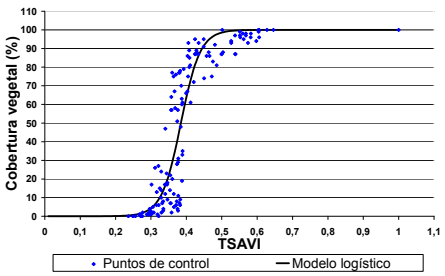


Figura 4: Relación entre el porcentaje de cubierta vegetal y el índice TSAVI en 140 puntos de control y modelo logístico ajustado (ver modelo en ecuación 5).

De la Figura 4 se deduce que los valores de TSAVI entre 0 - 0,35 (aproximadamente) se corresponden con un nulo recubrimiento vegetal. Entre 0,35 - 0,45 el porcentaje de recubrimiento vegetal varía entre el 0 y prácticamente el 100%. A partir de valores de TSAVI de 0,45 y hasta 1, el recubrimiento vegetal medido es total. A partir de esta distribución se optó por ajustar un modelo logístico (Figura 4 y Ecuación 5).

$$V\% = \frac{100}{1+\exp(14{,}1-(36{,}7\cdot TSAVI))} \qquad (5)$$

$$R^2 = 0{,}82$$

donde: V% es el porcentaje de cubierta vegetal y TSAVI es el índice de vegetación Transformed Soil Adjusted Vegetation Index *(Baret et al., 1989).*

El análisis de los resultados indica que para valores de TSAVI por debajo de 0,35, el modelo sobrestima ligeramente los resultados de porcentaje de cubierta vegetal. En el rango entre 0,35 y 0,45 tiene un comportamiento desigual, con residuos máximos del 50% de error de estimación. A partir de valores de 0,50 el modelo subestima los porcentajes de cubierta, con residuos máximos de hasta el 21%. El mapa de la cubierta vegetal calculada a través del modelo desarrollado se muestra en la Figura 5.

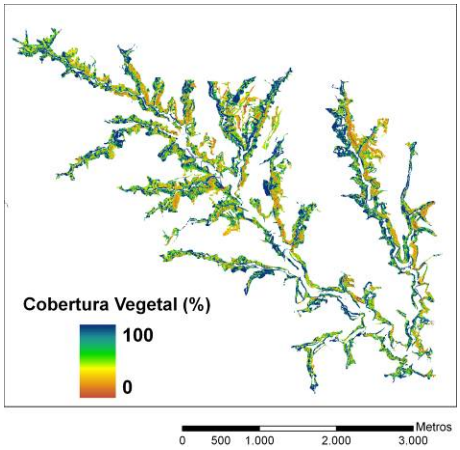


Figura 5: Mapa del porcentaje de cubierta vegetal estimado a través del índice TSAVI. Se muestra el ejemplo del sistema de barrancos de Rierussa.

CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra que el índice TSAVI, calculado a partir de una imagen multiespectral Quickbird-2, es útil para la estimación del grado de recubrimiento vegetal en las paredes de grandes barrancos. El error promedio en la estimación es del 11% de porcentaje de recubrimiento, por lo que el modelo muestra una alta fiabilidad en la predicción de esta variable.

El modelo logístico que relaciona el TSAVI con el porcentaje de cubierta vegetal subestima esta última variable para valores por debajo de 0,35 y por encima de 0,5, mientras que en el rango entre 0,35 y 0,50, que se corresponde con valores del 30 - 70 % de cubierta vegetal (aproximadamente), la respuesta es más variable. Sin embargo, en este rango no se dispusieron de un número de puntos de control adecuado para poder un mejor ajuste del modelo, pues se detectaron pocas zonas con un grado de recubrimiento vegetal intermedio.

BIBLIOGRAFÍA

BARET, F., GUYOT, G., MAJOR, D.J., 1989. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In Proceedings 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, 10–14 July 1989, Vancouver, Canada (Piscataway, NJ: IEEE), pp. 1355–1358.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 2000. *Cartografía de la actividad erosiva de paredes de barrancos a partir de imágenes de teledetección.* Revista de Teledetección, 14, 1 - 7.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., RAMOS, M.C., GARCÍA-HERNÁNDEZ, D., 2009. *Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (northeast Spain)*. Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1927 - 1937.

RAMOS, M.C., 2002. *Differences on the characteristics of the storms recorded along the year in a Mediterranean climate. Intensity and kinetic energy.* In: Mugnai, A., Guzzetti, F., Roth, G., Mediterranean Storms, 2nd Plinius Conference Pub GNDCI N 2547, p. 431. European Geophysical Society, Italy.

AGRADECIMIENTOS

Proyectos CICYT AGL2005-00091/AGR. AGL2009-08353/AGR.

Estudio de afecciones por plagas y decaimiento forestal en masas de coníferas mediante imágenes procedentes de sensores hiperespectrales

A. Cabello[1], J. E. Frieyro[1], L. Granado[1], A. Hayas[1], E. Méndez[1], G. Montoya[1], I. Pino[1], R.M. Navarro[2] y R. Hernández[2]

[1] EGMASA. Dpto. de Comunicación y Sistemas de Información y Unidad de I+D+i. Johan G. Gutenberg, 1. 41092, Sevilla. jfrieyro@egmasa.es

[2] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL. ETSIAM. Universidad de Córdoba. Apdo. 3048. 14080-Córdoba.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la aplicación de distintos sensores hiperespectrales para la cartografía de daños producidos por procesionaria en masas de *Pinus pinea* L., y por decaimiento forestal en masas de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arnold. A partir de la selección de los bioindicadores más adecuados se establecieron correlaciones con índices de vegetación derivados de las imágenes. Entre los sensores utilizados en el proyecto destacó el sensor aerotransportado AHS por su resolución espectral y espacial, así como, por la información suministrada en la región del térmico relacionada con el potencial hídrico.

Palabras clave: *Sensores hiperespectrales, plagas, decaimiento forestal, indicadores biofísicos, térmico e integración de sensores*.

ABSTRACT

This paper reports on application of hiperespectral sensors to map damages produced by Thaumetopoea pityocampa Den. & Schiff and forest decline in Andalusia. The study was carried out at two different sites (Almonte and Filabres) where bioindicators were collected and then linked with vegetation index derived from hyperspectral imagery. Among the studied sensors, the airborne hyperspectral sensor AHS show to be the most suitable for mapping forest damage in pine stands because of its spatial and spectral resolution, and due to the thermal information retrieved.

Keywords: *hyperspectral sensors, plagues, forest decline, bioindicators, thermal remote sensing and multisenor integration.*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del estado fitosanitario de la vegetación constituye un punto clave para la gestión de los montes andaluces y de los recursos destinados a su control. Además de los sistemas de seguimiento de daños basados en parcelas de control existentes, es necesario desarrollar otros que permitan obtener una visión espacializada más precisa. Los sensores hiperespectrales representan una gran oportunidad para abordar esta tarea gracias a su resolución espectral y la capacidad que estos tienen para suministrar información de grandes extensiones del terreno. En este contexto se ha desarrollado el proyecto para la implementación de nuevas tecnologías, basadas en la investigación y desarrollo de metodologías avanzadas con sensores hiperespectrales, aplicadas en el contexto forestal andaluz.

El objetivo principal del proyecto fue detectar y cartografiar los cambios fisiológicos del arbolado producidos por la procesionaria y por procesos de decaimiento a través de índices de vegetación calculados a partir de imágenes hiperespectrales.

Las plagas de procesionaria (*Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff.)

La procesionaria es actualmente el defoliador más importante de los pinares andaluces. Este lepidóptero de la familia *Thaumetopoiediae* se alimenta de las acículas de todas las especies de pinos presentes en Andalucía. En su fase larvaria (oruga) es cuando producen las defoliaciones en los pinos donde se alimentan durante el otoño, el

invierno e incluso la primavera en las zonas más frías.

Procesos de decaimiento forestal en masas de coníferas

Los decaimientos forestales son enfermedades de etiología compleja, en las que concurren distintos agentes causales que provocan el deterioro sanitario del árbol y en último lugar la muerte del mismo. Sin embargo, por lo general siempre existe un agente desencadenante, de origen biótico o abiótico, que tiene un peso especifico mayor en el desarrollo de la enfermedad. En el caso concreto de los procesos de decaimiento de masas de pino en la Sierra de los Filabres (Almería), la sucesión de varios periodos con bajas precipitaciones y periodos estivales prolongados, han provocado junto a otros factores, la aparición de síntomas de decaimiento en las poblaciones de pinos de esta sierra.

SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para el estudio de evaluación de daños por plagas de procesionaria se seleccionó una masa de pinares de *Pinus pinea* L. situada en Almonte. Se trata de una zona de bajo relieve con una topografía ondulada.

La zona de estudio de decaimiento forestal se encuentra en la Sierra de los Filabres (Almería), ésta comprende una masa de pinares procedentes de repoblación de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold). El problema de decaimiento de pinares en la Sª de Filabres viene siendo observado por los Agentes Forestales desde el año 2002. Desde entonces los daños han experimentado un progresivo aumento hasta afectar a gran parte de las repoblaciones de pinos (Navarro *et al.,* 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Adquisición de imágenes

Tras evaluar las necesidades del proyecto y las características resolutivas de los sensores, se optó por el sensor AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) como eje central del proyecto. Además, se eligieron otros sensores que por sus características espaciales y/o espectrales podrían adaptarse a las necesidades del proyecto, como es el caso de los sensores hiperespectrales Hyperion y CHRIS/PROBA. Por otro lado, para obtener una comparación de las aptitudes de los sensores hiperespectrales frente a los multiespectrales, y como complemento del estudio se adquieren imágenes Landsat TM y QuickBird.

Sensor	Fecha de adquisición
AHS	27/02/08 (Almonte)
AHS	23/07/08 (Filabres)
Hyperion	28/08/08 (Filabres)
CHRIS/PROBA	29/07/08 (Filabres)
Landsat TM	21/07/08 (Filabres)
QuickBird	18/07/08 (Filabres)

Tabla 1: Imágenes utilizadas, con indicación de la fecha y la localización de la zona de estudio.

Campañas de campo

Las campañas realizadas en Almonte y Filabres durante el año 2008 se programaron y ejecutaron entorno a los vuelos realizados con el sensor AHS. El principal objetivo de la campaña de Almonte fue caracterizar el LAI-IAF (índice de área foliar) de las parcelas seleccionadas, ya que el principal daño que produce la procesionaria es la defoliación. En Filabres sin embargo, y dado que los procesos de decaimiento que allí se dan están relacionados con estados de estrés hídrico, se tomaron además medidas de conductancia estomática, potencial hídrico y temperatura del dosel arbóreo. Además en ambas campañas se recogieron muestras de acículas para el análisis de contenidos en clorofilas y xantofilas.

Radiometrías y caracterización atmosférica

Para realizar los controles de calidad de las imágenes y para la calibración de estas, se realizaron radiometrías de campo en todas las campañas asociadas a los vuelos con el sensor AHS. Para las radiometrías se utilizó un radiómetro GER 3700. Se tomaron medidas de radiancia y reflectancia en cada uno de los transectos que determinaban las pasadas y de manera simultánea al paso del avión.

Para la caracterización del espesor atmosférico se utilizó un fotómetro solar, modelo 540 Microtops II™ Sunphotometer, con el que se midió el espesor óptico de aerosoles, vapor de agua e irradiancia solar directa.

Tratamiento previo de las imágenes

Las imágenes AHS fueron suministradas por el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) corregidas a valores de reflectividad y

emisividad sobre la cubierta, incorporando un archivo IGM que permitió posteriormente su georreferenciación. Los datos fueron corregidos atmosféricamente utilizando el modelo ATCOR4, basado en el código de transferencia radiativa MODTRAN. Como datos auxiliares se utilizaron medidas de aerosoles en campo a 1.020 nm en el momento de la toma de la imagen.

La corrección atmosférica, a niveles de reflectancia sobre cubierta, se hizo mediante la implementación de la aplicación del modelo de transferencia radiativa FLAASH en ENVI 4.6, para las imágenes Hyperion, Landsat TM y QuickBird. En el caso de los datos CHRIS/PROBA, estos fueron corregidos a nivel de reflectancia sobre la cubierta utilizando el software BEAM 4.6 de la Agencia Espacial Europea, aplicando previamente un algoritmo interno para la reducción del ruido en la señal. Para facilitar la discriminación de la cubierta forestal se aplicó en todos los casos una máscara de suelo calculada a partir del NDVI. Los datos fueron georreferenciados con coordenadas UTM (European Datum 1950) a partir de la ortofoto de la Junta de Andalucía (año 2006).

Cálculo de índices y correlaciones

El nexo de unión entre las imágenes y los parámetros biofísicos medidos en campo se estableció mediante correlación estadística a través de índices de vegetación. Para ello se revisó una amplia batería de índices de vegetación (Zarco *et al*., 1999), de los cuales se seleccionaron para las correlaciones y en función de las bandas de cada sensor, los que figuran en la tabla 2.

Índice	Referencia
NDVI = (R_{NIR} - Rred)/(R_{NIR} + Rred)	Rouse et al. (1974)
SR = R_{NIR}/Rred	
MSR = ((R_{NIR}/Rred) - 1)/[((R_{NIR}/Rred) +1)]0,5	Chen et al. (1996)
GM1=R_{750}/R_{550} GM2=R_{750}/R_{700}	Gitelson & Merzlyak (1997)
Vog1 = (R_{740})/(R_{720})	Vogelmann et al. (1993)

Tabla 2: Índices de vegetación calculados para la correlación de las imágenes con el contenido en clorofila y LAI.

A partir de la información térmica captada por el sensor AHS, se obtuvo la diferencia entre la temperatura de copas y la ambiental, que más tarde sirvió para obtener correlaciones con la conductancia estomática y el potencial hídrico medidos en campo.

Finalmente las regresiones obtenidas sirvieron para elaborar mapas de dichos indicadores (LAI, contenido en clorofila, conductancia estomática, potencial hídrico, etc.) del estado fitosanitario de las masas de pinos estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las correlaciones más significativas se obtuvieron entre el contenido en clorofila y los índices Vogelmann y Gitelson para *P.nigra.* Mientras que para el LAI se obtuvieron mejores correlaciones con el índice MSR en masas de *P.sylvestris* (tabla 3).

AHS				
		P.sylvestris	P.nigra	P.pinea
LAI	MSR	60,23	55,78	-
	SR	56,83	57,69	53,26
	NDVI	53,24	51,31	-
Chl	Vogelmann	52,77	69,95	52,77
	Gitelson	50,21	68,50	-
	NDVI	30,66	59,58	-
QuickBird				
LAI	MSR	47,82	18,78	-
	SR	47,62	16,48	-
	NDVI	37,42	26,07	-
Chl	Gitelson	33,94	68,72	-
	NDVI	28,71	39,99	-

Tabla 3: Valores de R^2 obtenidos en las regresiones.

Por otro lado, a partir de la temperatura de las copas de los pinos se obtuvieron correlaciones muy significativas con la conductancia estomática, especialmente para masas de *P.sylvestris* (tabla 4).

Tc - Ta		P.sylvestris	P.nigra
	Ψ H_2O	32,06	47,76
	Gs	67,30	48,74

Tabla 4: Valores de R^2 obtenidos en las regresiones (Tc – Ta: temperatura de copa menos temperatura ambiente; Ψ H_2O: Potencial hídrico del xilema; Gs: Conductancia estomática).

Las regresiones calculadas se utilizaron para elaborar cartografías de los indicadores medidos en campo. Mediante segmentación de umbrales y

en base a las clases de daño observadas en campo, y los parámetros biofísicos medidos, se obtuvieron mapas de distribución de valores de los parámetros biofísicos indicadores de procesos de decaimiento y de defoliaciones producidas por procesionaria.

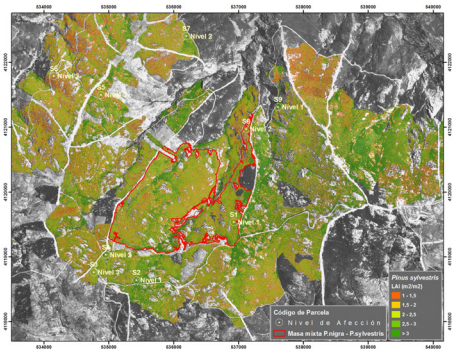


Figura 1: Estimación de LAI (m^2/m^2), a partir de imágenes AHS en la Sª de los Filabres (Almería) en masas de *Pinus sylvestris*.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han mostrado los resultados de la aplicación de índices de vegetación, calculados a partir de de sensores hiperespectrales, para la estimación de bioindicadores y su aplicabilidad cuando se pretende obtener cartografía a nivel de coberturas forestales de pinares en Andalucía. La estructura de las masas forestales juega un papel primordial en las estimaciones de muchos parámetros relacionados con masas forestales, como son su cobertura (e.g. densidad, fracción de cabida cubierta, etc.), su estado vegetativo (e.g. estrés, incidencia de plagas y enfermedades, etc.), pero también de numerosos parámetros indirectos como son la biomasa o la productividad de esos ecosistemas. El uso de índices es una primera aproximación para su modelización espacial.

La generación de cartografía a través del cálculo de correlaciones entre indicadores-biofísicos e índices de vegetación, permitió tener una visión espacializada de los procesos de decaimiento en la Sª de los Filabres y de las defoliaciones de Almonte

La conductancia estomática fue el predictor más adecuado de estrés, mostrando cambios en sus valores tanto entre distintos grados de daños, como entre especies.

La conductancia estomática, como indicador de estrés, se puede utilizar de forma complementaria con otros indicadores como el LAI y la concentración de clorofila, para evaluar procesos de decaimiento en ecosistemas forestales sobre grandes superficies.

Las relaciones numéricas establecidas permiten obtener cartografía de alta resolución de los niveles de estrés de la vegetación, que puede incorporarse en los procesos de planificación forestal.

BIBLIOGRAFÍA

CHEN, J. M. & CIHLAR, J., 1996. *Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images.* Remote Sensing of Environment, 55, 153– 162.

GITELSON, A.A. & MERZLYAK, M.N., 1997. *Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves.* International Journal of Remote Sensing, 18, 2691–2697.

NAVARRO CERRILLO, R.M., VARO, M.A., LANJERI, S. & HERNÁNDEZ CLEMENTE, R., 2007. *Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) y pino salgareño (Pinus nigra Arnold.) en la Sierra de los Filabres*. Ecosistemas 16 (3). Septiembre.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.* In: Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, pp 301–317

VOGELMANN, J.E., ROCK, B.N. & MOSS, D.N., 1993. *Red-edge spectral measurements from sugar maple leaves.* International Journal of Remote Sensing, 14: 1563-1575.

ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER J.R., MOHAMMED G.H., NOLAND T.L., & SAMPSON P.H., 1999. *Índices Ópticos obtenidos mediante datos Hiperespectrales del sensor CASI como Indicadores de Estrés en Zonas Forestales.* VIII Congreso Nacional de Teledetección, Asociación Española de Teledetección, Albacete (Spain), 22-24 Septiembre.

Relaciones entre variables de rodal y variables obtenidas mediante fotografías hemisféricas en masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* en el noroeste de España

F. Castedo-Dorado[1], M. Faba-Fernández[1] y J.R. Rodríguez-Pérez[1]

[1] Grupo de Investigación GI202: Geomática e Ingeniería Cartográfica (GEOINCA). Universidad de León. Campus de Ponferrada. Avenida de Astorga, s/n. 24400 Ponferrada (León, España). Correo electrónico: jr.rodriguez@unileon.es

RESUMEN

Se presenta una caracterización del dosel de copas y del ambiente lumínico de masas de *Pinus pinaster* Ait. y *Pinus radiata* D. Don en el noroeste de España mediante una serie de variables obtenidas a través de fotografías hemisféricas. Asimismo, estas variables se han relacionado con variables de rodal indicativas de su densidad y grado de desarrollo. Los resultados obtenidos indican que, en promedio, la cantidad de radiación que llega al sotobosque es mayor para masas de pino pinaster que de pino radiata. En general, no se han encontrado correlaciones fuertes entre variables derivadas de fotografías hemisféricas y variables de rodal, estando estas relaciones muy condicionadas por la gestión de las masas.

Palabras clave: variables de rodal, fotografía hemisférica, dosel de copas, ambiente lumínico, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*

ABSTRACT

A characterization of the canopy and the light environment of Pinus pinaster Ait. and Pinus radiata D. Don stands in the Northwest of Spain from variables obtained using hemispherical photography is presented. In addition, these variables have been related with stand variables associated with stand density and the degree of stand development. The results indicate that the quantity of radiation that incomes to the undergrowth is larger for Maritime pine stands than for radiata pine stands. The correlations between variables derived from hemispherical photography and stand variables were found to be not very strong, and they were determined by stand management.

Keywords: *stand variables, hemispherical photography, stand canopy, light environment, Pinus pinaster, Pinus radiata.*

INTRODUCCIÓN

La luz es un recurso fundamental en la regulación del establecimiento y crecimiento de las especies de sotobosque. Bajo el dosel de una masa forestal se genera un microclima fuertemente regulado por la cantidad y calidad de radiación solar que llega al mismo. Por otra parte, las hojas y demás órganos fotosintetizadores de las plantas sirven como colectores solares y como intercambiadores de gases, incluyendo su distribución en procesos como la transpiración, elongación celular, crecimiento, etc. El uso de fotografías hemisféricas permite realizar el análisis de la radiación solar que incide en el sotobosque y del dosel de copas de las masas arbóreas de una forma rápida y precisa.

Por otra parte, se ha comprobado que existen relaciones entre las variables antes comentadas y ciertas variables dasométricas indicativas de la densidad o del estado de desarrollo de las masas forestales (e.g., Campos et al., 2007), si bien estas relaciones varían mucho según las especies.

Los objetivos de este trabajo fueron: (i): caracterizar el dosel de copas y el ambiente lumínico de rodales de dos especies de pino (*Pinus pinaster* y *Pinus radiata*) bajo diferentes pesos de clara (ii): explorar las relaciones existentes entre la radiación directa y difusa que llega al sotobosque y entre las variables del dosel y de radiación solar y variables dasométricas.

METODOLOGÍA

Toma de datos y cálculo de variables

Los datos utilizados en este trabajo han sido obtenidos en 28 sitios de ensayo de claras. Estos sitios de ensayo fueron instalados en masas de *P. pinaster* (12 sitios) y *P. radiata* (16 sitios) situados en la parte oriental de Galicia y en El Bierzo (León). En cada sitio se ensayaron tres tratamientos distintos: testigo (T, sin extracción de área basimétrica), clara por lo bajo moderada (CM, extracción del 20% del área basimétrica inicial) y clara por lo bajo fuerte (CF, extracción del 40% del área basimétrica inicial). Cada tratamiento se corresponde con una parcela rectangular de 25 × 40 m de lado (1000 m^2 de superficie).

En cada parcela se midieron diversas variables dendrométricas, entre ellas el diámetro normal y la altura total de todos los pies. Asimismo, se realizaron 4 fotografías hemisféricas a lo largo del lado mayor de la parcela, separadas entre sí 8 m. Las fotografías fueron tomadas aproximadamente a 1,3 m sobre el suelo usando una cámara digital (EOS 40D, Canon) con una lente ojo de pez (4,5mm f2,8 EX DC HSM, Sigma) y en condiciones de nubosidad para asegurar un correcto contraste entre la cubierta de copas y el cielo.

Estas fotografías fueron posteriormente procesadas con el software Hemiview versión 2.1 (1999, Delta-T Devices Ltd., UK), que permitió estimar las siguientes variables: la cobertura del suelo por parte de la vegetación (*Ground Cover*, GC); el porcentaje de cielo visible desde el punto del sotobosque en el que se tomó la fotografía (*Visible Sky*, VS, %); la iluminación relativa o porcentaje respecto de la iluminación solar total que alcanza la superficie bajo la cubierta de copas, distinguiéndose entre la fracción de radiación directa (*Direct Site Factor*, DSF), indirecta o difusa (*Indirect Site Factor*, ISF) y la total (*Global Site Factor*, GSF); y el índice de área foliar (*Leaf Area Index*, LAI, $m^2\ m^{-2}$).

En el análisis de las fotografías se consideraron 18 ángulos de elevación cenital. Para obtener un valor representativo para cada parcela, se promediaron los valores de las variables correspondientes a las 4 fotografías tomadas en cada una. Para más detalles de la metodología usada por Hemiview para la estimación de variables de fotografía hemisférica, ver por ejemplo Riaño et al. (2004).

A partir de los datos proporcionados por los inventarios dendrométricos, se calcularon las siguientes variables de rodal: número de pies por hectárea (N), área basimétrica (G, $m^2\ ha^{-1}$), diámetro medio cuadrático (d_g, cm), altura dominate (H_0, m) e índice de Hart-Becking (IH, %). Asimismo, se estimaron las variables volumen total (V, $m^3\ ha^{-1}$), biomasa total (W, Mg ha^{-1}) y biomasa correspondiente diferentes fracciones de la copa: acículas (W_l, Mg ha^{-1}), ramillos ($W_{b0,5}$, Mg ha^{-1}), ramas finas ($W_{b0,5\text{-}2}$, Mg ha^{-1}) y ramas gruesas ($W_{b2\text{-}7}$, Mg ha^{-1}).

Análisis estadístico

La caracterización comparativa del dosel de copas y el ambiente lumínico de rodales para las dos especies de pino bajo diferentes pesos de clara se llevó a cabo mediante un diagrama de cajas.

Para la obtención de las relaciones entre variables se utilizaron métodos de regresión lineal. La selección de las variables explicativas se llevó a cabo mediante un ajuste de regresión lineal paso a paso (*stepwise regression*). El nivel de significación utilizado para que una variable pudiese entrar en el modelo y para que permaneciese en el fue de 0,01. Se utilizó este nivel de significación tan restrictivo para evitar la selección de demasiadas variables que podrían dar lugar a problemas de multicolinealidad. La capacidad de ajuste de los modelos se determinó mediante el coeficiente de determinación (R^2) que indica el porcentaje de la variabilidad de la variable dependiente que es explicada por el modelo.

RESULTADOS

Caracterización de radiación y del dosel de copas

En la Figura 1 se muestran los diagramas de cajas correspondientes al índice de área foliar (LAI) y a la radiación difusa (ISF) para las dos especies y para los tres tratamientos de clara analizados. Como era esperable, la realización de las claras generó cambios en el dosel que se reflejan en ambas variables. Así, el LAI presenta valores significativamente inferiores en parcelas con claras que en las que no se han hecho claras. Por el contrario, el porcentaje de radiación difusa (ISF) es menor en parcelas no clareadas, si bien para esta variable no existen apenas diferencias entre las parcelas testigo y de clara moderada. También es de destacar que, independientemente

del tratamiento de clara aplicado, en parcelas de pino pinaster el LAI es menor y el porcentaje de radiación difusa (también ocurre lo mismo para la radiación directa y global: resultados no expuestos) es mayor que en parcelas de pino radiata. Estos resultados confirman la idea generalizada de que las masas de pino pinaster presentan doseles de copas mucho más claros que las masas de pino radiata (Rodríguez-Soalleiro y Madrigal, 2008), permitiendo un mayor desarrollo del sotobosque.

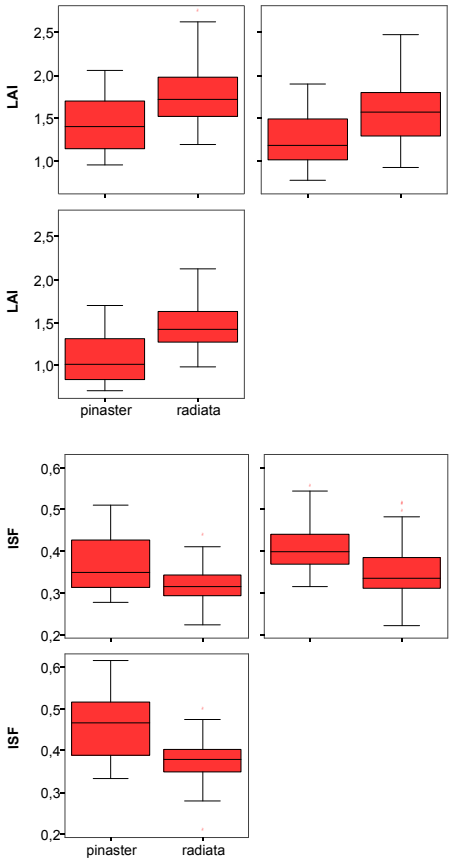


Figura 1: Diagramas de cajas para el LAI (arriba) y la ISF (abajo) considerando las dos especies y tres tratamientos de clara. *De izquierda a derecha y de arriba a abajo*: parcelas testigo, parcelas de clara moderada y parcelas de clara fuerte.

Relaciones entre variables

Las radiaciones directa y difusa están altamente correlacionadas, tanto si se analiza el conjunto total de los datos como cada especie separadamente (Figura 2), existiendo una mayor cantidad de radiación directa cuanto más radiación difusa. Esta buena relación era esperable al tratarse de formaciones con una fisionomía semejante (Valladares, 2006).

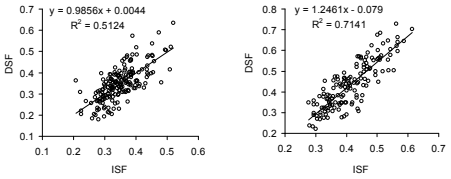


Figura 2: Relación existente entre la radiación directa (DSF) e indirecta (ISF) para parcelas de *P. pinaster* (izquierda) y *P. radiata* (derecha).

Por último, en la Tabla 1 se muestran las relaciones que resultaron significativas entre variables derivadas de fotografía hemisférica y variables de rodal. Como se aprecia, los modelos lineales que explican una mayor variabilidad se obtuvieron para las parcelas de clara fuerte (CF), siendo éstas incluso mejores que para el conjunto de todas las parcelas. El porcentaje de variabilidad explicado por los modelos fue bastante bajo (< 65% en casi todos los casos). No se han encontrado apenas, independiente de la especie, relaciones significativas para las variables correspondientes a las parcelas testigo y de clara moderada. Las grandes diferencias existentes entre parcelas, motivadas por los tratamientos de clara parece indicar que la gestión es la principal causa de variación de las variables relacionadas con el ambiente lumínico y en el dosel de copas (e.g., Le Dantec et al., 2000, Valladares, 2004).

Es de destacar también que las variables explicativas variaron según la especie analizada. Así, para parcelas de pino pinaster la biomasa de las ramas finas fue la variable independiente que resultó más significativa, mientras que el índice de espaciamiento relativo lo fue para parcelas de pino radiata. Otros autores encontraron estas variables (relacionadas con el grado de ocupación y recubrimiento del suelo por el dosel de copas) como explicativas de diversas variables derivadas de fotografías hemisféricas (e.g., Montes et al., 2007).

Especie	Var. foto	Tratam	Variables de rodal	R^2
P. pinaster	SkyGap	CF	*IH*	0.430
		todos	*IH*	0.239
	VisSKy	CF	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.648
		todos	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$, *IH*	0.508
	ISF	CF	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.624
		todos	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$, *IH*, $W_{\beta 2\text{-}7}$, d_g	0.750
	DSF	CF	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.552
		todos	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.362
	GSF	CF	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.606
		todos	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.368
	LAI	CF	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$	0.583
		todos	$W_{\beta 0,5\text{-}2}$, *IH*	0.470
P. radiata	VisSky	T	*N*	0.390
		CF	*IH*	0.487
		todos	*IH*	0.345
	ISF	CF	*IH*	0.453
		todos	*IH*	0.349
	DSF	todos	*IH*	0.253
	GSF	CF	*IH*	0.363
		todos	*IH*	0.323
	LAI	T	*N*	0.512
		CF	*IH*	0.438
		todos	*N*, $W_{\beta 2\text{-}7}$	0.439

Tabla 1: Relaciones existentes entre las variables derivadas de fotografía hemisférica y variables de rodal. Se muestran solamente aquellas que resultaron estadísticamente significativas. El significado de las variables se explica en el texto.

CONCLUSIONES

Los valores de la radiación incidente en el sotobosque fueron mayores para parcelas de *P. pinaster* que para parcelas de *P. radiata*; lo contrario sucedió para las variables relacionadas con características del dosel de copas. Para una misma especie, las claras influyeron de forma decisiva en la estructura del dosel y en el ambiente lumínico del sotobosque.

Se encontró una relación directa y muy estable entre las radiaciones directa y difusa, independientemente de la especie y de los tratamientos de clara aplicados.

Las variables derivadas de las fotografías hemisféricas no presentaron, en general, una fuerte relación con variables de rodal, estando ésta relación muy condicionada por los tratamientos de clara realizados. Las variables de rodal significativas en la mayoría de los casos (biomasa de las ramas finas para pino pinaster e índice de espaciamiento relativo para pino radiata) están estrechamente relacionadas con el grado de ocupación y recubrimiento del suelo por el dosel de copas.

BIBLIOGRAFÍA

CAMPOS, J., GOMES, S. and TAVARES, M., 2007. *Avaliaçao de índices de coberto em pinhal bravo pela utilizaçao de fotografias hemisféricas. Sua relaçao com as variáveis dendrométricas.* Silva Lusitana 15, 1-12.

LE DANTEC, V., DUFRENE, E. and SAUGIER, B., 2000. *Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands*. Forest Ecology and Management 134, 71-81.

MONTES, F., PITA, P., RUBIO, A., and CAÑELLAS, I., 2007. *Leaf area index estimation in mountain even-aged Pinus silvestris L. stands from hemispherical photographs*. Agricultural and Forest Meteorology, 145, 215-228.

RIAÑO, D., CHUVIECO, E., CONDÉS, S., GONZÁLEZ-MATESANZ J. and USTIN, S.L., .2004. *Generation of crown bulk density for Pinus sylvestris L. from lidar*. Remote Sensing of Environment, 92, 345–352.

RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.J. y MADRIGAL, A., 2008. *Selvicultura de Pinus pinaster Ait. subsp. Atlantica H de Vill.* Compendio de Selvicultura aplicada. Editores: Serrada, R., Montero, G. y Reque, J.A., pag. 367-398.

VALLADARES, F., 2004. *Cambio global y ambiente lumínico en ecosistemas forestales mediterraneos: consideraciones ecológicas e implicaciones para la gestión.* Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 20, 37-46.

VALLADARES, F., 2006. *La disponibilidad de luz bajo el dosel de los bosques y matorrales ibéricos estimada mediante fotografía hemisférica.* Ecología 20, 11-30.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto No AGL2008-02259/FOR.

Efecto de la segmentación en imágenes de alta resolución espacial para la detección de cubiertas forestales

I. L. Castillejo-González, A. González-Jarraiz, F.J. Mesas-Carrascosa, M. Sánchez de la Orden y A. García-Ferrer Porras

Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Ingeniería Gráfica y Geomática. Universidad de Córdoba. Campus Universitario de Rabanales. Crta. N-IVa, km 396, 14071 Córdoba (España). ilcasti@uco.es

RESUMEN

Este trabajo persigue evaluar cómo afecta el Análisis de Imágenes Orientadas a Objetos (Object Based Image Analysis, OBIA), a la discriminación de masas forestales con respecto a técnicas de teledetección basadas en píxeles. El análisis OBIA se basa en un proceso de segmentación de la imagen original en función de características espectrales y geométricas, y genera como resultado un abanico importante de variables de estudio representadas en regiones homogéneas denominadas objetos. En una imagen Pan-sharpen (fusionada) del satélite QuickBird de la Sierra de Hornachuelos (Córdoba, España), se aislaron 5 escenarios con distinta distribución vegetal para analizar el comportamiento de las técnicas basadas en píxeles y OBIA. Se llevaron a cabo clasificaciones de las cubiertas basadas en criterios espectrales, en criterios texturales y en una combinación de criterios espectrales y texturales. La información espectral derivada de la segmentación que se incluyó en los análisis fue la Media. Por su parte, en el análisis textural se incluyeron las variables Contraste, Entropía y Correlación. La variabilidad espectral de los diferentes escenarios presentó precisiones diferentes en las distintas clasificaciones realizadas. Teniendo en cuenta sólo la información espectral, las clasificaciones basadas en píxeles y las basadas en objetos mostraron un grado de discriminación similar. Sin embargo, la inclusión de información textural en las clasificaciones basadas en objetos mejoró la capacidad de discriminación entre cubiertas de densidad alta, no influyendo de forma significativa en los escenarios con densidad de vegetación baja.

Palabras clave: Espectral, OBIA, Quercus-matorral, QuickBird Pan-sharpen, Textura.

ABSTRACT

The aim of this work is to assess how the Object Based Image Analysis (OBIA) affects to forest uses discrimination and compares them with pixel-based techniques. OBIA analysis is based on a process of segmentation of original imagery. This segmentation is controlled by spectral and geometric characteristics, and generates an important range of study variables represented in homogeneous regions called objects. These objects serve as the basis for subsequent processes such as classifications. From a Pan-sharpen QuickBird image of Hornachuelos Forest (Cordoba, Spain), 5 regions with different vegetation distribution were isolated to evaluate OBIA and pixel-based techniques. Spectral-, textural- and a combination of spectral and textural-based classifications were carried out. The spectral information derived from the segmentation included in the classifications was the Media. Otherwise, the textural variables included in the analysis were the contrast, entropy and correlation. The spectral variability of the different scenarios presented different accuracies of the tests carried out. Taking into account only the spectral information, pixel-based and OBIA classifications showed a similar degree of discrimination. However, the inclusion of texture information in object-based classifications improved the ability to discriminate scenarios with high vegetation density, but did not show improvements with low vegetation density.

Keywords: *Spectral, OBIA, Quercus-bushes, QuickBird Pan-sharpen, Texture.*

INTRODUCCIÓN

Las clasificaciones basadas en píxeles, frecuentemente utilizadas en estudios de teledetección, se basan en técnicas que consideran cada píxel de la imagen como una unidad básica e independiente de estudio. Sin embargo, el terreno es continuo y mucha información está contenida en la relación entre píxeles adyacentes, lo que hace que estas técnicas pierdan parte de su potencialidad. La segmentación de imágenes es una técnica que permite la formación de objetos en base a ciertos criterios espectrales y/o de forma. El proceso de segmentación sirve para generar una imagen de objetos como primer paso para una clasificación posterior u otro procesamiento. Los Análisis de Imágenes Orientadas a Objetos (Object Based Image Analysis, OBIA), no están basados en píxeles como mínima unidad de información sino en los propios objetos creados. Estos objetos muestran, además de información espectral, información espacial basada en el tamaño, forma y contexto de cada objeto, lo que le permite analizar más información que la disponible únicamente con los píxeles.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las técnicas de Análisis de Imágenes Orientadas a Objetos (Object Based Image Analysis, OBIA) en clasificación de masas forestales, comparándolas con las tradicionales clasificaciones basadas en píxeles.

DATOS DE PARTIDA

El área de estudio se ubica en la Sierra de Hornachuelos (Córdoba, España). El análisis se realizó sobre una superficie aproximada de 1700 ha y se eligió por ser una clara representación de la vegetación del bosque Mediterráneo. Los usos del suelo presentes en el estudio fueron*:* 1) Arbolado *(Quercus rotundifolia, Quercus suber, Olea europaea, Quercus faginea),* 2) Matorral *(Cistus ladaniferus, Quercus coccifera, Pistacia lentiscus, Arbutus unedo),* 3) Pastizal, 4) Cultivos, 5) Sombra, 6) Suelo denudo y 7) Agua.

La imagen QuickBird analizada fue tomada en la Sª de Hornachuelos el 9 de febrero de 2008. Se trabajó con una imagen Pan-sharpened (0.6 m de resolución espacial y 4 bandas (B-G-R-NIR) de resolución espectral) fusionada mediante el algoritmo University of New Brunswick (UNB fusion algorith) (Zhang, 2004). Este tratamiento lo realizó la empresa distribuidora de la imagen.

Al igual que ocurre en la mayor parte de los ecosistemas forestales, se observó una gran heterogeneidad en la distribución del arbolado y demás masas vegetales. Por ello, y en vista de que el objetivo de este estudio era analizar el comportamiento de clasificaciones basadas en píxeles y objetos (OBIA), se planteó aislar 5 escenarios de la imagen con distinta distribución vegetal (tabla 1) para analizar el comportamiento de las técnicas evaluadas en cada uno de estos escenarios.

Escenario	Distribución vegetal predominante	Superficie (ha)
A	Arbolado densidad alta	10
B	Arbolado densidad baja	5.8
C	Matorral densidad alta	13
D	Matorral densidad baja	9.5
E	Arbolado y matorral	15

Tabla 1: Caracterización de cada uno de los escenarios estudiados

METODOLOGÍA

Segmentación

La segmentación de la imagen se realizó con el programa Definiens Developer 7.0, que incorpora como algoritmo de segmentación el Fractal Net Evolution Approach (FNEA). Este algoritmo de segmentación multiresolución ascendente parte de un objeto semilla formado por un píxel que se adhiere a otros píxeles u objetos en función de criterios de homogeneidad (Yu, 2006). Estos criterios son ajustables: factor de escala (parámetro de control del tamaño de los objetos), color (peso de la información espectral en la segmentación) y forma (peso de la información de morfológica de los objetos, suavidad de contornos y compacidad en la formación de los objetos).

Debido a la heterogeneidad de los elementos presentes en los distintos escenarios evaluados, la definición de los parámetros de segmentación se ajustó para cada escenario. El factor de escala fue el parámetro más limitante, al ser éste el que limita el tamaño final de los objetos y depende en gran medida de la distribución vegetal en cada escenario. La elección del factor de escala más adecuado para cada escenario se realizó en base a un conjunto de preclasificaciones de distintas segmentaciones en cada zona estudiada. Las segmentaciones se obtuvieron variando el factor de escala y dejando fijos el resto de parámetros (heterogeneidad espectral y de forma (suavidad y

compacidad)). En cada preclasificación se utilizó el método de clasificación máxima probabilidad, analizando los valores de Fiabilidad Global e Índice Kappa obtenidos. Tras la elección del factor de escala, la elección de los parámetros restantes se hizo mediante un análisis visual para ajustar mejor la forma de los objetos (Tabla2).

Escenario	FE[1]	C[2]	F	S	Co
A	6	0.7	0.3	0.5	0.5
B	6	0.7	0.3	0.5	0.5
C	4	0.7	0.3	0.5	0.5
D	4	0.7	0.3	0.5	0.5
E	9	0.7	0.3	0.5	0.5

[1]Parámetros de segmentación: FE:Factor de Escala; C: Color; F: Forma; S: Suavidad; Co: Compacidad.
[2] Relación entre parámetros: C+F=1; S+Co=1

Tabla 2: Parámetros de segmentación

Elección de las variables de los objetos

Los análisis de imágenes basados en píxeles utilizan como información base la respuesta espectral de cada píxel en cada banda. Sin embargo, la formación de objetos da lugar a nueva información adicional derivada de cálculos estadísticos en base a los valores de los distintos píxeles que forman los objetos y su posición. Aunque se generó una gran cantidad de datos, en este estudio sólo se utilizó información espectral y textural.

La variable espectral utilizada fue la Media (Mean), que representa el valor espectral medio de cada objeto en cada banda y es comparable a la información de las imágenes en una clasificación basada en píxeles. Para el análisis textural se eligieron tres variables que ofrecían información textural sin repetirse: Contraste, Entropía y Correlación. El Contraste (Contrast) muestra información sobre la variación local en los valores de los píxeles, la Entropía (Entropy) muestra información sobre la semejanza entre los píxeles en la matriz y la Correlación (Correlation) muestra la dependencia lineal de los valores de los píxeles vecinos (Definiens, 2007). Estas variables texturales fueron calculadas en base a la matriz de co-occurrencia de Haralick.

Clasificación

Al igual que en las preclasificaciones realizadas para determinar los parámetros de segmentación más idóneos para cada escenario, las clasificaciones orientadas a discriminar los distintos aprovechamientos del suelo se realizaron con el algoritmo de asignación máxima probabilidad debido a su gran robustez en los cálculos. Este clasificador se utilizó tanto con la imagen original para la clasificación basada en píxeles como con distintas combinaciones de variables obtenidas de la segmentación en análisis OBIA para el estudio de los 5 escenarios. Todas las clasificaciones se llevaron a cabo con el software ENVI 4.5 (Research System Inc. 2008).

Los 5 escenarios analizados se sometieron a 13 clasificaciones diferentes, siendo 12 de ellas análisis OBIA con distintas combinaciones de variables espectrales y texturales obtenidas de la segmentación (Tabla 3).

	Variables	Análisis
Píxel	Valor espectral píxel	1
OBIA	Media	2
	Contraste	3
	Correlación	4
	Entropía	5
	Media-Contraste	6
	Media-Correlación	7
	Media-Entropía	8
	Media-Contraste-Correlación	9
	Media-Contraste- Entropía	10
	Media-Correlación Entropía	11
	Contraste-Correlación-Entropía	12
	Media-Contraste-Correlación-Entropía	13

Tabla 3: Combinación de variables espectrales y texturales para las clasificaciones

RESULTADOS

La tabla 4 muestra las precisiones (fiabilidad global e índice Kappa) obtenidas en las clasificaciones realizadas sobre los 5 escenarios. La Figura 1 muestra los resultados obtenidos sobre el escenario B (arbolado densidad baja) tras la segmentación, con la clasificación basada en píxeles y la mejor y peor clasificación OBIA. Como puede observarse en la Tabla 4, en estos análisis se obtienen precisiones muy dispares que van desde el 22% al casi el 97% de fiabilidad en función de la combinación de variables estudiadas y de la características de vegetación propias de cada escenario. Sin embargo, se puede destacar que la mayor parte de las clasificaciones muestran un grado de acierto bastante alto con fiabilidades globales superiores al 80%. Cabe destacar que todos los escenarios presentan un grado de discriminación muy parecido en cada análisis excepto el escenario D, el cual muestra valores de fiabilidad más altos que el resto.

De todas las variables estudiadas, la componente espectral es la que permitió discriminar

mejor los usos del suelo de forma general. Los escenarios B (arbolado densidad baja), C (matorral densidad alta) y D (matorral densidad baja) presentaron sus mejores resultados en la clasificación de la imagen a nivel píxel (análisis 1) o en la clasificación OBIA con la variable espectral Mean (análisis 2), con valores superiores al 90% de fiabilidad en todos los casos. Sin embargo, en el escenario A (arbolado con densidad alta) y en el escenario E (arbolado y matorral), las características texturales permitieron mejorar la clasificación de los usos del suelo presentes en esa zona incrementando entre un 1-2% la fiabilidad obtenida sólo con los valores espectrales. Así, mientras que el análisis OBIA de la Media (análisis 2) mostró un 83.6% de fiabilidad en el escenario A y un 91.6% en el escenario E, al introducir también la variable entropía (análisis 8) se incrementó la precisión hasta un 85.7% en el escenario A y hasta un 92.2% en el E.

Análisis		Escenarios				
		A	B	C	D	E
1	FG[1]	83.02	**90.09**	91.62	**96.99**	88.78
	K	0.77	**0.87**	0.89	**0.96**	0.86
2	FG	83.55	89.78	**92.05**	96.43	91.62
	K	0.77	0.87	**0.89**	0.95	0.89
3	FG	64.91	58.44	52.02	63.75	72.28
	K	0.51	0.46	0.37	0.50	0.65
4	FG	29.22	32.92	41.97	51.53	44.82
	K	0.12	0.15	0.23	0.31	0.31
5	FG	53.91	46.65	44.65	57.59	59.24
	K	0.38	0.31	0.27	0.38	0.49
6	FG	83.75	87.66	89.93	96.28	88.71
	K	0.78	0.84	0.86	0.94	0.86
7	FG	83.26	85.63	91.54	95.48	91.87
	K	0.77	0.81	0.89	0.93	0.90
8	FG	**85.67**	89.46	91.80	96.34	**92.17**
	K	**0.80**	0.86	0.89	0.94	**0.90**
9	FG	83.55	83.40	90.24	95.45	86.06
	K	0.77	0.78	0.87	0.93	0.83
10	FG	83.11	81.11	89.83	95.62	86.41
	K	0.77	0.75	0.86	0.93	0.83
11	FG	84.89	81.89	91.13	94.62	77.63
	K	0.79	0.76	0.88	0.92	0.73
12	FG	71.89	62.10	61.34	77.34	22.18
	K	0.61	0.51	0.48	0.67	0.17
13	FG	82.64	73.66	89.75	94.14	49.98
	K	0.76	0.66	0.86	0.91	0.43

[1]FG: Fiabilidad Global (%), K: Coeficiente Kappa

Tabla 4: Precisiones de las 13 clasificaciones realizadas en los 5 escenarios forestales

CONCLUSIONES

La distinta complejidad vegetal en los 5 escenarios evaluados ofrece una gran variabilidad espectral que influye directamente en el proceso de segmentación, siendo éste más complejo cuanto más variabilidad espectral presente la imagen y menos separabilidad se observe entre cubiertas. Además, teniendo en cuenta sólo la información espectral, las clasificaciones basadas en píxeles y las basadas en objetos muestran un comportamiento similar. Con los elementos texturales analizados se observa que no suelen mejorar mucho las clasificaciones espectrales, siendo la Entropía la que mejores resultados muestra. Además, la información textural es útil sólo si se utiliza junto con la media espectral de los objetos creados.

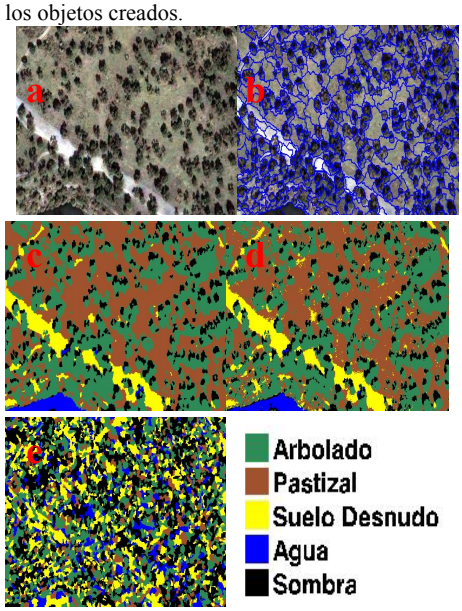


Figura 1: Detalle del escenario B (arbolado densidad baja). *De arriba a abajo y de izquierda a derecha:* **a)** imagen del escenario B; RGB= 321; **b)** segmentación del escenario B; **c)** clasificación basada en píxeles; **d)** clasificación OBIA más precisa (análisis 2) y **e)** clasificación OBIA menos precisa (análisis 4).

BIBLIOGRAFÍA

DEFINIENS, 2007. *Definiens Developer 7 Reference Book*, Definiens AG., München.

YU, Q., GONG, P., CLINTON, N., BIGING, G., KELLY, M. AND SCHIROKAUER, D., 2006. *Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72, 799-811.

ZHANG, Y., 2002. *A new automatic approach for effectively fusing Landsat-7 as well as IKONOS images.* In Proc. IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, pp. 2429-2431.

Detección y localización de árboles en zonas forestales mediante datos LiDAR e imágenes aéreas

J.L. Gil-Yepes, L.A. Ruiz, A. Fernández-Sarría y T. Hermosilla

Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección (CGAT). Universitat Politècnica de València. Campus de Vera. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia (España). Correo electrónico: jogiye@upv.es

RESUMEN

La tecnología LiDAR se ha utilizado durante los últimos años para la caracterización de zonas forestales. En la elaboración de inventarios forestales ciertas variables se miden a nivel de árbol, por lo que es importante su detección y localización. La metodología de detección y localización presentada comprende procesos entre los que se encuentra el procesado de datos LiDAR, pre-procesado y filtrado de imágenes y clasificaciones. Los resultados obtenidos combinando estos tipos de datos y aplicando varios algoritmos superan el 81% de aciertos en tareas de detección y delimitación de árboles individuales.

Palabras clave: lidar, detección, localización, árboles, inventariado forestal.

ABSTRACT

LiDAR technology has been used in recent years for characterization of forest areas. In forest inventories, some variables are measured at tree level, so that the stage of detection and location of trees is important. The detection and location methodology presented includes processes such as LiDAR data processing, image pre-processing and filtering, and classifications. The results obtained combining both types of data and applying various algorithms show values greater than 81% of accuracy in detection and delimitation of individual trees.

Keywords: *lidar, detection, location, trees, forest inventory.*

INTRODUCCIÓN

Las zonas forestales son entornos naturales que presentan una gran diversidad biológica, riqueza medioambiental y potencial energético que se debe gestionar, mantener y cuidar, por lo que es necesario un conocimiento detallado de estas zonas. Tradicionalmente, los inventarios forestales se han llevado a cabo mediante procedimientos convencionales basados en campañas de campo con costes elevados. Durante los últimos años, las tecnologías de teledetección han permitido una captura masiva de datos multiespectrales y tridimensionales a través de sensores situados en satélites o dispositivos aerotransportados. Los dispositivos LiDAR, junto a los sensores multiespectrales, proporcionan datos para estimar las variables forestales básicas para la creación de inventarios.

Estas variables pueden obtenerse a nivel de parcela (variables dasométricas) o a nivel de árbol (variables dendrométricas). Al trabajar a nivel de árbol se tiene un mayor nivel de detalle, en ocasiones indispensable para realizar ciertas tareas que requieren el conocimiento preciso del comportamiento de la unidad *árbol* en las masas forestales. En este trabajo se plantea el empleo de estas técnicas para la definición de una metodología que permita automatizar la detección y localización individual de los árboles en zonas forestales.

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS

El área de estudio se corresponde con una zona montañosa situada en el término municipal de Cuenca con una superficie de 4.100 hectáreas. En ella se extienden grandes zonas forestales en las que predominan dos clases de pino: *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster*, con una altura media de 10 metros. Los datos disponibles de la zona provienen de un vuelo LiDAR con una densidad nominal de 4 puntos/m^2, e imágenes aéreas del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) visible e infrarrojo, con una resolución espacial de 0,5 m/píxel. También se dispone de datos de campo con el inventario forestal de 56 parcelas

circulares de 50 metros de diámetro localizadas mediante GPS.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta se divide en tres partes: (i) pre-procesado de los datos, (ii) detección y localización , empleando los métodos de *watershed* y "máximos locales" (iii) evaluación de los resultados mediante su comparaciópn con datos de campo.

Pre-procesado de los datos

La detección de los árboles se realiza sobre los modelos digitales calculados a partir de la nube de puntos LiDAR. Para el filtrado de puntos y la generación de modelos se ha empleado el algoritmo propuesto por Estornell et al. (en prensa) que consiste en un proceso iterativo a través de ventanas de diferentes tamaños, seleccionando los puntos de menor altura para la generación del modelo digital del terreno (MDT). Una vez calculados el modelo de superficie y el modelo del terreno, se ha obtenido el modelo de alturas vegetación (MAV) con una resolución espacial de 0,5 m/píxel, coincidente con la de las imágenes restando el modelo del terreno al modelo de superficie.

El pre-procesado de las imágenes consiste en un mosaico y un posterior recorte para que la imagen coincida en dimensiones con la zona de estudio y con el MAV calculado.

Detección y localización

Para el proceso de detección y localización se parte de las imágenes aéreas y del MAV. Utilizando el algoritmo *watershed* se obtienen unos primeros resultados aproximados. Este algoritmo ha sido utilizado por otros autores (Popescu y Wayne, 2004; Tarabalka et al., 2010) para la segmentación de árboles, tanto en imágenes como a partir de datos LiDAR. El algoritmo *watershed* actúa sobre una imagen a modo de detección de sumideros como si de cuencas hidrográficas se tratase.

Inicialmente, se enmascaran las zonas forestales a partir del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de la imagen, seleccionando aquellos píxeles cuyo valor supera un umbral determinado. Sólo a las zonas enmascaradas se les aplica un filtrado posterior de realce de contornos en el MAV. El filtro utilizado está basado en una ponderación de la media según la similitud de los píxeles sobre un vecindario determinado (Chuvieco, 1996 y Recio, 2009). Una vez resaltadas las copas de los árboles sobre las zonas forestales, se realiza la inversión de los valores de intensidad de la imagen, facilitando así la detección de las cuencas con el método *watershed*. Tras esto se obtiene una imagen con los segmentos delimitados (Figura 1).

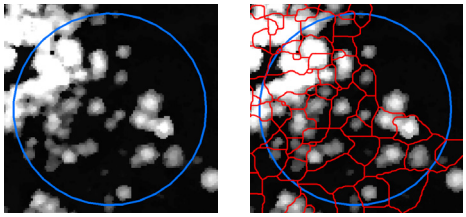


Figura 1: Detalle del MAV en una parcela (izquierda) y segmentos obtenidos mediante la aplicación de *watershed* (derecha).

Los segmentos calculados no corresponden sólo a árboles, por lo que antes de realizar el conteo se clasifican los segmentos. El proceso de asignación de clases consiste en una clasificación por píxel de máxima probabilidad seguida de una clasificación orientada a objeto. La clasificación por píxel se realiza utilizando las bandas G, R y NDVI de las imágenes y el MAV normalizado. En esta clasificación se han definido tres clases: árbol, suelo y matorral. Como paso previo a la clasificación y selección final de bandas, se realiza un estudio de separabilidad entre las diferentes clases.

Tras la clasificación por píxel se aplica un filtro de media. Posteriormente, se reclasifica cada segmento asignándole la moda de los valores de los píxeles que contiene. Para ello, se ha utilizado el software FETEX 2.0 (Ruiz et al., 2011). En esta clasificación se evalúan 30 parcelas de cada clase. Si bien los errores cometidos son elevados en las clases suelo y matorral, produciendo un valor bajo en la fiabilidad global de la clasificación, los errores correspondientes a la clase árbol son bajos, y siendo esta clase la que interesa mantener con valores altos de fiabilidad, la clasificación se considera adecuada. Estos errores se deben a segmentos de gran superficie, que a pesar de que en su interior esté situado un árbol, son clasificados como otra clase debido a la heterogeneidad de valores que presentan.

Tras la clasificación por objetos se realiza el conteo de los segmentos clasificados como árboles sobre las parcelas estudiadas en campo. Los resultados parciales obtenidos son una aproximación y se utilizan como punto de partida

para una nueva detección más rigurosa basada en el algoritmo de "máximos locales", el cual detecta los picos máximos de altura dentro de un vecindario determinado.

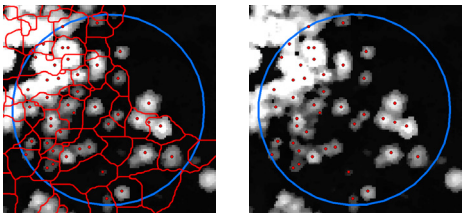


Figura 2: Detalle de detección de máximos locales de una parcela: Detección de máximos sobre segmentos (izquierda); detección final de máximos locales (puntos rojos) (derecha).

En esta segunda fase (Figura 2), cada segmento es analizado individualmente para el estudio de las diferentes clases que contiene. Aquel segmento en el que se detecte algún píxel correspondiente a la clase árbol, es seleccionado y procesado para detectar y localizar la copa del árbol por "máximos locales". De esta forma, se analizan segmentos susceptibles de contener más de un árbol. Previo a la detección de los máximos, la imagen del MAV se filtra utilizando la media ponderada, como en el caso anterior.

Evaluación

La evaluación de los resultados está diferenciada en dos partes: la detección del número de árboles y su localización. La evaluación se realiza por parcela, comparando el número de árboles detectados con los observados en campo. La localización se evalúa midiendo la distancia entre los árboles detectados y los árboles observados, utilizando un umbral máximo de separación de 4 metros. Aquellos árboles que disten más de 4 metros de los árboles de referencia, se considera que han sido erróneamente detectados. Se ha generado una gráfica de dispersión que muestra los errores de localización en los ejes X e Y (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cálculo de las aproximaciones se combinan los datos LiDAR y la información espectral para en un primer paso detectar los segmentos y en el segundo clasificarlos.

En la clasificación por píxel se obtiene una fiabilidad global del 97,7% con un coeficiente Kappa del 0,97. Las fiabilidades del productor y del usuario también son elevadas, consiguiendo un 99,5% y un 96,8% respectivamente para la clase árbol.

Tras la clasificación por píxel se realiza la clasificación por objeto con una fiabilidad global del 63,3%. Los valores de fiabilidad de la clase árbol son de un 93,3 % para el productor y un 73,3% para el usuario. Como se ha comentado, estos errores se deben principalmente a aquellos segmentos que tienen una gran superficie y, a pesar de contener un árbol en su interior, han sido clasificados en otra clase diferente, produciendo una fiabilidad baja. Esto permite calcular unos resultados parciales en la detección.

Los resultados obtenidos en la primera aproximación de la detección son del 67% de aciertos por parcela. Se podrían haber conseguido mejores resultados si se hubieran tratado los datos estratificándolos en función de la densidad forestal de la parcelas, con el inconveniente de que se añadiría un paso más de procesado.

La detección por "máximos locales" mejora los resultados y corrige los errores cometidos en la clasificación por objeto, debido al estudio individual a nivel de segmento, valorando las clases contenidas en su interior. De esta forma, se consigue una detección más precisa con hasta un 81,7% de aciertos por parcela y un desplazamiento medio en la localización de 1,23 metros, con una desviación típica de 0,7 metros.

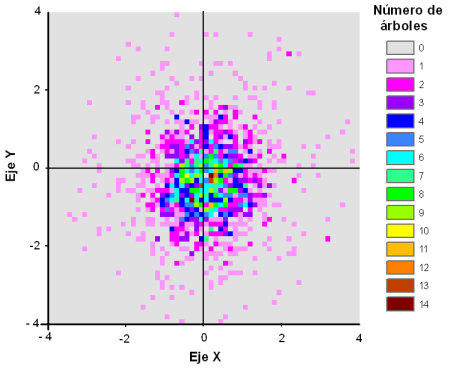


Figura 3: Gráfica de dispersión mostrando la precisión en la localización de un total de 1909 árboles contenidos en las 56 parcelas de estudio.

En la detección se dan casos en los que los errores por defecto son elevados. Estas parcelas de error se caracterizan por contener masas forestales de gran densidad. En estos casos y con la densidad de puntos empleada, tal y como

advierten Koch et al. (2006), los pulsos LiDAR no tienen suficiente capacidad de penetración, generando un error por omisión en la detección. A pesar de ello, la media de aciertos por parcela se mantiene elevada.

CONCLUSIONES

El algoritmo empleado para el procesado de los modelos digitales satisface las necesidades del trabajo, calculando los modelos correctamente a las resoluciones exigidas con los parámetros adecuados.

Ambas partes de la metodología de detección de árboles cumplen sus objetivos en cuanto a procedimiento y resultados. La primera aproximación se considera como un buen punto de partida, a pesar de los errores que se observan en la clasificación orientada a objeto. En la segunda fase se corrigen estos errores hasta conseguir resultados finales adecuados.

Los algoritmos *watershed* y de máximos locales facilitan la tarea de detección en las dos fases del proceso, generando una aproximación y posteriormente detectando los árboles con más precisión.

La combinación y uso de los dos tipos de datos (LiDAR e imágenes) favorece el desarrollo de la metodología. Los datos LiDAR proporcionan información tridimensional sobre la masa forestal, importante para conseguir una buena detección, mientras que las imágenes, con su información espectral, permiten mejorar la clasificación de los segmentos detectados.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial (3ª ed.)*. Madrid: Ediciones Rialp S.A.

ESTORNELL, J., RUIZ, L.A., VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. y HERMOSILLA, T., (en prensa). *Analysis of the factors affecting LiDAR DTM accuracy in a steep shrub area*. International Journal of Digital Earth (DOI: 10.1080/17538947.2010.533201).

KOCH, B., HEYDER, U., WAINACKER, H. 2006. *Detection of individual tree crowns in airborne LiDAR data.* Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72 (4), 357-363.

POPESCU, S.C. y WAYNNE, R.H., 2004. *Seeing the trees in the forest: using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height.* Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70, 589–604.

RECIO, J.A. 2009. *Técnicas de extracción de características y clasificación de imágenes orientada a objetos aplicadas a la actualización de bases de datos de ocupación del suelo.* Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral.

RUIZ, L.A., RECIO, J.A., FERNÁNDEZ-SARRÍA, A. y HERMOSILLA, T., 2011. *A feature extraction software tool for agricultural object-based image analysis.* Computers and Electronics in Agriculture 76 (2), 284-296.

TARABALKA, Y., CHANOSSOT, J. y BENEDIKTSSON, J.A., 2010. *Segmentation and classification of hyperspectral images using watershed transformation.* Pattern Recognition, 43, 2367–2379.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en el marco del proyecto TSI-020100-2009-815, *Desarrollo de técnicas y métodos para la gestión forestal sostenible a partir de datos de observación de la Tierra* (INFOREST-II), así como a los socios y colaboradores del mismo.

Flujos de carbono en bosques mediterráneos integrando imágenes MODIS y datos meteorológicos. Validación en la Toscana (Italia)

M.A. Gilabert[1], F. Maselli[2], A. Moreno[1], M. Chiesi[2] y B. Martínez[1]

[1] Unitat de Investigació en Teledetecció, Facultat de Física, Universitat de València, Dr. Moliner, 50. 46100-Burjassot, Spain. E-mail: m.amparo.gilabert@uv.es

[2] IBIMET-CNR, Via Madonna del Piano, 10. 50019-Sesto Fiorentino (FI), Italy.

RESUMEN

El análisis de datos diarios de GPP (producción primaria bruta) de un bosque mediterráneo situado en la Toscana a lo largo de cinco años ha permitido evaluar la utilidad de las imágenes MODIS para estimar los diferentes inputs de un modelo de tipo Monteith de flujos de carbono. Los datos se obtuvieron en una torre de medida de flujos de tipo eddy covariance. Por una parte, se ha analizado el potencial del PRI (índice de reflectividad fotoquímica) para caracterizar la variabilidad inter-anual de la eficiencia del uso de la radiación debida al estés hídrico durante verano. Por otra parte se comprueba que, salvo un factor de escala, la GPP apenas resulta sensible al método de estimar la *f*APAR (fracción de radiación absorbida fotosintéticamente activa).

Palabras clave: Flujos de carbono, MODIS, bosque mediterráneo, eficiencia del uso de la radiación.

ABSTRACT

The analysis of daily GPP measurements of a Mediterranean forest in Tuscany throughout five years shows the utility of MODIS images to estimate the inputs of a carbon flux Monteith type model. Measurements were obtained from an eddy covariance flux tower. On the one hand, the PRI potential to track the light use efficiency inter-annual variability due to summer drought has been evaluated. On the other hand, three different fAPAR products have been used. The GPP estimates are not very sensitive to the methodologies applied to obtain fAPAR products.

Keywords: *Carbon fluxes, MODIS, Mediterranean forest, light use efficiency.*

INTRODUCCIÓN

La productividad primaria bruta (GPP) de los ecosistemas forestales se puede estimar mediante una aproximación de tipo Monteith (Maselli *et al*., 2009),

$$GPP = \varepsilon \times fAPAR \times PAR \qquad (1)$$

donde PAR es la radiación incidente fotosintéticamente activa (0.4–0.7 μm), *f*APAR la fracción de PAR que es absorbida por la vegetación durante el proceso de fotosíntesis, y ε la eficiencia del uso de la radiación (cociente entre el CO_2 absorbido y la radiación absorbida).

Tanto *f*APAR como ε son susceptibles de ser estimados mediante imágenes MODIS. La *f*APAR presenta una relación aproximadamente lineal con diversos índices de vegetación (Mynemi & Williams, 1994; Roujean & Bréon, 1995), y también se puede estimar a través de la inversión de modelos de transferencia radiativa (Knyazikhin *et al.,* 1998). Los índices de vegetación tradicionales (de banda ancha), sin embargo, no son tan útiles para calcular ε, especialmente en bosques mediterráneos. Estos ecosistemas presentan cambios estacionales muy suaves de estos índices, pero grandes cambios en la absorción de CO_2, modulados por la disponibilidad de agua y, consiguientemente, por su estrés hídrico. Se puede considerar que ε depende del tipo de vegetación y del tiempo, englobando esta última dependencia tanto la evolución fenológica (variación intra-anual) como las variaciones temporales debidas al estrés hídrico (inter-anual):

$$\varepsilon = \varepsilon_{max}(\text{tipo de vegetación})\, f(t) \qquad (2)$$

Existen diversos procedimientos para capturar la variabilidad temporal de ε, por ejemplo, el término corrector de temperatura y de déficit de presión de vapor que utiliza el producto GPP de MODIS (MOD17A2 y A3). Estudios recientes relacionados con bosques mediterráneos que habitualmente presentan sequías más o menos

pronunciadas en la época estival, muestran que la inclusión de un factor de estrés hídrico (por ejemplo, el cociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, C_{ws} (Maselli *et al.*, 2009)), mejora los resultados. En la misma línea se está ensayado con el índice de reflectividad fotoquímico (Garbulsky *et al*., 2008), PRI=$(b_{531}-b_{ref})/(b_{531}+b_{ref})$, siendo b_{531} la reflectividad en la banda centrada en 531 nm, y b_{ref} la de una banda de referencia.

En este trabajo se realiza un análisis de las variables enumeradas en el párrafo anterior a partir de medidas diarias de GPP a lo largo de cinco años en un bosque mediterráneo situado en la Toscana (Italia). El objetivo es estudiar hasta qué punto las imágenes MODIS son útiles para capturar la variabilidad temporal de los principales inputs del modelo utilizado (ec. 1), sobre todo la variabilidad inter-anual debida al estrés hídrico propio de estas zonas en verano.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Zona de estudio y datos

La zona de estudio se encuentra en el Parque Natural de San Rossore, en la Toscana (Chiesi *et al*., 2007). Se trata de una zona llana, dominada por *Pinus pinaster*, de clima mediterráneo subhúmedo, y en la que se ubica una torre de medida de flujos (*eddy covariance*). Se dispone de las medidas diarias de GPP y PAR (radiación fotosintéticamente activa, entre 0.4 y 0.7 μm) a lo largo de los años 2001-2005. Esta zona está incluida en el proyecto FLUXNET (http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/). Las medidas de GPP se han derivado siguiendo la metodología descrita en Papale *et al*. (2006). A partir de los datos meteorológicos disponibles se ha calculado también el coeficiente de estrés hídrico C_{ws}.

La tabla 1 muestra todas las imágenes MODIS que se han descargado abarcando el periodo de estudio 2001-2005.

PRODUCTO MODIS	VARIABLE
MOD15A2	*f*APAR cada 8 días
MCD43A1	BRDF (k_0, k_1 y k_2)
MCD43A2	*Quality flags*
MOD35	Máscara de nubes
MOD021km	PRI (b11, b12)
MOD03	Geolocalización

Tabla 1: Imágenes MODIS utilizadas en el cálculo de las variables que se especifican**.**

Métodos

Se van a analizar en el trabajo tres productos de *f*APAR diferentes de MODIS, que denominamos *f*APAR MODIS, *f*APAR RDVI y *f*APAR NDVI. El primero es el producto oficial de NASA (MOD15A2), obtenido a partir de inversión de modelos de transferencia radiativa (Knyazikhin *et al.,* 1998). El segundo se calcula a partir del índice de vegetación RDVI utilizando la BRDF (combinación lineal de kernels). Sigue la metodología propuesta por Roujean & Bréon (1995), que consiste en utilizar una geometría óptima en el plano principal (θ_s=60°, θ_v=45°, φ=0°) que reduce las incertidumbres debidas al tipo de cubierta y al suelo de fondo. Y el tercero, se calcula a partir de la relación empírica propuesta por Mynemi & Williams (1994) pero utilizando la BRDF en el nadir (el k_0).

Por otra parte, se calculará el PRI utilizando la reflectividad (TOA) de las bandas 11 (centrada en 531 nm) y 12 (551 nm) (véase tabla 1).

De los productos derivados de las imágenes MODIS se extraerán los valores correspondientes al píxel donde se ubica la estación de San Rossore.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medidas de GPP de la estación a lo largo de los cinco años se muestran en la figura 1.

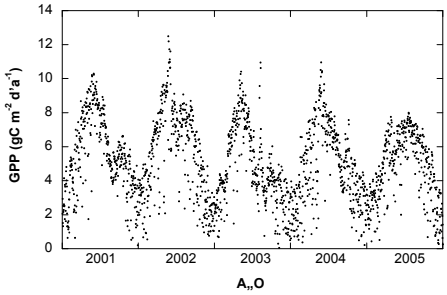


Figura 1: Medidas diarias de GPP de la estación a lo largo de cinco años.

Se observa la evolución típica anual, con máximos de producción que se alcanzan durante el verano y mínimos durante el invierno. Esto es consecuencia, en parte, de la evolución temporal de la radiación solar. De hecho la relación GPP/PAR presenta un coeficiente de determinación R^2=0.624. Es decir, parece que alrededor del 62% de la varianza de la GPP queda justificada por la radiación solar incidente.

La figura 2 muestra (en rojo) el cociente GPP/PAR que, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2), depende únicamente del tipo de vegetación y de su estado. Este cociente muestra una evolución temporal totalmente distinta, con mínimos en verano, época donde se ralentiza la actividad fotosintética de las plantas y que, además, presentan valores muy distintos de unos años a otros. Son de destacar los años 2003 y 2005, que se vieron afectados por sendas sequías, siendo la primera especialmente severa.

La figura 2 muestra, además, tres modos distintos de cuantificar el estrés hídrico. En 2(a) se representa el C_{ws} (en azul). Se detectan los mínimos estivales debidos a la sequía. En 2(b) se representa el índice PRI (en verde), ampliamente utilizado como indicador del estrés hídrico (Garbulsky *et al*., 2008). Ciertamente, alcanza sus valores mínimos durante los meses de verano, pero esta evolución no sólo es atribuible a una situación de estrés. De hecho, no se observa un mínimo absoluto significativo en el verano de 2003 (el más seco de la serie). Diversos análisis de selección de variables (*elastic-net*) han puesto de manifiesto la alta correlación existente entre la geometría de observación y de iluminación y el valor del PRI, provocando su dependencia no sólo con el estado de la planta sino con efectos de anisotropía en la cubierta vegetal relacionados con la mayor o menor presencia de sombras. Por este motivo se ha procedido a normalizar el valor del PRI (NPRI) de estos efectos puramente geométricos. Para ello se ha encontrado su dependencia funcional con los ángulos cenital solar y cenital de observación (los que más influyen) y, posteriormente, se han calculado los residuos que resultan de eliminar sendas dependencias del valor del PRI. El resultado se representa en 2(c). La señal del NPRI (en azul) sólo acusa teóricamente los cambios de la vegetación y no los provocados por factores geométricos. Efectivamente esta señal muestra mínimos en verano pero de intensidad muy diversa entre los distintos años, alcanzándose el mínimo absoluto en el 2003, como era deseable.

Tanto C_{ws} como el NPRI son potencialmente útiles para realizar un seguimiento del estrés hídrico en la vegetación y proceder a su cuantificación para ser incorporado en modelos de estimación de flujos de carbono. El NPRI resulta especialmente interesante porque se estima a partir de los datos del sensor MODIS. Sin embargo, entre la señal del NPRI y la de GPP/PAR se detecta un desfase de unos dos meses que, de momento, limita la utilidad del mismo para realizar estimaciones en tiempo real.

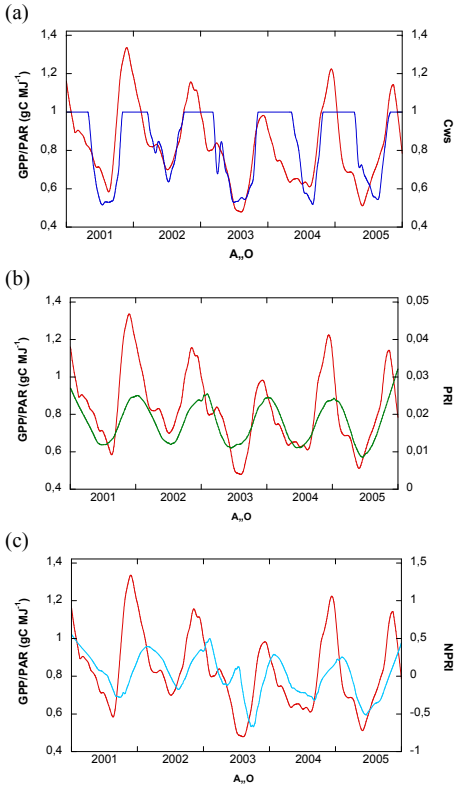


Figura 2: Representación simultánea del cociente GPP/PAR (en rojo) y diversas variables relacionadas con el estrés hídrico: (a) el C_{ws} (en azul oscuro); (b) el PRI (en verde); (c) el NPRI. Todas las curvas se presentan suavizadas.

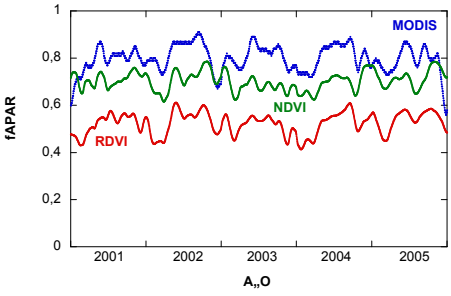


Figura 3: Valores suavizados de *f*APAR estimados a partir de las imágenes MODIS utilizando tres metodologías diferentes.

La figura 3 muestra los tres productos de *f*APAR derivados de las imágenes MODIS utilizando la metodología descrita en el apartado anterior. Y la figura 4 las tres series temporales del factor de eficiencia de uso de la radiación (derivadas a partir de cada uno de los *f*APAR y

del cociente GPP/PAR medido en la estación), junto con el índice NPRI. Nuevamente se observa la capacidad del mismo para cuantificar las variaciones inter-anuales de ε. Variaciones que, salvo un factor de escala, resultan similares para los tres productos de *f*APAR utilizados.

Por último se muestra la GPP estimada *vs*. la GPP medida (figura 5). La primera se ha calculado utilizando las imágenes MODIS con ε = 1.9 gC MJ^{-1}, el término corrector del estrés C_{ws} y el *f*APAR RDVI. Se obtiene un coeficiente de determinación R^2=0.645. Si se utilizan los productos de *f*APAR MODIS y *f*APAR NDVI, se obtienen correlaciones similares, R^2=0.643 y R^2=0.635, respectivamente.

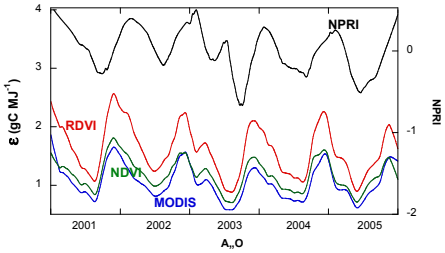


Figura 4: Representación simultánea de NPRI y ε estimada utilizando cada uno de los productos *f*APAR derivados de MODIS.

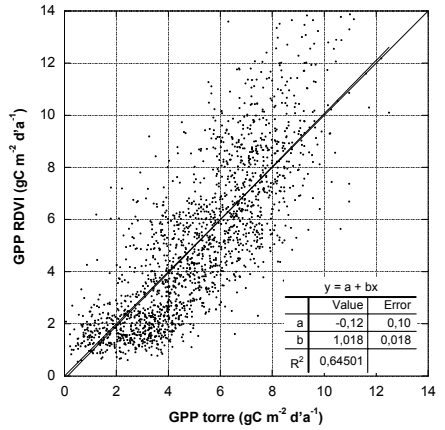


Figura 5: GPP estimada de las imágenes MODIS *vs*. GPP medida en la estación.

CONCLUSIONES

El PRI sólo es capaz de capturar la variabilidad inter-anual de ε después de un tratamiento muy refinado, observándose un desfase temporal entre las dos señales. La utilización del ε calculado a partir del PRI puede mejorar la estimación de la fijación de carbono en los bosques mediterráneos, siempre que se resuelva adecuadamente el mencionado desfase. La GPP, por el contrario, apenas resulta sensible al método de estimar la *f*APAR.

BIBLIOGRAFÍA

CHIESI, M., MASELLI, F., MORIONDO, M., FIBBI, L., BINDI, M., RUNNING, S.W., 2007. *Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes*. Ecological Modelling, 206, 179-190.

GARBULSKY, M.F., PEÑUELAS, J. PAPALE, D., FILELLA, I., 2008. *Remote estimation of carbon dioxide uptake by a Mediterranean forest*. Global Change Biology, 14, 2860-2867.

KNYAZIKHIN, Y., MARTONCHIK, J.V., MYNENI, R.B., DINER, D.J., RUNNING, S.W., 1998. *Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy LAI and FAPAR from MODIS and MISR data*. Journal of Geophysical Research 103, 32257–32275.

MASELLI, F., PAPALE, D., PULETTI, N., CHIRICI, G. CORONA, P., 2009. *Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 113, 657-667.

MYNEMI, R.B., WILLIAMS, D.L., 1994. *On the relationship between FAPAR and NDVI.* Remote Sensing of Environment, 49, 200-211.

PAPALE, D., REICHSTEIN, M., AUBINET, M., CANFORA, E., BERNHOFER, C., KUTSCH, W., LONGDOZ, B., RAMBAL, S., VALENTINI, R., VESALA, T., YAKIR, D., 2006. *Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation*. Biogeosciences, 3, 571-583.

ROUJEAN, J. L. AND BRÉON, F. M., 1995. *Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements.* Remote Sensing of Environment, 51, 375-384.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto ÁRTEMIS (CGL2008-00381) del MICINN. Los autores agradecen al Dr. G. Seufert el suministro de los datos de la estación de San Rossore.

Análisis de los bosques de la Península Ibérica en la década 2000-2010 a partir del estudio multi-temporal de datos MODIS GPP y EVI

C. Giner, B. Martínez y M.A. Gilabert

Unitat de Investigació en Teledetecció. Universitat de València. C\ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (València, España). beatriz.martinez@uv.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar los cambios experimentados por los bosques de la Península Ibérica en el periodo 2000-2010. Para ello se ha aplicado la metodología basada en el análisis multi-resolución (AMR) con *wavelets* a datos de producción primaria bruta GPP (*Gross primary production*) y del índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) derivados del sensor MODIS. Para evaluar los cambios significativos experimentados en el periodo considerado, se ha aplicado el test no-paramétrico de Mann-Kendall y el método Sen a la componente de tendencia derivada del análisis MRA. Los resultados muestran un alto acuerdo en los cambios detectados por la GPP y por el EVI para las zonas forestales.

Palabras clave: detección de cambios, bosques, Península Ibérica, *wavelets*.

ABSTRACT

This paper aims to assess vegetation changes on the forest canopies of the Iberian Peninsula over the period 2000-2010. A multi-resolution analysis (MRA) based on the wavelet transform has been implemented to GPP (Gross Primary Production) and EVI (Enhanced Vegetation Index) from MODIS data. In order to derive significative changes, the Mann–Kendall non-parametric test and the Sen's method have been applied to the trend component derived from the MRA. The results reveal a high agreement between the GPP and EVI trend for the forest canopies.

Keywords: *change detection, forest, Iberian Peninsula, wavelets.*

INTRODUCCIÓN

A lo largo de las dos últimas décadas se han analizado los cambios experimentados por la vegetación en la Península Ibérica. Los resultados han puesto de manifiesto una disminución de la cubierta vegetal lenta y gradual principalmente en áreas en proceso de degradación en el sureste de la península (Martínez & Gilabert, 2009). Esta tendencia no se observa tan claramente en zonas forestales, donde además se aprecian cambios bruscos debidos principalmente a incendios forestales.

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar los cambios experimentados por los bosques de la Península Ibérica en la última década. Para ello, se han aplicado el método espectral de análisis multi-resolución (AMR) basado en las *wavelets* al producto de producción primaria bruta MODIS GPP 1 km y al de índice de vegetación MODIS EVI 1 km para el periodo 2000-2010. Se ha seleccionado el producto GPP por estar directamente relacionado con los intercambios de CO_2 entre la vegetación y la atmósfera. Por otra parte, el producto MODIS EVI ha demostrado ser más sensible a variaciones en cubiertas densas que otros índices más comúnmente usados como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Huete *et al*., 2002). El AMR ha demostrado ser de gran utilidad para estudiar la evolución temporal de los ecosistemas vegetales, al permitir descomponer la señal radiométrica en dos componentes: una componente de variabilidad, cuya amplitud se relaciona con su cambio estacional, y una componente de tendencia, que indica si está experimentando un aumento o disminución neta de su cantidad y de su actividad fotosintética a lo largo del tiempo (Martínez & Gilabert, 2009; Percival *et al*., 2004).

DATOS

El producto MODIS GPP utilizado consiste en un compuesto de 8 días a 1 km para el periodo

2000-2010 y para la Península Ibérica (disponible en la página web del grupo *Numerical Terradynamic Simulation Group* (NTSG), en la Universidad de Montana). Se trata de una versión mejorada del producto oficial MODIS (MOD17A2). Este producto ha demostrado su capacidad en el estudio de cambios en la cubierta (Zao & Running, 2010).

El producto MODIS EVI utilizado se ha obtenido a partir del producto oficial MOD13A2 C5 con una resolución temporal de 16 días. El índice EVI se ha diseñado con el objetivo de realzar la señal de la vegetación y disminuir la influencia de la atmósfera (Huete *et al*., 2002).

Además, se ha utilizado la clasificación *CORINE Land Cover* para distinguir las diferentes clases de bosques de la Península Ibérica. Se han considerado cuatro clases de cubierta: caducifolio, coníferas, bosque mixto y zonas de bosque con vegetación natural.

METODOLOGÍA

Análisis multi-resolución (AMR)

Una de las aplicaciones más extendidas que tiene la transformada *wavelet* (TW) en el dominio discreto temporal es la reconstrucción de series temporales a partir del análisis multi-resolución (Burke-Hubbard, 1998). En este caso, la TW se implementa en un algoritmo piramidal para descomponer la señal en diferentes escalas temporales trasladando un filtro de paso bajo (A) y de paso alto (D) asociado a la *wavelet* madre. El filtro pasa alta (serie detalle) retiene las componentes de alta frecuencia, mientras que el filtro pasa baja (serie de aproximación) retiene las de baja frecuencia. De este modo, la señal original $f(t)$ se puede reconstruir a partir de la siguiente expresión:

$$f(t) = A_m(t) + \sum_{j=1}^{m} D_j(t) \qquad (1)$$

donde m es el nivel más alto de descomposición considerado. En el primer nivel de descomposición, $f(t)=A_1+D_1$, la señal original está formada por el filtro pasa baja, A_1, y el filtro pasa alta, D_1. En el segundo nivel, la componente de aproximación, A_1, se descompone a su vez en $A_1=A_2+D_2$, y así sucesivamente. De esta forma, la componente, D_j, se puede expresar como, $D_j=A_{j-1} - A_j$, la cual nos da información sobre una porción de la señal en la escala temporal definida por los niveles [j-1, j].

Procedimiento experimental

El AMR se ha aplicado a la serie original de MODIS GPP y al EVI utilizando la *wavelet* discreta Meyer por ser adecuada para el estudio de cambios con series temporales (Martínez & Gilabert, 2009). Las escalas temporales en las que se descompone la señal dependen de la frecuencia central de la *wavelet* madre y de la resolución temporal de la serie original, 8 días para MODIS GPP y 16 días para MODIS EVI (Tabla 1). En nuestro caso, se han escogido las componentes de aproximación A_6 y A_5 para MODIS GPP y EVI, por ser los niveles que presentan una escala de 384 días en la serie (aproximadamente un año). Posteriormente, se ha aplicado el test no-paramétrico Mann-Kendall y el método Sen a estas componentes para evaluar la magnitud y dirección de las variaciones interanuales a partir de la imagen de pendiente Q. El test Mann-Kendall permite además evaluar si dichas variaciones son significativas.

Nivel (j)	Escala (a)	Periodo MODIS GPP (días)	Periodo MODIS EVI (días)
1	2	12	24
2	4	24	48
3	8	48	96
4	16	96	192
5	32	192	384
6	64	384	768

Tabla 1: Escalas temporales del AMR para descomponer las series de GPP y EVI, donde j es el nivel de descomposición y a su escala asociada ($a=2^j$).

RESULTADOS

La Figura 1 muestra un ejemplo de descomposición de la señal original filtrada (A_2) y de la serie de aproximación para el EVI (A_5) y GPP (A_6) para dos píxeles de bosque de coníferas localizados en, (a) Guadalajara donde ocurrió un incendio en 2005 y (b) Galicia.

En ambos casos, destaca la alta estacionalidad de la GPP frente al EVI, con máximos en verano y mínimos en invierno. Esto es consecuencia de que la asimilación de carbono depende, en parte, de la radiación solar fotosintéticamente active (PAR) incidente y de las condiciones medioambientales (Carrara *et al*., 2004), tal como se demuestra en Gilabert *et al*. (2011, en este volumen), donde alrededor del 62% de la varianza de la GPP queda justificada por la radia-

ción solar incidente. Por el contrario, el EVI presenta un comportamiento más estable, dado que no depende tan directamente de las condiciones de iluminación y medioambientales sino de parámetros de la planta relacionadas con su biomasa verde y su actividad fotosintética.

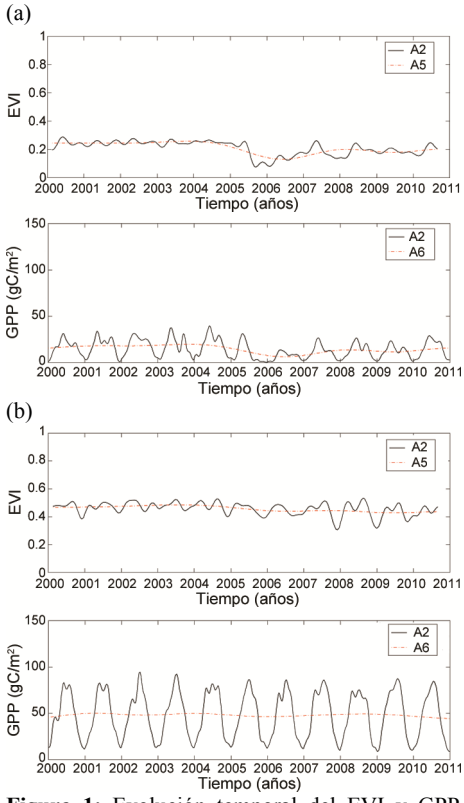


Figura 1: Evolución temporal del EVI y GPP para dos zonas de bosque de coníferas situadas en Guadalajara (a) y Galicia (b).

La Figura 2 muestra la imagen de cambios (Q) para el EVI (1a) y para la GPP (1b) para toda la Península Ibérica. En el caso del EVI cabe destacar la alta proporción de zonas con cambios negativos con respecto a los positivos (localizados al este de la península). La detección de cambios en la cubierta vegetal a partir de series temporales es, entre otros, altamente dependiente del periodo considerado y del año de inicio. Así como en Martínez & Gilabert (2009) se observaban cambios muy positivos con la serie NDVI NOAA-AVHRR en el norte de la península (periodo estudiado 1992-2004), en nuestro caso, se observa una tendencia opuesta. Por otra parte, se aprecian cómo zonas candidatas a experimentar procesos de degradación en los años anteriores al periodo analizado (sureste de Almería), muestran actualmente una recuperación de la cubierta (Figura 2). Estas diferencias en la tendencia con respecto a otros trabajos, pueden ser explicadas, en parte, por el régimen de precipitación de dicho periodo, tal como se demostró en Perez-Hoyos *et al*. (2010). Este estudio demostró a partir de datos meteorológicos para el periodo 2000-2008 una tendencia positiva del índice estandarizado de la precipitación (SPI) en el este de la península, debido a un aumento de la precipitación en 2007 y 2008. Por otra parte, la tendencia del SPI puso de manifiesto cambios negativos al norte y noreste de la Península debido, principalmente, a un periodo de sequía registrado en 2003.

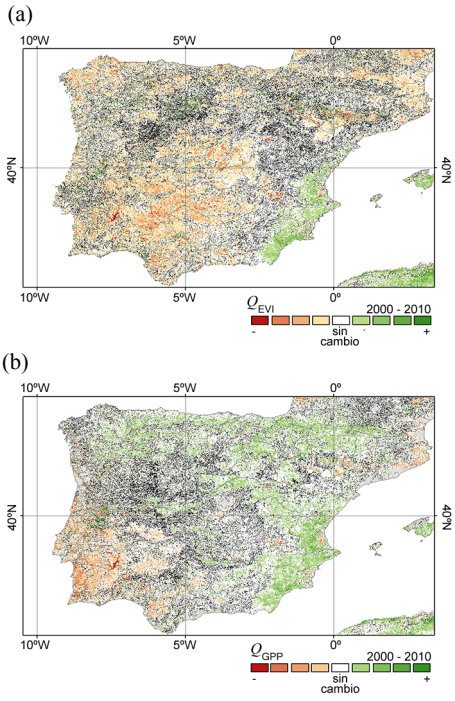


Figura 2: Pendiente (Q) derivada del AMR para la serie EVI (a) y GPP (b) para toda la Península Ibérica. En negro están representados aquellos píxeles cuya tendencia es no significativa.

En el caso de la GPP, se observa una mayor proporción de zonas con cambios positivos, sobre todo al norte y al este de la península (al igual que el EVI). Se detectan similitudes con el EVI en las zonas forestales del este de la península, en áreas donde se han localizado incendios forestales (e.g. sur de Portugal y zona de Andalucía) y al noroeste de la península. Sin embargo, muchas zonas donde la GPP muestra cambios positivos el

EVI presenta cambios no significativos y viceversa. Ambas imágenes parecen ser complementarias, lo que hace difícil realizar una interpretación conjunta.

Si sólo nos centramos en las zonas forestales (extraídas de la clasificación CORINE), se observa un acuerdo aceptable entre Q_{EVI} y Q_{GPP} con una correlación de 0.68 (Figura 3). Este acuerdo se mantiene cuando se consideran las clases de CORINE, caducifolio (0.62) y coníferas (0.68). Disminuye ligeramente en el caso de bosque mixto (0.56) y aumenta considerablemente cuando se considera la clase de bosque con presencia de vegetación natural (0.74).

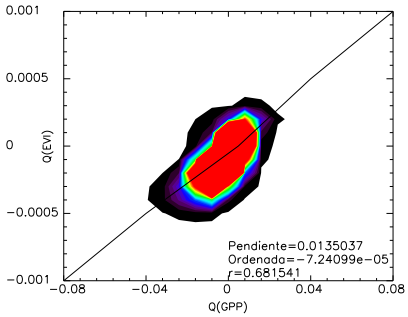


Figura 3: Diagrama de dispersión entre Q_{EVI} y Q_{GPP} para el periodo 2000-2010 y sólo para los bosques. La línea recta muestra la bisectriz.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta ha mostrado ser eficiente para la detección de cambios. Sin embargo, para poder extraer conclusiones acerca de la evolución de las zonas forestales haría falta una serie de datos más larga, lo cual es imposible con los datos MODIS en este momento.

Los cambios en la GPP y EVI se interpretan de forma distinta. La GPP de un ecosistema se refiere a la energía total fijada por fotosíntesis en las plantas donde parte de dicha energía se emplea en la respiración. Cuando el resultado de este proceso es positivo (producción primaria neta), se genera nueva biomasa y por tanto cabe esperar que el EVI también aumente. Esto es lo que sucede en bosques jóvenes y otro tipo de sistemas, como observamos en la zona este de la península (alta correlación entre Q_{GPP} y Q_{EVI}). Sin embargo, en bosques que han envejecido, la GPP sigue mostrando valores altos puesto que la planta sigue fijando energía mediante fotosíntesis, pero toda la energía que recoge la emplea en la respiración. Es decir, no se produce biomasa nueva y por tanto el EVI puede que no experimente cambios. Se podrían experimentar cambios negativos en el EVI según el régimen de precipitación.

BIBLIOGRAFÍA

BURKE-HUBBARD, B, 1998. *The World According to Wavelets. The story of a Mathematical Technique in the Making*, 2nd ed. Natick, Massachusetts: A.K. Peters 330 pp.

GILABERT, M.A., MASELLI, F., MORENO, A., CHIESI, M., y MARTÍNEZ, B, 2011. *Flujos de carbono en bosques mediterráneos integrando imágenes MODIS y datos meteorológicos. Validación en la Toscana (Italia)*. XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mieres del Camino (Asturias). Este volumen.

HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., and FERREIRA, L.G, 2002. *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. Rem. Sens. Env., 83,195-213.

MARTÍNEZ, B., and GILABERT, M.A, 2009. *Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform*. Rem. Sens. Env., 113, 1823-1842.

PÉREZ-HOYOS A, MARTÍNEZ, B., GILABERT, M.A., and GARCÍA-HARO, F.J, 2010. A multi-temporal analysis of vegetation dynamics in the Iberian Peninsula using MODIS-NDVI data. *EARSeL eProceedings*, 9(2), 22-30. ISSN 1729-3782.

PERCIVAL, D.B., WANG, M., and OVERLAND, J.E, 2004. *An introduction to wavelet analysis with application to vegetation monitoring*. Community Ecology, 5, 19-30.

ZHAO, M., and RUNNING, S.W, 2010. *Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009*. Science, 329, 940-943.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto ÁRTEMIS (CGL2008-00381) del MICINN y Land-SAF de EUMESAT.

Detección temprana de estrés en coníferas a partir del índice de reflectancia fotoquímico (PRI) e imágenes térmicas de alta resolución

R. Hernández-Clemente[1], R.M. Navarro-Cerrillo[1], J.P. Zarco-Tejada[2], L. Suárez[2], J. E. Frieyro[3] y A. Hayas[3]

[1] Departamento de ingeniería forestal. ETSIAM. Universidad de Córdoba. Apdo. 3048. 14080 (Córdoba, España). Correo electrónico: rociohc@uco.es

[2] Instituto de agricultura sostenible (ias), consejo superior de investigaciones científicas (CSIC), (Córdoba, Spain).

[3] EGMASA. Dpto. de Comunicación y Sistemas de Información y Unidad de I+D+i. Johan G. Gutenberg, 1. 41092, (Sevilla, Spain).

RESUMEN

La detección de niveles de estrés forestal ha sido el objetivo de numerosos trabajos basados en teledetección analizándose principalmente la relación entre parámetros biofísicos e índices de vegetación sensibles a cambios de estructura como el índice de área foliar o al contenido de clorofila. Sin embargo, existe una gran carencia de estudios enfocados a la detección temprana de estrés en bosques mediterráneos. El objetivo de este trabajo es presentar los avances realizados en la aplicación de imágenes hiperespectrales de alta resolución espacial para la detección temprana de niveles de estrés en coníferas mediterráneas sometidas a decaimiento forestal. Los resultados demuestran la aplicación potencial de los datos térmicos y el índice de vegetación PRI obtenidos a alta resolución espacial para detectar estrés hídrico en medio forestal. La detección de estrés hídrico en coníferas a partir de imágenes térmicas tiene implicaciones importantes para la detección temprana de decaimiento forestal.

Palabras clave: Sensores hiperespectrales, decaimiento forestal, PRI, imágenes térmicas.

ABSTRACT

Forest decline processes have been assessed based on remote sensing data mainly focused in the study of structural parameters such as leaf area index LAI and chlorophyll concentration. However, few works are focused in the early detection of stress levels in Mediterranean conifer focused under forest declaim conditions. The aim of this study is to show the results obtained in pre-visual remote sensing indicators to detect stress levels in conifer forest under decline. The results show the potential application of thermal data and the vegetation index PRI to detect water stress conditions levels in conifer forest. Pre- visual remote sensing indicators on conifer forest have relevant applications in the analysis and evaluation of forest decline processes.

Keywords: *Hyperspectral sensors, forest decline, PRI, thermal remote sensing.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el decaimiento forestal está afectando extensas zonas de España y Europa (Navarro-Cerrillo et al., 2006, Allen et al., 2009). La detección de niveles de estrés forestal ha sido el objetivo de numerosos trabajos basados en teledetección principalmente basados en la relación entre parámetros biofísicos e índices de vegetación sensibles a cambios de estructura como el NDVI (Schlerf and Atzberger 2006), o al contenido de clorofila (Moorthy et al., 2008; Zarco-Tejada et al., 2004).

Sin embargo, cuando la concentración de clorofila o la estructura de la cubierta se ven afectados por el estrés, el daño a la planta ya se ha producido, y el estado de la misma se ve comprometida. La detección de estrés en su fase temprana, por lo general se define como previsual y es una información crítica necesaria para la evaluación temprana de estrés. El Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI) es un índice fisiológico sensible al estado de epoxidación de los pigmentos ciclo de las xantofilas y la eficiencia fotosintética. El PRI fue propuesto por Gamon et al. (1992) como una diferencia norma-

lizada de la banda de 530 nm, donde se produce la absorción del pigmento xantofila, y una banda de referencia situado a 570 nm. La evaluación del estrés hídrico a la escala del dosel en masas forestales a partir del PRI es un problema complejo debido a que es un índice altamente afectado por las condiciones de luminosidad y la estructura. El estrés hídrico puede también analizarse a través de información térmica. Bajo condiciones de déficit de agua la planta induce el cierre de estomas, la reducción de la transpiración y como resultado un aumento de la temperatura de la hoja (Jackson, 1986). Sin embargo, la relación entre temperatura de dosel y estrés hídrico en bosques mediterráneos constituye un tema en la actualidad por explorar. El objetivo de este estudio es presentar los avances realizados en la aplicación de imágenes hiperespectrales de alta resolución espacial para la detección temprana de niveles de estrés en coníferas mediterráneas sometidas a decaimiento forestal.

SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra localizada en la Sierra de los Filabres (Almería). La masa forestal está compuesta principalmente por dos tipos de coníferas procedentes de repoblación de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold). El problema de decaimiento de pinares en la Sª de Filabres viene siendo observado por los Agentes Forestales desde el año 2002. Desde entonces los daños han experimentado un progresivo aumento hasta afectar a gran parte de las repoblaciones de pinos (Navarro *et al.,* 2007). Las investigaciones realizadas tuvieron como objetivo evaluar los efectos del decaimiento forestal a partir de PRI y de datos de temperatura de copa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Adquisición de imágenes

Se realizó un vuelo diurno con el escáner aerotransportado hiperespectral (AHS) durante el verano de 2008. Las imágenes fueron obtenidas a 2 m de resolución espacial y estaban compuestas por 80 bandas espectrales en el rango espectral desde 0,43 hasta 12,5 micras. Los vuelos se realizaron a las 8:00 GMT y 12:00 GMT, en zonas forestales con diferentes niveles de estrés.

Campañas de campo

La campaña de campo se realizó en Filabres en agosto del año 2008. Las variables medidas fueron: concentración de pigmentos (clorofila a y b, carotenos totales y xantofilas), contenido de agua, conductancia estomática, potencial hídrico, y temperatura de copa. Todas las medidas se realizaron a las 8:00 GMT y 12:00 GMT, con excepción de los potenciales hídricos que se midieron a las 3:00 GMT y 12:00 GMT, que corresponderían con los valores de *predawn* (antes de que la planta se someta al estrés diurno) y *midday* (potencial hídrico medido bajo máximo estrés). Las variables estructurales fueron IAF (índice de área foliar) y parámetros descriptivos de dosel tales como diámetro de copa, altura del arbolado, altura de fuste y distancia entre árboles.

Radiometrías y caracterización atmosférica

Para realizar los controles de calidad de la imagen se realizaron medidas de radiometría de campo. Se utilizó un radiómetro GER 3700. Se tomaron medidas de diferentes tipos de cubiertas homogéneas en cada uno de las pasadas y de manera simultánea al paso del avión.

Para la caracterización del espesor atmosférico se utilizó un fotómetro solar, modelo 540 Microtops II™ Sunphotometer, con el que se midió el espesor óptico de aerosoles, vapor de agua e irradiancia solar directa.

Tratamiento previo de las imágenes

Las imágenes AHS fueron suministradas por el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) corregidas a valores de reflectividad, incorporando un archivo IGM que permitió posteriormente su georreferenciación. Los datos fueron corregidos atmosféricamente utilizando el modelo ATCOR4, basado en el código de transferencia radiativa MODTRAN. Como datos auxiliares se utilizaron medidas de aerosoles en campo a 1.020 nm en el momento de la toma de la imagen.

La temperatura de superficie fue obtenida aplicando la técnica bicanal, también llamada split-window cuando se aplica en la región de entre 10-13.3 µm. Esta técnica está basada en el hecho de que la atenuación atmosférica producida en la radiancia emitida por la superficie es proporcional a la diferencia entre las radiancias *at-sensor* medidas simultáneamente en dos canales térmicos diferentes (McMillin, 1975).

Cálculo de índices y correlaciones

Cinco fórmulas del PRI (basados en R531) se calcularon utilizando diferentes longitudes de onda de referencia. A partir de modelos de transferencia radiativa LIBERTY e INFORM se analizaron los efectos estructurales sobre las diferentes formulaciones del PRI.

A partir de la información térmica captada por el sensor AHS, se obtuvo la diferencia entre la temperatura de copas y la ambiental, que más tarde sirvió para obtener correlaciones con la conductancia estomática y el potencial hídrico medidos en campo.

Finalmente las regresiones obtenidas sirvieron para elaborar mapas de dichos indicadores (IAF, contenido en clorofila, conductancia estomática, potencial hídrico, etc.) del estado fitosanitario de las masas de pinos estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos del análisis de regresión establecido entre la variable (Tª de copa menos Tª de aire) y las variables relacionadas con estás hídrico (conductancia estomática y potencíal hídrico). En ambos casos la relación era significativa obteniéndose coeficientes de regresión de 0.7, en el caso de conductacia estomática y de 0.53, en el caso de potenciales hídricos.

En la figura 2 se presenta el resultado cartográfico obtenido a partir de la variable (Tc-Ta). Puede apreciarse diferencias de temperatura de 5 grados entre zonas estresadas y zonas no estresadas.

En la figura 3 se presentan los resultados cartográficos obtenidos a partir de las formulaciones de PRI. Como puede observarse en la cartografía el PRI es capaz de distinguir tres niveles de daño diferenciados dónde el NDVI permanece invariable.

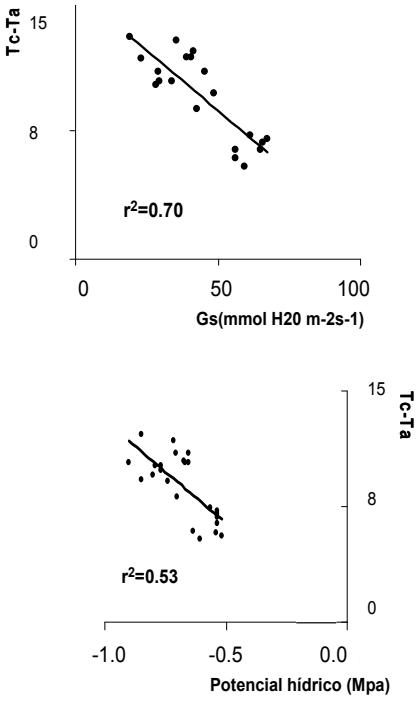


Figura 1: Regresión lineal establecida entre conductancia estomática y potencial hídrico y la variable (temperatura de copa – temperatura del aire) obtenida a partir de imágenes AHS en la Sª de los Filabres (Almería) en masas de *Pinus sylvestris.*

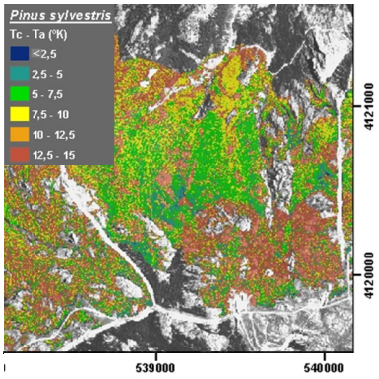


Figura 2: Cartografía obtenida a partir de la variable (temperatura de copa – temperatura del aire) obtenida a partir de imágenes AHS en la Sª de los Filabres (Almería) en masas de *Pinus sylvestris.*

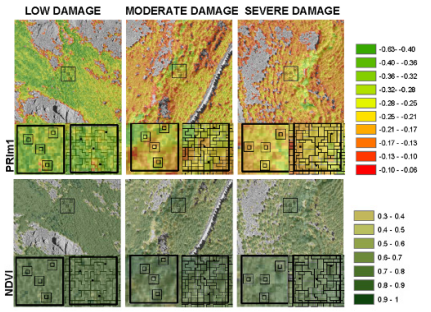


Figura 3: Cartografía obtenida a partir de PRI y NDVI obtenidos a partir de imágenes AHS en la Sª de los Filabres (Almería) en masas de *Pinus sylvestris.*

CONCLUSIONES

El estudio demuestra la sensibilidad de PRI frente a NDVI para cartografiar niveles previsuales de estrés hídrico en bosques afectados por decaimiento forestal. El índice de epoxidación de las xantofilas muestra relaciones significativas con PRI a escala foliar y a escala de copa. Los resultados obtenidos constituyen una aportación innovadora en la detección de los procesos de decaimiento forestal. El uso de los datos obtenidos por el sensor AHS permitió la determinación de niveles de estrés en base a la variable Tc-Ta (temperatura de copa-teperatura del aire) con una resolución espacial de 2,5 m. Tanto los datos térmicos derivados del sensor AHS como los índices de vegetación analizados a dicha resolución muestran mezcla espectral de vegetación y suelo en muchas de las parcelas analizadas, lo cual generó la necesidad de seleccionar píxeles puros de vegetación. Basados en dicha selección, a partir de los valores de Tc-Ta se discriminaban significativamente los tres niveles de afectación y se obtuvieron relaciones significativas con la conductancia estomática y potencial hídrico.

Los resultados demuestran la aplicación potencial de los datos térmicos y el índice de vegetación PRI obtenidos a alta resolución espacial para detectar estrés hídrico en medio forestal. La detección de estrés hidrico en coníferas a partir de imágenes térmicas tiene implicaciones importantes para la detección temprana de decaimiento forestal.

BIBLIOGRAFÍA

ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNI H., BACHELET D., MCDOWELL N., VENNETIER M., KITZBERGER T., RIGLING A., BRESHEARS D.D, HOGG E.H., GONZALEZ P., FENSHAM R., ZHANG Z., CASTRO J., DEMIDOVA N., LIM J.H., ALLARD G., RUNNING S.W., SEMERCI A. & COBB N. 2009. *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests.* Forest Ecology and Management, 259,660-684.

GAMON, J. A., PEÑUELAS, J., & FIELD, C. B. 1992. *A narrow-wave band spectral index that track diurnal changes in photosynthetic efficiency*. Remote Sensing of Environment, 41, 35−44.

JACKSON, R.D., & TAYLOR, S.A. 1986. *Thermal conductivity and diffusivity*. In: Klute, A. (Ed.), Method of Soil Analysis, Part 1, 2nd edn. ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 945–955

MOORTHY I., MILLER J.R., & NOLAND T.L**.** 2008. *Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: An assessment at the needle and canopy level*. Remote sensing of environment, *112*, 2824-2838.

NAVARRO CERRILLO, R.M., VARO M.A., LANJERI S., & HERNÁNDEZ CLEMENTE R., 2007. *Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) y pino salgareño (Pinus nigra Arnold) en la Sierra de los Filabres*. Ecosistemas 16 (3). Septiembre.

SCHLERF, M. & ATZBERGER, C.G. 2006 *Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing*. Remote sensing of environment, 100, 281-294.

ZARCO-TEJADA P., MILLER J., HARRON J., HU B., NOLAND T. & GOEL N. *et al.* 2004 *Needle chlorophyll estimation through model inversion using hyperspectral data for boreal conifer forest canopies*, Remote Sensing of Environment *89***,** 189–199.

Caracterización de la vegetación a través de análisis de variables topográficas, bioclimáticas y de reflectividad en el PN de La Tinença de Benifassá. (Castellón, España)

E.López-Pérez [1,2], T. Hermosilla[2,3], H. Boria[4] y L.A. Ruiz[2, 3]

[1] CVER. Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego. UPV. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 (Valencia, España) Correo electrónico: estloppe@etsia.upv.es

[2] Depto. De Ing. Cartográfica. UPV. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 (Valencia, España)

[3] CGAT. Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección. UPV. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 (Valencia, España)

[4] IAM. Instituto Agroforestal Mediterráneo. UPV. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 (Valencia, España)

RESUMEN

Se han caracterizado tres tipos de vegetación, a través de parámetros topográficos y ambientales, junto con el uso de ortoimágenes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), y con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica. Mediante el análisis de correlación y la evaluación de diferencias significativas entre características derivadas de la topografía del terreno, como la pendiente, orientación, elevación, junto con otras variables ambientales como la radiación emitida, y variables espectrales a través de análisis de texturas de una imagen y el índice de vegetación NDVI, se han analizado las características correspondientes a tres grupos de bosques formados por encinares, quejigares y pinares, ensayando un método para caracterizar la vegetación a partir de otras variables analizadas.

Palabras clave: vegetación, funciones discriminantes, clasificación forestal, PNOT, SIG.

ABSTRACT

Three types of vegetation have been characterized combining topographic and environmental parameters, with orthophotos of the Spanish National Plan of Survey of Aerial photos (PNOA), and with Geographic Information Systems. A correlation analysis and evaluation of significant differences has been performed. Considered variables were derived from topography, such as slope, aspect, elevation, other environmental variables such as radiation and spectral variables of texture measure image and the vegetation index NDVI. It has been analyzed though, the variables corresponding to three groups formed by oak forests, oaks and pines, testing a method to characterize vegetation from other variables.

Keywords: *vegetation, discriminant functions, forest classification, PNOA, GIS.*

INTRODUCCIÓN

Resulta complejo evaluar la delimitación y el crecimiento de la vegetación en los ecosistemas forestales, ya que no existen variables restrictivas que los definan.

Tradicionalmente, los inventarios de vegetación se han realizado a partir de muestras tomadas *in situ*, mediante el análisis de pequeñas zonas localizadas y extrapolando la información a otras áreas, sin considerar el componente espacial que ofrezca la certeza de cumplir todas las condiciones óptimas para el desarrollo de la vegetación en su mejor estado ecológico.

Los modelos de parámetros biofísicos, extraídos de la topografía e imágenes mediante la interpretación de la distribución espacial de la vegetación, son útiles en la toma de decisiones para la gestión óptima de la vegetación forestal.

Para llevar a cabo el estudio se ha elegido una zona de enorme valor paisajístico como la que ocupa las proximidades del Parque Natural de La Tinença de Benifassá, localizada al norte de la Comunidad Valenciana. Se trata de un territorio de acentuada orografía, son tierras de alta montaña, y situadas a pocos kilómetros del mar Mediterráneo. La cubierta vegetal está constituida fundamentalmente por bosques de encinares, quejigares y pinares y sus correspondientes etapas seriales. En las áreas de clima más húmedo, la vegetación prístina de quejigares, utilizada como fuente de recursos energéticos, fue sustituida por plantaciones de pino negral que actualmente dominan gran parte del paisaje como bosques naturales.

Anteriores estudios realizados con SIG e imágenes aéreas han relacionado datos de elevación y texturas de imágenes para la obtención de características de la vegetación (véase Ruiz et al., 2005). El estudio que aquí se lleva acabo difiere en que el análisis se ha basado a nivel de objeto. Adicionalmente, hay que tener en cuenta el alto valor natural que mantiene hoy el área de estudio.

DATOS DE PARTIDA

La extracción de información espectral, espacial y topográfica, fue tomada de fotografías aéreas del PNOA de 0,5 m de resolución espacial, correspondientes al vuelo realizado en septiembre de 2008, comparadas con imágenes tomadas en invierno (del mismo año) y cedidas por **OCMA** (Oficina Comarcal de Medio Ambiente), facilitó la interpretación de los bosques analizando la variabilidad de sus hojas. Como base topográfica se utilizó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) derivado de mapas topográficos a escala 1:10.000 (Instituto Cartográfico Valenciano).

Las imágenes cuentan con cuatro bandas (tres en la región visible y una en el infrarrojo cercano). La extracción de características ha sido realizada en teselas delimitadas *in situ,* correspondientes a tres tipos de bosques homogéneos existentes en la zona y con el apoyo de cartografía base del Tercer Inventario Forestal Nacional (3IFN) y de la interpretación de ortofotografías aéreas. La figura 1 muestra ejemplos de las especies correspondientes a los tres bosques homogéneos puros y el número de teselas inventariadas *in situ*.

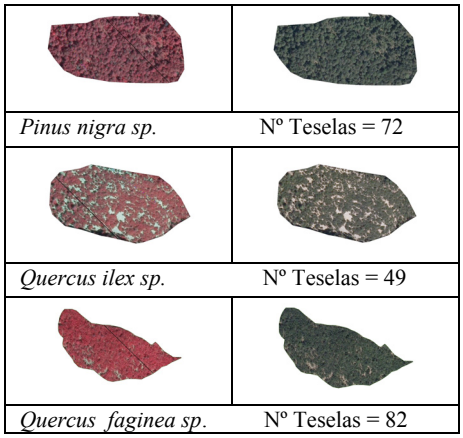


Figura 1: Ejemplos de las teselas definidas, mostradas en falso color infrarrojo (izquierda) y color verdadero (derecha).

Para la obtención de las variables topográficas se construyó un MDE, tomando las curvas de nivel cada 10 m. El MDE en formato raster ha servido de base para el cálculo de pendientes, orientación y la radiación potencial.

Otras fuentes de datos, como los procedentes del mapa de Series de Vegetación de España de Rivas Martínez a escala 1:400.000 y obtenidos del banco de datos de biodiversidad del MMA, fueron utilizados para la descripción biográfica y ecológica de la zona. Los datos procedentes del 3IFN, a escala 1:50.000, sirvieron de base de cartográfica temática para la delimitación, durante las visitas de campo, de las áreas con las distintas especies, con apoyo de GPS y del Mapa y guía excursionista de la Tinença de Benifassá, diseñado por El Tossal, a escala 1:30.000. La información temática se utilizó para obtener un conocimiento intuitivo del área de estudio, previo al trabajo de campo.

METODOLOGÍA

Cálculo de características del MDE

Se obtuvieron las variables pendiente y orientación correspondientes a cada tesela, así como la radiación potencial directa emitida por el sol y que llega a la superficie de la Tierra.

La radiación solar es un factor determinante para la distribución espacial de la vegetación, siendo junto con la elevación, la pendiente y el tiempo de exposición, un factor limitante. La

radiación solar que llega a la superficie está relacionada directamente con factores atmosféricos, como la dispersión y absorción, así como el grado de nubosidad.

Debido a la ausencia de datos de nubosidad, se procedió a calcular la radiación global recibida, tomando sólo valores de la radiación directa. Así, se calculó la energía proveniente de la radiación solar que llega a cada píxel del MDE calculado previamente a lo largo del año. El análisis se elaboró para el año 2008, coincidiendo así con la fecha de adquisición de imágenes.

Cálculo de características espectrales

Las variables espectrales utilizadas fueron dos de las cuatro bandas disponibles, correspondiendo a las bandas que representan la energía reflejada del visible y del infrarrojo cercano. La signatura espectral correspondiente a la vegetación sana muestra un fuerte contraste entre la baja reflectividad del rojo y la alta reflectividad en el infrarrojo próximo. Esta diferencia es mayor cuanto mayor es la densidad de la vegetación y mejor su estado sanitario, (Chuvieco, 2002).

Con el fin de sintetizar el grado de biomasa y densidad de vegetación, se calculó del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), cuya expresión es:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \qquad (1)$$

donde IR corresponde al Infrarrojo cercano y R corresponde a la banda del rojo.

Los valores de NDVI para las tres especies forestales consideradas son similares, lo que indica que se trata de bosques que cuentan con un gran parecido en el grado de la biomasa ocupada.

Análisis de textura

La textura de una imagen indica las diferencias y la distribución de los niveles de gris en un determinado vecindario, y su cálculo se basa en el cálculo y asignación de ciertos índices a cada píxel en función de su vecindario.

Se calcularon variables de textura de 2º orden, basadas en la matriz de co-ocurrencias de los niveles de gris (MCNG), que se obtuvo considerando un tamaño de vecindario de 13x13, elegido con el criterio de capturar la textura de las tres clases objeto de estudio, y capturando así su variabilidad.

Este método presenta la desventaja de que los pixeles de los bordes pueden tomar valores mezcla de dos o más texturas diferentes (Ruiz et al., 2005). Sin embargo, al trabajar por objeto este problema se eludió. A efectos de cálculo, se redujo el área de los bosques en 4m para evitar la inclusión de los valores fuera de los límites y que no interfirieran en el análisis. Con una distancia de un pixel se calcularon 6 medidas de textura para cada objeto o tesela, basadas en las propuestas por Haralick (1973) y cuyas ecuaciones se recogen en la Tabla 1;

Medida	Expresión
Uniformidad	$\sum_{i=0}^{N_g-1}\sum_{j=0}^{N_g-1} p(i,j)^2$
Entropía	$-\sum_{i=0}^{N_g-1}\sum_{j=0}^{N_g-1} p(i,j)\cdot\log[p(i,j)]$
Contraste	$\sum_{i=0}^{N_g-1}\sum_{j=0}^{N_g-1}(i-j)^2\cdot p(i,j)$
Media	$\sum_{i=0}^{N_g-1} i\cdot p(i)$
Varianza	$\sum_{i=0}^{N_g-1}\sum_{j=0}^{N_g-1}(i-\mu)^2\cdot p(i,j)$
Momento de diferencia inverso	$\sum_{i=0}^{N_g-1}\sum_{j=0}^{N_g-1}\frac{1}{1+(i-j)^2}\cdot p(i,j)$

Tabla 1: Características de textura derivadas de la MCNG calculadas.

Análisis discriminante y validación

Con el objetivo de seleccionar las variables y evitar redundancias, se elaboró un análisis de correlaciones entre dichas variables, poniéndose en evidencia que la entropía y el contraste derivados de la MCNG presentaban altas correlaciones, por lo que se decidió prescindir de ellas en el análisis. Finalmente, 8 variables fueron utilizadas para el estudio, de las cuales cuatro (elevación, NDVI, orientación, pendiente, radiación) pertenecen a variables topográficas o espectrales, y cuatro (media, varianza, homogeneidad, momento de diferencia inverso) corresponden a variables texturales.

Para conocer la existencia de diferencias significativas entre las variables estudiadas y clasificar cada objeto en un grupo de vegetación, se aplicó el método de análisis discriminante

lineal. Con este procedimiento, se elaboraron las funciones discriminantes que podrían ser aplicadas para predecir la clase de nuevas teselas de las tres especies analizadas.

RESULTADOS

La validación del método empleado se ha llevado a cabo mediante el análisis de la matriz de confusión (Congalton, 1991). 93 observaciones fueron utilizadas para el ajuste del modelo y se obtuvo un resultado del 78.2% de fiabilidad global. En la Tabla 2 se detallan los resultados y las fiabilidades obtenidas para las tres clases estudiadas.

	Pn	Qf	Qi	Total	FU
Pn	38	3	5	46	0,83
Qf.	2	36	7	45	0,80
Qi	1	6	12	19	0,63
Total	41	45	24	110	
FP	0,93	0,80	0,50		**0,782**

Tabla 2: Resultados de la matriz de confusión, para la validación del método (Pn = *Pinus nigra*, Qf = *Quercus faginea* y Qi= *Quercus ilex, FU= fiabilidad del usuario, FP = fiabilidad del productor*).

Las fiabilidades más altas pertenecen a *Pinus nigra y Quercus faginea* debido, en parte, a que presentan condiciones más homogéneas en su crecimiento. La especie *Quercus ilex* presenta los valores más bajos, debido a la enorme variabilidad que existe en las condiciones ambientales y topográficas que pueden darse para su desarrollo.

CONCLUSIONES

El método empleado permite profundizar en la relación entre las variables topográficas y la discriminación de las tres especies forestales estudiadas. El uso de imágenes aéreas podría permitir la obtención de un modelo de clasificación de estas especies en la zona de estudio.

El análisis presenta limitaciones, debido a la existencia de zonas donde la vegetación no se presente en condiciones completamente naturales y tenga un elevado factor antrópico. Es necesario llevar a cabo estudios más profundos de cada bosque, obteniendo más variables de medida que definan las áreas ecológicamente más potenciales para el desarrollo óptimo de las especies analizadas.

La combinación de Sistemas de Información Geográfica con imágenes áreas de alta resolución presenta una gran aplicabilidad en el estudio espacial de la vegetación, ya que partiendo de un planteamiento real de las condiciones óptimas de crecimiento de poblaciones de vegetación, se puede llegar a delimitar áreas en las que sea apropiada la reintroducción o repoblación.

Las probabilidades de éxito del método de análisis están estrechamente ligadas al grado de conocimiento de la especie, al detalle y la calidad de la cartografía utilizada.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO SALINERO, E. 2002. *La observación de la Tierra desde el espacio*. Teledetección Ambiental . Ariel, Madrid, pag. 337-345.

CONGALTON, R., 1991, *A review of assessing the accuracy of classications of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, 37(1), pag. 35-46.

HARALICK, R.M., K SHANMUGAM AND DINSTEIN 1973. *Texture features for image classification*. IEEE Transactions on Systems, Man. and Cibernetics. SMC-3 : 610-622.

RUIZ, L.A, RECIO RECIO J.S, y FERNÁNDEZ SARRÍA A.; 2005. *Clasificación de entornos forestales mediterráneos mediante técnicas de análisis de texturas*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, pag. 187-192.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Joan Busquets Moya, del OCMA (Sant Mateu, Castellón) por su apoyo y ayuda en campo.

Desarrollo de una metodología operativa para la actualización de cartografía forestal

F. Moral, M. Lerner, B. Sánchez y M. J. Checa

Tragsatec. C/ Julián Camarillo 6B, 28037 Madrid. Tel: 913226534. Correo electrónico: bsh@tragsa.es

RESUMEN

Las administraciones públicas tienen una necesidad creciente de disponer de cartografía actualizada que facilite la gestión de los ecosistemas naturales. La generación y actualización tradicional de cartografía temática resulta lenta y costosa para el actual marco económico y tecnológico. Este trabajo se ha desarrollado como un proyecto de innovación tecnológica I+D+i del grupo TRAGSA. El objetivo del proyecto es el desarrollo de una metodología que, partiendo de datos de observación de la Tierra, permita reducir costes y acelerar la producción cartográfica forestal. Esta metodología genera una imagen de cambios adecuada para ser usada como apoyo en la actualización de la cartografía forestal.

Palabras clave: teledetección, tratamiento digital de imágenes, detección de cambios, cartografía forestal, producción cartográfica.

ABSTRACT

Public authorities have a growing need for up-to-date mapping in order to manage natural environment. Traditional generation and updating of thematic cartography is time-consuming and expensive for the current technologic and economic framework. This work has been developed as a technologic innovation R&D project from Grupo TRAGSA. The goal of this research is to develop a methodology based on Earth observation data to reduce costs and time in forest mapping. This method yields a change image suitable for focusing updating of forest mapping.

Keywords*: remote sensing, digital image processing, change detection, forest mapping, cartographic production.*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los ecosistemas naturales permite valorar económica, ecológica y socioculturalmente los recursos forestales y entrar al servicio de la planificación y la gestión sostenible del territorio. La evolución temporal de estas áreas cuantifica el grado de demanda para otros usos así como las presiones ambientales que se ciernen sobre los ecosistemas forestales, deforestaciones por talas o incendios y repoblaciones.

Existen diversas cartografías forestales: a nivel nacional el Mapa Forestal de España (MFE), cartografías procedentes de las Comunidades Autónomas, etc. Estas cartografías se han generado mediante fotointerpretación y delineación de superficies sobre ortofotografías o puntualmente sobre imágenes de satélite. La demanda actual de la sociedad y los compromisos de la administración pública con organismos internacionales, requieren una cartografía forestal actualizada en periodos cortos de tiempo y que no implique la dedicación de grandes recursos económicos.

La posibilidad de disponer anualmente para todo el territorio nacional de imágenes multiespectrales a diferentes resoluciones, a través del Plan Nacional de Teledetección (PNT), hace que las técnicas de análisis de cambios constituyan una herramienta útil y asequible en actualizaciones de cartografía temática. El tratamiento digital automatizado minimiza y objetiva las labores de fotointerpretación, reduciendo los costes de producción y actualización de cartografía.

La Subdirección de Innovación tecnológica del Grupo TRAGSA ha coordinado un proyecto I+D+i para el desarrollo de una metodología que optimice la actualización de cartografía forestal. La investigación se ha dirigido hacia el diseño de una sistemática integral de detección de cambios partiendo de imágenes de dos fechas diferentes mediante técnicas de tratamiento digital de imágenes. Esta solución incluye procedimientos y

herramientas para la gestión de un gran número de datos, la preparación inicial de los mismos, la detección de cambios, clasificación y la depuración de resultados. A continuación se trata cada uno de sus componentes.

FUENTES DE DATOS Y ZONAS PILOTO

Datos de Observación de la Tierra

Como datos de partida es necesaria una cobertura bitemporal de imágenes de la zona de estudio. La presente investigación se ha desarrollado a partir de imágenes Landsat 5 y SPOT 5 procedentes del PNT.

Mapa Forestal de España

El MFE es la cartografía de situación de los ecosistemas forestales españoles del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), pensada para ser usada en un amplio abanico de aplicaciones en el campo de la gestión medioambiental. Para este trabajo se ha utilizado el MFE como base cartográfica para la determinación de las superficies forestales.

Zonas Piloto

Los métodos que se explican a continuación se han aplicado y validado sobre dos zonas piloto de características diferentes: zona interior de la provincia de Valencia (Reserva Natural Muela de Cortes, Cofrentes), con superficies muy estables con pocos cambios; y Galicia (provincia de A Coruña) donde encontramos zonas muy dinámicas con grandes incendios acaecidos en el verano de 2006. Las fechas y sensores se detallan en la Tabla 1.

Zona	Imagen T1	Imagen T2
Valencia	SPOT 5 (28/08/2006)	SPOT 5 (11/07/2008)
Galicia	Landsat 5 (05/06/2005)	Landsat 5 (19/10/2008)

Tabla 1: Sensores utilizados y fechas de adquisición de las escenas en las zonas piloto

PREPROCESO DE LOS DATOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA

Co-registro de las imágenes

Los datos de partida son imágenes georreferenciadas de dos fechas. Todas las imágenes deben estar geométricamente rectificadas, en el mismo sistema geodésico y proyección para permitir una comparación coherente entre niveles digitales (DN) y una correcta integración de datos (Zhang y Zhang, 2007).

Paso a reflectividades

La transformación de los niveles digitales a parámetros físicos adquiere importancia cuando se comparan diferentes sensores y fechas de adquisición (Chuvieco, 2002). El paso a reflectividades aparentes minimiza los efectos producidos por ganancia y sesgo del sensor, así como diferencias por la iluminación solar.

Normalización radiométrica relativa

Durante el proceso de adquisición de las imágenes de satélite hay numerosos factores que afectan la respuesta radiométrica como: iluminación, absorción y dispersión atmosférica, etc. (Mateu y Ruíz, 1999). Estas diferencias radiométricas entre escenas dificultan el análisis de imágenes multitemporales para la detección de cambios, convirtiéndose la normalización radiométrica relativa en un proceso crítico en el sistema de producción (Zhang y Zhang, 2007). Se han probado varios métodos de normalización relativa de los histogramas, basados en transformaciones globales, es decir, que tienen en cuenta todos o parte de los píxeles de la imagen de referencia para calcular una única transformación para la imagen objetivo: ajuste por máximo-mínimo, zonas pseudo-invariantes y ajuste de media y desviación típica; eligiendo este último como el más funcional. La calidad de la transformación se evaluó calculando el error medio cuadrático (Yuan y Elvidge, 1996).

DETECCIÓN DEL CAMBIO

Se ha desarrollado un algoritmo propio, al que se ha llamado "Módulo-SAM", a partir del concepto de que un cambio en la cobertura del suelo produce un cambio de magnitud de DN y un cambio en la forma de la signatura espectral. Este algoritmo se puede englobar dentro del análisis de álgebra de imágenes (análisis píxel a píxel).

A diferencia de los algoritmos que utilizan una variación de magnitud (calculada como la distancia espectral euclídea en la Ecuación 1), a este algoritmo se le ha añadido el análisis del Spectral Angle Mapper (SAM) Ecuación 2, que determina la similaridad espectral de las signatu-

ras mediante el ángulo que forman los vectores definidos por los valores de cada banda.

$$Modulo = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (B_i^{T2} - B_i^{T1})^2} \quad (1)$$

$$SAM = a\cos\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} B_i^{T1} \cdot B_i^{T2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^{T1}{}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^{T2}{}^2}}\right] \quad (2)$$

Siendo,

n el número de bandas de las imágenes

B^{T1} *el valor del píxel de la imagen del tiempo 1*

B^{T2} *el valor del píxel de la imagen del tiempo 2*

El algoritmo necesita dos imágenes de entrada y produce una imagen de dos bandas que incluye en la primera la distancia euclídea entre los píxeles de ambas imágenes y en la segunda banda el SAM (Figura 1). Mediante el chequeo visual de estas bandas sintéticas en las zonas de cambio podemos ver en qué rango se mueven los valores de módulo y de SAM.

Posteriormente se introducen los umbrales de corte para las dos variables y se genera una imagen binaria con los cambios detectados. El criterio de selección de los umbrales se basa en la condición de minimizar el error de omisión de las zonas de cambio.

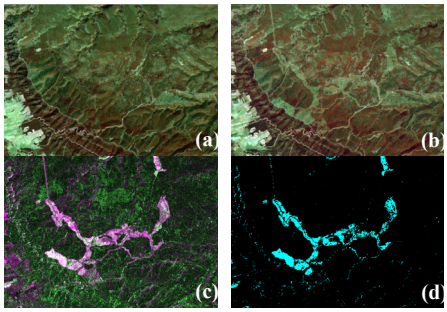


Figura 1: (a) Imagen SPOT 5 del 28/08/2006 NIR-SWIR-R. (b) Imagen SPOT 5 del 11/07/2008 NIR-SWIR-R. (c) Combinación en RGB de Módulo-SAM-Módulo. (d) Ráster de cambios.

CLASIFICACIÓN DEL CAMBIO

La estrategia adoptada se basa en describir el cambio de una manera cualitativa, estableciéndose dos clases fundamentales: ganancia y pérdida de vegetación. Estas dos clases se subdividen a su vez en moderada y drástica. Dentro de la superficie forestal se han diferenciado los estratos de arbolado, matorral, herbazal y suelo. Los cambios drásticos se refieren a cambios entre arbolado y suelo (en cualquier dirección) y los cambios moderados corresponden al resto de cambios entre estratos.

Se realiza una clasificación orientada a objetos en la que las clases se parametrizan mediante lógica difusa. Se estudia la tendencia de varios índices: brillo (calculado como la componente cuadrática de los valores multiespectrales del píxel); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Normalized Difference Water Index (NDWI).

DEPURACIÓN DE RESULTADOS

En la imagen de cambio se observa que un gran número de polígonos de cambio corresponden a variaciones relacionadas con ciclos agrícolas y con diferencias radiométricas en las imágenes (sombras, diferencias de iluminación, etc.), presentan formas muy irregulares y tienen superficies muy pequeñas. Se decide aplicar un filtrado para reducir el número de errores de comisión que consiste en:

- Máscara de la zona forestal procedente del MFE más actualizado, se eliminan los cambios en superficies agrícolas.
- Área mínima de 2.5 Ha.
- Filtro de forma según la condición Área/Perímetro > 20.

PUESTA EN PRODUCCIÓN

Una pieza clave en el desarrollo del proyecto ha sido la implementación de un modelo operativo de producción dimensionado a escala regional y nacional. Se articula en los siguientes elementos:

- Diseño de una Base de Datos de gestión de los datos iniciales y de la producción de las unidades de trabajo.
- Aplicación GIS para la selección automática de unidades de trabajo partiendo de las coberturas bitemporales de imágenes. Estas unidades de trabajo no tienen solapes ni dejan huecos sin cubrir.
- Automatización de análisis de imágenes que agilizan el preproceso, detección del cambio y clasificación.

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Después de la fase de detección del cambio se efectúa una primera validación para evaluar la exactitud del algoritmo. Se fotointerpretaron muestras de cambio/no cambio sobre las imágenes de satélite. Las precisiones de identificación en la clase cambio superan el 85%, se consigue un error de omisión bajo.

La validación del producto final de cambios la realizó la Gerencia de Servicios Forestales de Tragsatec, responsable de la producción de cartografía forestal. Se fotointerpretó sobre las ortofotografías de fechas más próximas a las imágenes (± 4 meses). No se detectaron polígonos de cambio sin clasificar (errores de omisión). Para la clase cambio los errores de comisión fueron del 56% para Valencia y 34% para Galicia.

La siguiente tabla muestra como se reduce la superficie a fotointerpretar en actualización cartográfica al utilizar la capa de cambio:

Zona	Sup. Forestal (Ha)	Sup. Cambio Final (Ha)	Sup. Cambio/Sup. Forestal
VLC	207.656	1.563	0,8%
GLC	580.572	26.174	4,5%

Tabla 2: Relación entre la superficie final de cambio detectada y la superficie forestal en las zonas piloto (Valencia y Galicia).

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Se ha diseñado una metodología operativa para la detección de cambios sobre superficies forestales, a partir de imágenes de observación de la Tierra del PNT de dos fechas distintas.

Las correcciones radiométricas aplicadas se consideran adecuadas para minimizar las diferencias producidas por el uso de distintos sensores y fechas. En la identificación del cambio se han valorado varios algoritmos y herramientas como : Análisis de Componentes Principales, diferencia de índices, Delta Cue, etc. Se descartaron por la alta interacción del usuario en favor del Módulo-SAM.

El producto resultante es una imagen de cambios con una doble funcionalidad en el proceso de actualización cartográfica:

- Identifica las grandes transformaciones forestales con una supervisión mínima.
- Apoya la fotointerpretación en actualizaciones más precisas donde sea necesario delinear los polígonos sobre otra imagen de referencia de mayor resolución espacial, que en ocasiones es más antigua que la propia imagen de satélite.

La revisión de los polígonos de cambio es inevitable debido al alto porcentaje de errores de comisión (en torno al 50%). Estos errores responden a diferencias radiométricas en las imágenes (diferencias de iluminación, sombras, cambios fenológicos, etc.), por tanto muy difíciles de eliminar en un proceso de análisis píxel a píxel. En cualquier caso, esta revisión supone menos de 1% de la superficie total en zonas de pocos cambios y menos del 4% en zonas más complejas.

En cuanto a la mejora de la precisión del producto, se considera que con los métodos de comparación de imágenes no se pueden conseguir resultados significativamente mejores. Queda propuesta para investigaciones sucesivas la interpretación de estructuras completas en la imagen y la incorporación de la información vectorial de referencia como parte activa del proceso de identificación de objetos (Walter, 2004).

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E., 2002. *Teledetección Ambiental*. Ed. Ariel.

MATEU, A., y RUÍZ, L.A., 1999. *Comparación y evaluación de métodos de normalización radiométrica relativa*. Revista de la Asociación española de Teledetección nº 12.

WALTER, V., 2004. *Object-based classification of remote sensing data for change detection*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58, 225-238.

YUAN, D., y ELVIDGE, C.D., 1996. *Comparison of relative normalization techniques*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 51, 117-126.

ZHANG, J. y ZHANG, Y., 2007. *Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 62, 461-472.

Estimación del IAF y de la altura del arbolado a partir de datos LIDAR en masas artificiales de coníferas

R.M. Navarro-Cerrillo[1], R. Hernández-Clemente[1], R. Gomez[1], A. García-Ferrer[2] y M. Sánchez de la Orden[2]

[1] Departamento de ingeniería forestal. laboratorio de teledetección agroforesatal y cambio global. ETSIAM. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edf. Leonardo da Vinci, (Córdoba, Spain). Email: rmnavarro@uco.es.

[2] Departamento de geomática, laboratorio de teledetección agroforestal y cambio global. ETSIAM. Universidad de Córdoba, (Córdoba, Spain).

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de datos LIDAR para la estimación de valores del índice de área foliar (IAF) en masas artificiales de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arnold en la Sierra de los Filabres (Almería) mediante regresiones lineales simples. Los resultados muestran las relaciones obtenidas aplicando diferentes métodos de análisis. La técnica de segmentación fue analizada y propuesta como opción para simplificar la identificación de copas individuales y como método de innovación para la evaluación del porcentaje de IAF en coníferas Mediterráneas. Los resultados preliminares indican que los métodos simples basados en modelos de sumideros seguidos de la delimitación de copas con marcos regulares muestran una buena concordancia entre IAFLIDAR y los valores medidos de IAF.

Palabras clave: Decaimiento forestal, estructura de copa, pinares, sensor LIDAR.

ABSTRACT

This study attempts to relate scanning LIDAR data to Leaf area index (LAI) in forest plantations at Sierra de los Filabres (Almería) values through simple linear regression. Segmentation processing technique is evaluated to simplified individual tree crown identification as an innovative method in evaluating percent leaf area index of pine forests typical of the southeastern Spain.

Keywords: *forest decline, crown structure, pine forest, LIDAR sensor.*

INTRODUCCIÓN

En Índice de área foliar (IAF) se define como la superficie de hoja por unidad de superficie proyectada (Watson, 1947). El IAF es una de las variables fisiológicas más importantes para abordar aspectos relacionados con el estado y dinámica de ecosistemas forestales, tales como el estudio de modelos de combustible, los inventarios forestales, la restauración, los estudios de secuestro de C o el análisis del cambio climático. Por ello, la cartografía de valores de IAF es cada vez más utilizada como base de la modelización de procesos ecológicos (Zhao y Popescu 2009), y constituye una alternativa para reducir las mediciones directas en campo que son costosas en tiempo y recursos (Duranton et al. 2001). Los datos de sensores remotos, en particular el uso de imágenes de satélite, se ha propuesto como la mejor alternativa para evaluar el IAF y otras variables ecofisiológicas de paisaje a escala local y regional. Un gran número de estudios han mostrado las relaciones entre el IAF a partir de imágenes multiespectrales e hiperespectrales en el rango de visible e infrarrojo cercano. Recientemente la tecnología LIDAR se presenta como una nueva alternativa para analizar variables estructurales del dosel arbóreo.

El objetivo de este estudio fue aplicar datos LIDAR para estimar la altura del arbolado y el IAF a través de métodos de regresión lineal simple. El estudio presenta un contraste de tres métodos de análisis de datos LIDAR para la delimitación de copas.

SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra localizada en la Sierra de los Filabres (Almería). La vegetación corresponde a masas artificiales de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y de pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold.). Estas formaciones presentan problema de decaimiento desde el año 2001 (Navarro-Cerrillo *et al.,* 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Adquisición de imágenes

Los datos LIDAR se obtuvieron el 28 agosto de 2009, a una altura de 1000 m sobre el nivel del suelo (Leica ALS60 Airborne Laser Scanner, Esterocarto, España), con una precisión horizontal y vertical de 20-30 cm y 15 cm, respectivamente, y una densidad de 2,4 puntos m^{-2}. A partir de los datos LIDAR se obtuvo así mismo un modelo de superficie digital con una resolución espacial de 0,5 m.

Campañas de campo

En agosto de 2009 se midió la altura en un total de 45 árboles de cada especie mediante un VERTEX IV (Haglöf), y el IAF con Plant Canopy-LAI-2000 (LICORInc. Lincoln, NE, EEUU). Se realizaron cuatro medidas del IAF por copa, según ejes perpendiculares, y el centro de cada árbol fue georeferenciado con una estación diferencial con error<0.20 cm.

Metodologías de análisis

Las metodologías evaluadas se presentan en la figura 1.

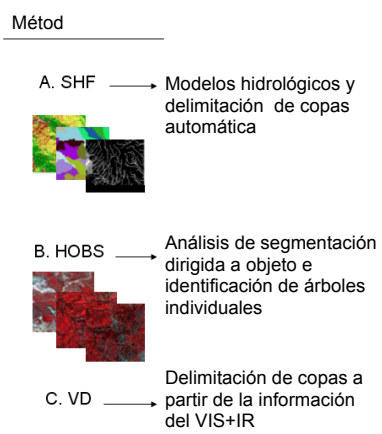


Figura 1. Esquema de las metodologías planteadas para la estimación del IAF y de la altura del arbolado a partir de datos LIDAR**.**

Cálculo del IAF a partir de datos LIDAR

Los valores de IAF_{LIDAR} fueron obtenidos a partir de las relaciones publicadas por Solberg et al. (2006) basadas en las siguientes ecuaciones:

$IAF_{LIDAR} = (1/K) \ln(Na/Nb)$ [1]

Donde,

K: coeficiente de extinción (1/(2*Cos μ)
μ: ángulo cenital ;
Na: número total de ecos;
Nb: número de ecos bajo la cubierta vegetal, en un circulo de diámetro aproximado a la proyección de copa.

La relación entre el IAF observado (LAI_{OBS}) y el IAF obtenido mediante LIDAR (LAI_{LIDAR}), y la altura observada (H_{OBS}) y la altura LIDAR (H_{LIDAR}) se estudiaron mediante regresiones lineales simples.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos de la relación entre el IAF observado y el obtenido a partir de LIDAR y datos LIDAR (Figura 2).

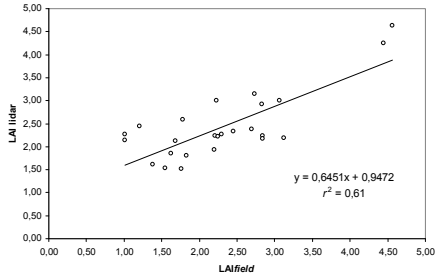


Figura 2: Regresión entre el IAF observado (LAI_{OBS}) y el IAF estimado con LIDAR (LAI_{LIDAR}).

En la figura 3 se presentan asimismo los resultados obtenidos para la estimación de la altura del arbolado a partir de datos LIDAR.

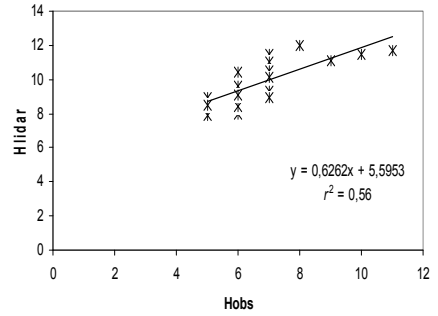


Figura 3: Regresión entre la altura observada del árbol (H_{OBS}) y la altura estimada con LIDAR (H_{LIDAR}).

CONCLUSIONES

Los modelos de identificación de copas mediante la segmentación de datos LIDAR, han mostrado coeficientes de determinación más altos que los que sólo utilizan valores derivados de LIDAR. Sin embargo, la metodología implica un procedimiento de análisis computacional mayor. La metodología presentada permite la estimación del IAF a escala de árbol y su posible generalización a doseles arbóreos.

La generación de cartografía a través del cálculo de correlaciones entre parámetros estructurales y datos LIDAR permite establecer relaciones robustas para cartografiar variables de estructura de masas artificiales. Los valores del IAF se pueden utilizar para la evaluación de los procesos de decaimiento en la Sª de los Filabres de suma importancia en los procesos de planificación y gestión forestal.

BIBLIOGRAFÍA

DURANTON, H., SOUDANI, K., TRAUTMANN, J. AND WALTER, J., 2001. *Comparison of optical methods for estimating canopy openness and leaf area index in broad-leaved forests*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 324(4), 381-392.

NAVARRO CERRILLO, R.M., VARO M.A., LANJERI S., & HERNÁNDEZ CLEMENTE R., 2007. *Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) y pino salgareño (Pinus nigra Arnold) en la Sierra de los Filabres*. Ecosistemas 16 (3). Septiembre.

SOLBERG, S., NAESSET, E., HANSSEN, K.H., CHRISTIANSEN, E., 2006. *Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning*. Remote Sensing of Environment, 102, 364-376.

WATSON DJ., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. *Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years*. Annals of Botany 11, 41–76.

ZHAO K., POPESCU S., 2009. *Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA*. Remote Sensing of Environment, 113, 1628-1645.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto de investigación GESBOME (Junta de Andalucía P06-RNM-1890), y particularmente apoyado por el Ministerio de Innovación y Ciencia.

Estimación del índice de área foliar y concentración de clorofila en masas repobladas de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*

R.M. Navarro-Cerrillo[1], R. Hernández-Clemente[1], J.E. Frieyro[2] y A. Hayas[2]

[1] Departamento de ingeniería forestal. ETSIAM. Universidad de Córdoba. Apdo. 3048. 14080 (Córdoba, España). Correo electrónico: ir1nacer@uco.es

[2] EGMASA. Dpto. de Comunicación y Sistemas de Información y Unidad de I+D+i. Johan G. Gutenberg, 1. 41092, (Sevilla, Spain).

RESUMEN

Este trabajo presenta resultados comparativos de analizar imágenes multiespectrales (QuickBird, y Landsat TM) frente a imágenes hiperespectrales de banda estrecha (Hyperion, CHRIS-PROBA, AHS) para la estimación de IAF y concentración de clorofila en diferentes especies de coníferas mediterráneas. La zona de estudio se encuentra localizada en la sierra de Filabres, y las especies analizadas fueron masas de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arnold afectadas por decaimiento forestal. A partir de la selección de los bioindicadores más adecuados se establecieron correlaciones con índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Entre los sensores utilizados en el proyecto destacó el sensor aerotransportado AHS por su resolución espectral y espacial, así como, por la información suministrada en la región del térmico relacionada con el potencial hídrico.

Palabras clave: Sensores hiperespectrales, sensores multiespectrales, decaimiento forestal, variables biofísicas.

ABSTRACT

This paper reports comparative results obtained from the analysis of multispectral images (QuickBird, y Landsat TM) in contrast to the análisis of hyperspectral images (Hyerion, CHRIS-PROBA, AHS) for the estimation of Leaf Area Index (IAF) and chlorophyll concentration. The study area is located in sierra de Filabres, and the species analyzed were Pinus sylvestris L. and Pinus nigra Arnold, both affected by forest decline processes. The analysis was based on the relationship established between biophysical parameters and vegetation indices obtained from multispectral and hyperspectral images. Among the studied sensors, the airborne hyperspectral sensor AHS showed to be the most suitable for mapping forest damage in pine stands because of its spatial and spectral resolution, and due to the thermal information retrieved.

Keywords: *Hyperspectral sensors, multispectral sensors, forest decline, biophysical variables.*

INTRODUCCIÓN

Los datos de sensores remotos, en particular el uso de imágenes de satélite, se ha propuesto como la mejor alternativa para evaluar la IAF y otras variables ecofisiológicas de paisaje a escala regional. Un gran número de estudios han mostrado las relaciones entre el IAF y la concentración en clorofila con índices de vegetación obtenidos del visible e infrarrojo cercano (Zarco-Tejada et al., 2004). Recientemente está operativa una nueva generación de sensores hiperespectrales como Hyperion (Pu et al., 2003) y ChisProba (Gandía et al., 2003), que tienen la misma resolución espacial o similares que las imágenes Landsat TM pero con un ancho de banda estrecho. Estudios recientes han mostrado una clara mejora de la teledetección hiperespectral sobre los datos multiespectrales para evaluar las propiedades de la vegetación como IAF (Schlerf et al., 2005) y la clorofila (Moorthy et al., 2008).

Sin embargo, todavía no está claro si los sensores hiperespectrales ofrecen una mayor sensibilidad a los parámetros biofísicos sobre los sensores multiespectrales en la evaluación de ecosistemas forestales a gran escala. Además, este tipo de estudios son aún más escasos en ecosistemas forestales mediterráneos, y, en particular en las plantaciones de coníferas, que cubren gran extensión en países de la Cuenca del Mediterráneo.

El objetivo de este estudio fue comparar

imágenes multiespectrales (QuickBird, y Landsat TM) frente a imágenes hiperespectrales de banda estrecha (Hyperión, CHRIS-PROBA, AHS) para la estimación de IAF y concentración de clorofila en diferentes especies de coníferas mediterráneas. El método de análisis fue desarrollar simples relaciones estadísticas entre las variables medidas en campo IAF, concentración de clorofila y los seis VIs extraídos de cada imagen.

SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra localizada en la Sierra de los Filabres (Almería). La masa forestal está compuesta principalmente por dos tipos de coníferas procedentes de repoblación de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold). El problema de decaimiento de pinares en la Sª de Filabres viene siendo observado por los Agentes Forestales desde el año 2002. Desde entonces los daños han experimentado un progresivo aumento hasta afectar a gran parte de las repoblaciones de pinos (Navarro *et al.,* 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Adquisición de imágenes

Se realizó un vuelo diurno con el escáner aerotransportado hiperespectral (AHS) durante el verano de 2008. Las imágenes fueron obtenidas a 2 m de resolución espacial y estaban compuestas por 80 bandas espectrales en el rango espectral desde 0,43 hasta 12,5 micras. Los vuelos se realizaron a las 8:00 GMT y 12:00 GMT, en zonas forestales con diferentes niveles de estrés.
De forma paralela al vuelo aerotransportado se adquirieron un total de 4 imágenes de satélite (Hyperion, CHRIS-PROBA, Landsat TM y QuickBird). Hyperion y CHRIS-PROBA se obtuvieron para evaluar la sensibilidad de sensores hiperespectrales de media resolución espacial. Landsat TM y QuickBird se eligieron para evaluar la sensibilidad de sensores multiespectrales de media y alta resolución espacial.

Campañas de campo

La campaña de campo se realizó en Filabres en agosto del año 2008. Las variables medidas en campo fueron concentración de pigmentos (clorofila a y b) y medidas estructurales de dosel. Los pigmentos fueron congelados en campo en el mismo instante de su recogida y analizados posteriormente en laboratorio. Las variables estructurales fueron IAF (índice de área foliar) y parámetros descriptivos de dosel tales como diámetro de copa, altura del arbolado, altura de fuste y distancia entre árboles.

Radiometrías y caracterización atmosférica

Para realizar los controles de calidad de las imágenes se realizaron medidas de radiometría de campo. Se utilizó un radiómetro GER 3700. Se tomaron medidas de diferentes tipos de cubiertas homogéneas en cada una de las pasadas y de manera simultánea al paso del avión.

Para la caracterización del espesor atmosférico se utilizó un fotómetro solar, modelo 540 Microtops II™ Sunphotometer, con el que se midió el espesor óptico de aerosoles, vapor de agua e irradiancia solar directa.

Tratamiento previo de las imágenes

Las imágenes AHS fueron suministradas por el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) corregidas a valores de reflectividad y emisividad sobre la cubierta, incorporando un archivo IGM que permitió posteriormente su georreferenciación. Los datos fueron corregidos atmosféricamente utilizando el modelo ATCOR4, basado en el código de transferencia radiativa MODTRAN. Como datos auxiliares se utilizaron medidas de aerosoles en campo a 1.020 nm en el momento de la toma de la imagen.

La corrección atmosférica, a niveles de reflectancia sobre cubierta, se hizo mediante la implementación de la aplicación del modelo de transferencia radiativa FLAASH en ENVI 4.6, para las imágenes Hyperion, Landsat TM y QuickBird. En el caso de los datos CHRIS-PROBA, estos fueron corregidos a nivel de reflectancia sobre la cubierta utilizando el software BEAM 4.6 de la Agencia Espacial Europea, aplicando previamente un algoritmo interno para la reducción del ruido en la señal.

Los datos fueron georreferenciados con coordenadas UTM (European Datum 1950) a partir de la ortofoto de la Junta de Andalucía (año 2006). La zona de estudio no presentaba pendientes significativas por lo que no fue necesario realizar correcciones topográficas en las imágenes. Para facilitar la discriminación de la cubierta forestal se aplicó en todos los casos una máscara de suelo calculada a partir del NDVI.

Cálculo de índices y correlaciones

El nexo de unión entre las imágenes y los parámetros biofísicos medidos en campo se estableció mediante la regresión lineal con los índices de vegetación incluidos en la tabla 1.

Índice	Referencia
NDVI = (R_{NIR} - Rred)/(R_{NIR} + Rred)	Rouse et al. (1974)
SR = R_{NIR}/Rred	
MSR = ((R_{NIR}/Rred) - 1)/[((R_{NIR}/Rred) +1)]0,5	Chen et al. (1996)
GM1=R_{750}/R_{550} GM2=R_{750}/R_{700}	Gitelson & Merzlyak (1997)
Vog1 = (R_{740})/(R_{720})	Vogelmann et al. (1993)

Tabla 1: Índices de vegetación calculados para la correlación de las imágenes con el contenido en clorofila y IAF.

A partir de la información térmica captada por el sensor AHS, se obtuvo la diferencia entre la temperatura de copas y la ambiental, que más tarde sirvió para obtener correlaciones con la conductancia estomática y el potencial hídrico medidos en campo.

Finalmente las regresiones obtenidas sirvieron para elaborar mapas de dichos indicadores (IAF y contenido en clorofila) cartografía que muestra el estado fitosanitario de las masas de pinos estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los coeficientes de correlación entre el IAF y VIs fueron muy variables en función del sensor analizado (tabla 2) y la especie. No obstante los resultados muestran que las relaciones más robustas fueron obtenidas a partir del sensor AHS. Dentro de las relaciones establecidas con dicho sensor, las correlaciones más significativas se obtuvieron entre el contenido en clorofila y los índices Vogelmann y Gitelson para *P.nigra* (tabla 2). Mientras que para el IAF se obtuvieron mejores correlaciones con el índice MSR en masas de *P.sylvestris* (tabla 2). Para Landsat, las mayores correlaciones positivas se encontraron en la estimación de IAF (r2 = 0,55 SR, r2 = 0,57 MSR r2 = 0,51 NDVI). El sensor CHRIS-PROBA mostró una mayor correlación con varios índices relacionados con IAF (r2 = 0,67 SR, r2 = 0,63 MSR r2 = 0,57 NDVI). En general, las relaciones fueron más débiles en la estimación de la clorofila, en particular para Landsat (r2 = 0,67 Gitelson, r2 = 0,77 NDVI). El sensor Hyperion mostró relaciones significativas para IAF y para clorofila pero menos robustas en comparación con los resultados obtenidos con AHS. Estos resultados muestran el efecto de la resolución espacial y la sensibilidad del efecto de mezcla espectral de los índices de vegetación asociados principalmente a clorofila.

		AHS	
		P.sylvestris	*P.nigra*
LAI	MSR	60,23	55,78
	SR	56,83	57,69
	NDVI	53,24	51,31
Chl	Vogelmann	52,77	69,95
	Gitelson	50,21	68,50
	NDVI	30,66	59,58
	QuickBird		
LAI	MSR	47,82	18,78
	SR	47,62	16,48
	NDVI	37,42	26,07
Chl	Vogelmann	–	–
	Gitelson	32.54	68.72
	NDVI	26.71	39.99

Tabla 2: Valores de r^2 obtenidos en las regresiones.

A partir de las regresiones calculadas se obtuvieron las cartografías de los indicadores medidos en campo. Mediante segmentación de umbrales y en base a las clases de daño observadas en campo, y los parámetros biofísicos medidos, se obtuvieron mapas de distribución de valores de los parámetros biofísicos indicadores de procesos de decaimiento (Figura 1 y figura 2).

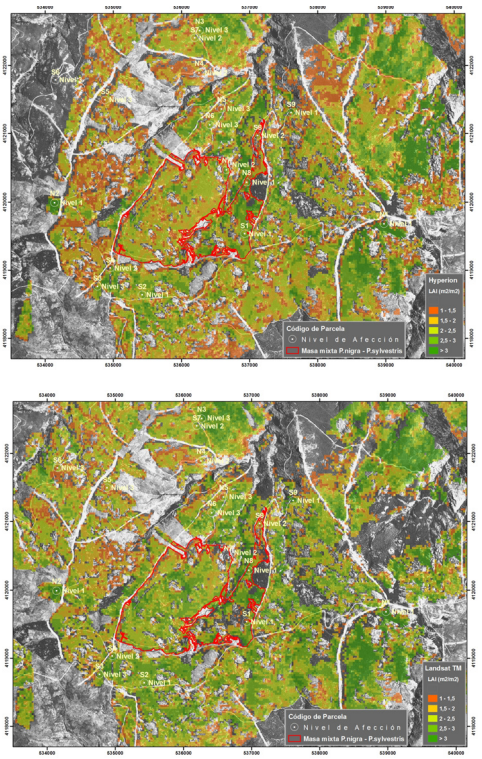


Figura 1: Estimación de IAF a partir de imágenes Hyperion y Landsat TM en la Sª de los Filabres (Almería) en masas de *Pinus sylvestris.*

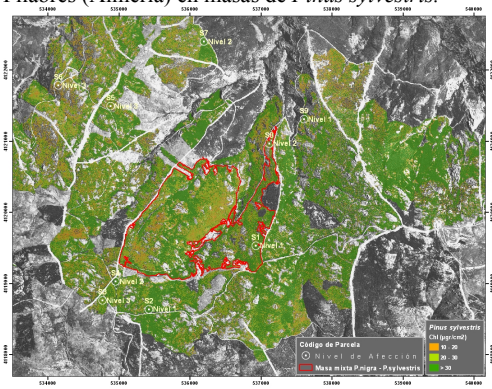


Figura 2: Estimación de clorofila a+b a partir de imágenes AHS en la Sª de los Filabres (Almería) en masas de *Pinus sylvestris.*

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una mayor sensibilidad de los sensores hiperespectrales frente a los sensores multiespectrales para la estimación de clorofila a+b y de IAF. El trabajo muestra las relaciones obtenidas con diferentes sensores multiespectrales e hiperespectrales de distinta resolución espacial. La estructura de las masas forestales juega un papel primordial en las estimaciones de parámetros biofísicos debido a que al ser masas poco densas el efecto del suelo y la estructura distorsiona la información espectral.

Las relaciones establecidas permiten obtener cartografía de alta resolución de clorofila y de IAF, variables de suma importancia en los procesos de planificación y evaluación forestal.

BIBLIOGRAFÍA

CHEN, J. M. & CIHLAR, J. 1996. *Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images.* Remote Sensing of Environment, 55, 153– 162.

GITELSON, A.A. & MERZLYAK, M.N., 1997. *Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves*. International Journal of Remote Sensing, 18, 2691–2697.

MOORTHY, I., MILLER, J.R., NOLAND, T.L.,NIELSEN U. AND ZARCO-TEJADA, P.J. 2003. *Chlorophyll content estimation of Boreal conifers using hyperspectral remote sensing.* Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '03), July 21–25, 2003, Toulouse, France.

NAVARRO CERRILLO, R.M., VARO M.A., LANJERI S., & HERNÁNDEZ CLEMENTE R., 2007. *Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) y pino salgareño (Pinus nigra Arnold) en la Sierra de los Filabres*. Ecosistemas 16 (3). Septiembre.

ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A. & DEERING D.W., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceedings of the Third Earth Resources* Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, pp 301–317

VOGELMANN J. E., ROCK B. N., MOSS D. M., 1993. *Red-edge spectral measurements from sugar maple leaves*. International Journal of Remote Sensing, 14: 1563-1575.

P. ZARCO-TEJADA, J. MILLER, J. HARRON, B. HU, T. NOLAND AND GOEL N. 2004. *Needle chlorophyll estimation through model inversion using hyperspectral data for boreal conifer forest canopies*. Remote Sensing of Environment. 89, 189–199.

Seguimiento del cambio climático sobre la vegetación del Parque Nacional de Picos de Europa mediante fotografías aéreas e imágenes Landsat y MODIS

C. Recondo[1, 2], A. Abajo[1], B. Jiménez-Alfaro[1], M.A. Álvarez[1, 3] y J.R. Obeso[3]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: mdrecondo@uniovi.es

[2] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n. 33600 Mieres (Asturias, España).

[3] Dpto. BOS. Universidad de Oviedo. C/ Catedrático Rodrigo Uría s/n. 33071 Oviedo (Asturias, España).

RESUMEN

En este trabajo se evalúan los efectos del cambio climático sobre la vegetación del PNPE, tanto desde un punto de vista retrospectivo como de futuro, empleando las diferentes posibilidades de las imágenes aéreas y de satélite en el seguimiento de cambios ambientales. Se ha analizado la evolución del límite superior del bosque en el último medio siglo por medio de fotografía aérea, así como los posibles cambios fenológicos de las especies arbóreas en los últimos 25 años usando imágenes Landsat-TM. Finalmente, se han establecido y caracterizado parcelas piloto para el seguimiento futuro de la vegetación del PNPE a partir de imágenes MODIS.

Palabras clave: fotografía aérea, Landsat, MODIS, NDVI, cambio climático.

ABSTRACT

We evaluate in this work the effects of the climatic change on the vegetation of the PNPE, both from a retrospective as well as a future point of view, using the possibilities that the aerial and satellite images offer for the monitoring of environmental changes. We have analyzed the evolution of the upper forest limit in the last fifty years by means of aerial images, as well as the phenological changes of the arboreal species in the last 25 years using Landsat-TM data. Finally, we have settled down and characterized pilot parcels for the future monitoring of the vegetation of the PNPE from MODIS images.

Keywords: *aerial photography, Landsat, MODIS, NDVI, climate change.*

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y su origen antrópico son hoy por hoy mayoritariamente aceptados por la comunidad científica. Sin embargo, sus efectos ecológicos no son aún suficientemente conocidos, a lo que contribuye el hecho de que las respuestas de las especies y comunidades a los cambios ambientales son a menudo lentas y se presentan de forma retardada (Iverson et al., 2004). De esta forma, los estudios a largo plazo constituyen la aproximación más adecuada al estudio de la respuesta de las comunidades a este fenómeno.

Las comunidades de vegetación de montaña son consideradas como buenos indicadores del cambio climático, al tratarse frecuentemente de refugios de flora y encontrarse en su límite ecológico y geográfico (Walther et al., 2005). En este trabajo se analizan, mediante técnicas de fotointerpretación y teledetección, los efectos del cambio global sobre las comunidades vegetales del Parque Nacional de los Picos de Europa (PNPE) desde diferentes perspectivas. En primer lugar, se analiza la evolución del límite superior del bosque en el último medio siglo utilizando las ortofotografías aéreas del SIG-PAC y la cartografía digital de vegetación. Dada la relación entre la temperatura y el límite natural de los árboles, estos ecosistemas pueden ofrecer respuestas ecológicas determinadas frente a los cambios climáticos (Walther et al., 2005).

Desde otra perspectiva, la respuesta de las especies vegetales a las variaciones climáticas podría también traducirse en cambios en sus características fenológicas. Para estudiar este fenómeno en el estrato arbóreo, utilizamos el Índice de Vegetación NDVI (Pettorelli et al., 2005) como estima de su verdor y productividad,

analizando las diferencias fenológicas entre distintas masas forestales, así como la estacionalidad y los cambios históricos en la fenología del estrato superior del bosque. Se emplean para ello imágenes Landsat de los meses de verano de los últimos 25 años.

Finalmente, con el fin de disponer de un registro temporal lo más amplio posible que permita estudiar la evolución de la cubierta vegetal en relación al cambio global, hemos establecido una serie de parcelas piloto para el seguimiento presente y futuro de las comunidades vegetales en el PNPE, además de determinar el método para su caracterización y seguimiento mediante imágenes MODIS.

METODOLOGÍA

Se estudiaron las principales comunidades vegetales naturales del PNPE. La caracterización del límite del bosque se realizó a partir de la cartografía de vegetación 1:10.000 del año 2009. En primer lugar se calculó el rango de altitud ocupado por los principales tipos de bosque: hayedos, robledales y abedulares (Rivas-Martínez et al., 1984) utilizando el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 50x50 m del IGN.

Se seleccionaron seis zonas piloto sometidas a la mínima perturbación y representativas del límite forestal del PNPE mediante la prospección sistemática de las ortofotos digitales del SIG-PAC (año 2003), y se generó una nube de puntos de muestreo a lo largo del límite forestal cartografiado, con una equidistancia de 100 m (Figura 1).

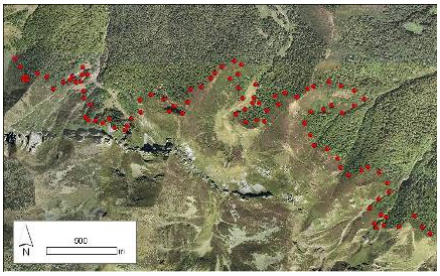


Figura 1: Puntos de muestreo en la zona piloto del Coriscao, con un total de 95 puntos ubicados cada 100 m a lo largo del límite entre el bosque y la vegetación supraforestal.

A cada punto de muestreo se le asignó el valor de altitud (a partir del MDE), vegetación forestal y supraforestal del límite que representa (a partir de los polígonos de la cartografía) y evolución del bosque, estimada en metros, desde el año 1957 (utilizando la fotografía aérea en blanco y negro del vuelo oficial del servicio cartográfico de EEUU).

El estudio fenológico se realizó en los bosques por encima de 1200 m de altitud, en el entorno de Vegabaño y del Pico Jario, zonas caracterizadas por un buen estado relativo de conservación. Se estudiaron 4 tipos de bosque: hayedos eútrofos (374,43 ha), hayedos oligótrofos (1237,23 ha), robledales albares (129,52 ha) y abedulares (134,53 ha). Para estudiar la evolución de estos bosques se utilizaron 24 imágenes Landsat-TM del verano de los últimos 25 años, desde 1984, que fueron seleccionadas de forma que: a) pudieran establecerse a su vez tres series mensuales independientes entre sí, con 8 imágenes para cada una de ellas, y b) la distribución de años dentro de cada serie mensual y en su conjunto fuera lo más homogénea posible. Las imágenes Landsat, de 30 m de resolución, hubieron de ser corregidas del exceso radiométrico debido a la atmósfera, así como corregidas geométricamente y ortorrectificadas mediante un MDE.

Con el objetivo de cuantificar los posibles cambios fenológicos del bosque se calcularon diversos índices de vegetación, optándose finalmente por el NDVI (Ecuación 1), debido a su mayor simplicidad tanto de cálculo como de interpretación. El NDVI se vale de las marcadas diferencias de absorción/reflexión que presentan las plantas entre las regiones espectrales del visible y el infrarrojo cercano. Tiene su máximo en 1, siendo su valor más alto cuanto mayor se estima el verdor o vigor de la vegetación.

$$NDVI = \frac{(IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + ROJO)} \qquad (1)$$

Finalmente se estableció una serie de parcelas piloto para el seguimiento fenológico a largo plazo de las comunidades vegetales. El área de estudio se restringió al entorno de las 8 estaciones meteorológicas del PNPE, donde se realizó una reclasificación de la cartografía de vegetación 1:10.000 en 7 tipos de vegetación: (1) Bosques; (2) Aulagares; (3) Arbustedas; (4) Pastizales montanos; (5) Pastizales de alta montaña; (6) Matorrales de brecina; (7) Roquedos y gleras.

Como en el anterior apartado, se optó por la utilización del índice NDVI, obtenido en este caso del sensor MODIS, que se encuentra a bordo de los satélites TERRA y AQUA. Las imágenes

NDVI obtenidas del sensor MODIS tienen una resolución espacial de 250 m y una periodicidad diaria para cada satélite. Las áreas de estudio se establecieron como cuadrados de 2x2 km, de forma que encajasen en ellos perfectamente los píxeles de las imágenes (Figura 3). Para el estudio del seguimiento de la vegetación se propuso el algoritmo de la NASA "*Gridded Vegetation Indices*" (Huete et al., 2002) aplicado sobre el satélite TERRA. El producto de este algoritmo, denominado MOD13, es una única imagen de NDVI cada 16 días, compuesta a partir de las imágenes diarias del periodo que abarca. Los píxeles de las sucesivas imágenes mantienen el mismo origen de coordenadas, permitiendo establecer una rejilla de referencia. Al superponer ésta sobre la cartografía de vegetación, podemos determinar los píxeles más "puros" de los distintos tipos de vegetación, que fueron establecidos como parcelas piloto.

RESULTADOS

La altitud máxima del bosque en el PNPE se encuentra en todos los casos entre los 1600 y 1800 m de altitud, siendo los hayedos acidófilos el bosque más representativo (Figura 2). Las seis zonas piloto mostraron diferencias significativas en cuanto a los valores de altitud (Test de Kruskall-Wallis; Chi2 = 126.26; gl= 5; p < 0.001), siendo las zonas silíceas (Coriscao, Cebolleda y Jario) las que presentaron unos valores medios superiores.

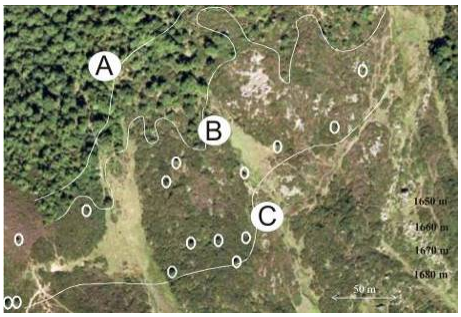


Figura 2: Ecotono forestal en el área de Cebolleda: límite del bosque o "*timberline*" (A), límite de los árboles o "*tree line*" (B) y límite de las especies arbóreas o "*tree species line*" (C).

Tan solo en un 4 % de los 489 puntos de muestreo utilizados se ha podido verificar un cambio en el límite del bosque en los últimos 50 años, afectando a cuatro de las seis zonas de estudio. La estimación del área de recuperación (a partir de la fotografía aérea y la ortofotografía) varió desde los 12 hasta los 80 m.

El estudio fenológico de los últimos 25 años con Landsat mostró la existencia de diferencias significativas en el NDVI entre tipos de bosque en los tres periodos mensuales (Test de Kruskal-Wallis; gl=3; $p<0.05$). Las diferencias entre el hayedo y el resto de especies fueron siempre significativas ($p<0.05$), mientras que entre el robledal y el abedular fueron significativas en la serie de julio ($p<0.05$) pero no en junio y agosto (Tabla 1).

	Hayedo Eút.	Hayedo Olig.	Robledal	Abedular
Jun.	0.816	0.817	0.724	0.725
Jul.	0.866	0.87	0.857	0.846
Ago.	0.868	0.863	0.842	0.839

Tabla 1: Promedio del NDVI para los cuatro tipos de bosque en cada uno de los tres periodos analizados, sin considerar el año.

El análisis estacional mostró un comportamiento similar para las tres especies arbóreas, con un valor relativamente bajo del NDVI en junio, que ascendía hasta alcanzar su máximo en julio. No se observó tendencia significativa en ninguna de las tres series mensuales para ninguno de los tipos de bosque.

La superposición de la cartografía digital de vegetación con la rejilla MODIS de referencia (Figura 3) permitió definir un total de 104 parcelas para el seguimiento a largo plazo de la vegetación del PNPE. Se obtuvieron 36 parcelas correspondientes a bosque, 30 a roquedos, 16 a pastizal altimontano, 14 a aulagar, 6 a pastizal montano, 1 a brecina y 1 a arbustedas.

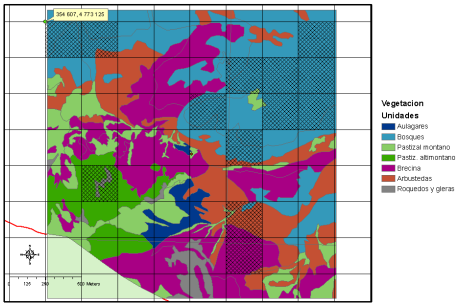


Figura 3: Ejemplo del área de estudio en el entorno del Coriscao y, superpuesta sobre ella, la rejilla definida por los píxeles MODIS. Marcadas con entramado negro, las parcelas seleccionadas para su seguimiento.

Se analizó el comportamiento del NDVI durante el ciclo anual para las distintas clases de vegetación establecidas (Figura 4), poniéndose de manifiesto la consistencia de su comportamiento entre diferentes años.

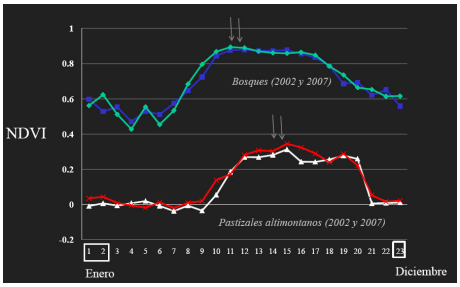


Figura 4: Ciclos estacionales del NDVI de 2002 y 2007 del conjunto de los bosques y pastizal montano analizados.

CONCLUSIONES

La fisionomía del límite actual del bosque en el PNPE es claramente diferente en función del sustrato. Mientras que los sustratos calcáreos producen un límite drástico y continuo, en las áreas silíceas puede interpretarse una transición gradual del bosque hacia los matorrales y pastizales. Las zonas silíceas reconocidas en este trabajo constituyen lugares óptimos para el estudio de los factores ecológicos implicados en el límite del bosque y su relación con el clima, ya que parecen representar el límite potencial del bosque. Sin embargo, el límite del bosque en el PNPE mostró una gran estabilidad durante los últimos 50 años en todas las zonas estudiadas, lo que podría indicar un escaso efecto de los cambios climáticos recientes.

Los resultados obtenidos no permiten extraer conclusiones sobre la evolución en la fenología del bosque en el Parque Nacional en los últimos 25 años. En las series temporales analizadas existen acusadas variaciones entre años, causadas probablemente por la heterogeneidad de las fechas de adquisición de las imágenes Landsat. Por ello se considera necesario disponer de una mayor amplitud en la serie, o bien una mayor homogeneidad en las fechas.

Han podido establecerse para su seguimiento futuro 104 parcelas piloto correspondientes a 7 clases de vegetación, que pueden considerarse como representativas de los principales tipos de vegetación del PNPE. El NDVI obtenido a partir del sensor MODIS con periodicidad quincenal es un índice adecuado para el seguimiento a largo plazo de las comunidades de vegetación establecidas.

BIBLIOGRAFÍA

HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X. and FERREIRA, L.G., 2002. *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. Remote Sensing of Environment, 83, 195-213.

IVERSON, L.R., SCHWARTZ, M.W. and PRASAD, A.M., 2004. *Potential colonization of newly available tree- species habitat under climate change: an analysis for five eastern US species*. Landscape Ecology, 19, 787-799.

PETTORELLI, N., OLAV VIK, J., MYSTERUD, A., GAILLARD, J. M., TUCKER, C.J. and STENSETH, N.C., 2005. *Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change*. Trends in Ecology & Evolution, 20 (9), 503-510.

RIVAS-MARTÍNEZ, S., DÍAZ, T.E., FERNÁNDEZ PRIETO, J.A., LOIDI, J. and PENAS, A., 1984. *La vegetación de la alta montaña cantábrica*. Los Picos de Europa. Ediciones Leonesas, León.

WALTHER, G-R., BEISNER, S. and POTT, R., 2005. *Climate Change and High Mountain Vegetation Shifts*. In: Broll, G. & Keplin, B. (eds). Mountain ecosystems. Studies in treeline Ecology. Springer. Pag. 77-96.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto *"Bases para el seguimiento de los cambios en la flora y vegetación como consecuencia del cambio climático en el PN de los Picos de Europa"*, financiado por la Fundación Biodiversidad y desarrollado entre los años 2008-2010.

Adán Abajo tiene un contrato de Personal Técnico de Apoyo para la antena MODIS de la Universidad de Oviedo, financiado por el Programa Nacional de Recursos Humanos de Investigación 2008-2011 (PTA2008-1623-I).

Procedimiento para la estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR

L. A. Ruiz[1], T. Hermosilla[1], M. Godino[2], J. Almonacid[1], A. Fernández-Sarría[1], J.A. Recio[1], J.L. Gil-Yepes[1] y F. Mauro[2]

[1] Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT). Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España). E-mail: laruiz@cgf.upv.es

[2] Grupo de Inventario y Gestión de Recursos Naturales. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n, Madrid (España).

RESUMEN

Se presenta una metodología para la estimación de variables forestales a partir de datos LiDAR aerotransportado, basada en los siguientes pasos: (1) el pre-tratamiento de los datos para la obtención del modelo digital del terreno y el modelo de altura de vegetación normalizado; (2) la extracción de características o atributos a partir de los datos LiDAR para cada tesela de muestreo; (3) la generación de modelos de estimación para diferentes variables dasométricas; y (4) su extensión para la generación de mapas de variables forestales en zonas más amplias. La metodología se ha aplicado sobre una zona de estudio de 4.100 ha en el término municipal de Cuenca, donde se realizó un vuelo LiDAR con densidad nominal de 4 ptos/m^2. Para la generación de los modelos de estimación se han utilizado métodos de regresión múltiple paso a paso tomando como referencia mediciones realizadas en 110 parcelas de campo, obteniéndose valores de R^2 superiores a 0,9 para biomasa total, volumen y fracción de cabida cubierta, y por encima de 0,86 para área basimétrica, biomasa del fuste y biomasa de raíz. Los modelos generados se han aplicado a toda la zona de trabajo para la creación de mapas de variables forestales, y el procedimiento completo se ha integrado en una aplicación de software específica.

Palabras clave: LiDAR, inventario forestal, variables dasométricas, biomasa, Inforest.

ABSTRACT

A methodology for the estimation of forest variables from airborne LiDAR data is presented, based on the following steps: (1) data pre-processing to obtain the digital terrain model and the normalised canopy height model; (2) feature extraction from LiDAR data for the field sampling plots; (3) definition of estimation models for different dasometric variables; and (4) extrapolation to a larger area to create maps of forest variables. The methodology is applied over a testing area of 4,100 ha located in Cuenca, where LiDAR data with a nominal density of 4 pts/m^2 was acquired. Stepwise multiple regression methods were used to generate the models, using measurements carried out over 110 field sampling plots. R^2 values obtained were above 0.9 for total biomass, volume and fraction of canopy cover, and over 0.86 for basal area, stem and root biomass. The models obtained were extrapolated over the complete area to obtain the forest variable maps, and the procedure was integrated in a specific software tool.

Keywords: *LiDAR, forest inventory, dasometric variables, biomass, Inforest.*

INTRODUCCIÓN

Existen numerosos estudios para la estimación de variables forestales a partir de imágenes y, sobre todo, de datos LiDAR aerotransportado. Por citar sólo algunos, se han estimado alturas medias (Naesset, 1997), biomasa y volumen (Nelson et al., 1998), área basimétrica (Means et al., 2000), o todas ellas (Holmgrem y Johnsson, 2004). En ellos se ha evaluado la potencialidad de estos sistemas para la estimación de variables en inventarios forestales, con diferentes resultados, e incluso se ha estudiado la estructura de la masa forestal (Lefsky et al., 1999), si bien la inmensa mayoría se centran en áreas de gran homogeneidad forestal, muy diferentes a la diversidad propia de los bosques mediterráneos.

Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del proyecto *Inforest*, financiado por el Ministe-

rio de Industria, Turismo y Comercio entre 2008 y 2011, para el desarrollo de metodologías que permitan mejorar la gestión forestal a partir de datos de observación de la Tierra. En concreto, el objetivo del estudio que aquí se presenta ha sido desarrollar un procedimiento completo para la generación, aplicación y evaluación de modelos de estimación de variables forestales a nivel de parcela empleando datos LiDAR aerotransportado, y su posterior extensión a zonas más amplias, con la finalidad de obtener mapas de variables forestales a nivel de monte. Se describen los métodos empleados desde la adquisición y el preprocesado de los datos hasta la obtención de los mapas de variables.

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

El estudio se ha realizado en un área de montaña de 4.100 ha situada en el término municipal de Cuenca, fundamentalmente con dos especies de pino: *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster*, además de matorral y suelo desnudo. Se trata de una zona con acusadas pendientes y gran heterogeneidad en cuanto a densidad de vegetación. Las mediciones realizadas permitieron obtener datos por parcela de todas las variables objeto de estudio.

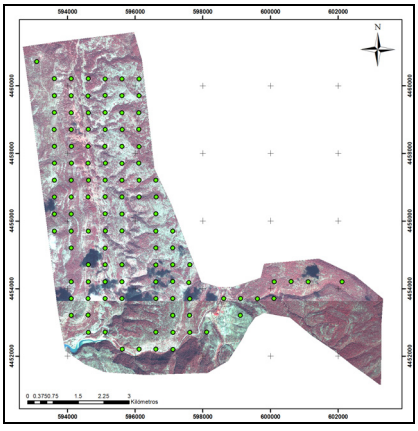


Figura 1: Distribución de las parcelas de campo en la zona de estudio (sobre imagen Ikonos).

Los datos LiDAR fueron adquiridos en noviembre de 2008 con una densidad nominal de 4 ptos/m^2. Entre 2008 y 2009 se obtuvieron datos de campo de 110 parcelas circulares de 50 m. de diámetro, distribuidas regularmente sobre la zona de estudio (figura 1).

PREPROCESADO DE LOS DATOS LIDAR

Tras el control de calidad de los datos, se llevó a cabo un filtrado de puntos anómalos, y se obtuvieron los diferentes modelos digitales: del terreno (MDT), de superficies (MDS) y de alturas de vegetación normalizado (MAV). La metodología empleada para la generación del MDT se basa en un algoritmo iterativo, descrito en Estornell et al. (en prensa), consistente en la selección de puntos con cota mínima en un área de búsqueda determinada, estableciendo así un MDT inicial. Posteriormente, sobre los datos iniciales se realiza una nueva búsqueda de puntos mínimos aplicando áreas de búsqueda menores. Los nuevos puntos seleccionados se comparan con el MDT obtenido en el paso anterior. Se define un umbral en la diferencia de la cota de un determinado punto seleccionado con respecto a la asociada a ese punto en el MDT de comparación, eliminándose los puntos seleccionados cuya cota supere el valor umbral. Utilizando este método iterativo se consigue generar un MDT más preciso, ya que se eliminan puntos asociados a objetos situados sobre la superficie terrestre, como la vegetación. El MDT se calculó con una resolución espacial de 1 m.

Por su parte, el MDS se obtuvo asignando el valor de los puntos con elevación máxima en cada celda. Una vez obtenidos ambos, la diferencia entre el MDS y el MDT permitió generar el MAV normalizado con respecto al terreno. La figura 2 muestra un detalle de la nube de puntos original y el MDT resultante.

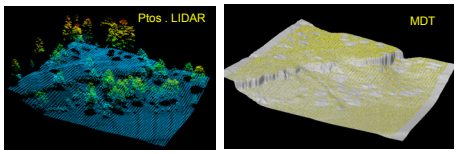


Figura 2: Detalle de la nube de puntos LiDAR (izqu.) y la superficie del MDT con los puntos del terreno extraídos en amarillo (dcha.)

CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS DESCRIPTIVAS

Cada parcela fue analizada independientemente para la extracción de características descriptivas que permitieran generar modelos de estimación de las variables dasométricas. Se calcularon los valores de media, desviación, máximo, *skewness* y *kurtosis* para cada parcela a partir de la nube de puntos original normalizada (datos originales con el valor de altura de cada

punto corregido respecto a la cota del MDT obtenido) y del MAV. Las características calculadas del MAV proporcionan información sobre los valores máximos de altura y su distribución espacial. Por su parte, las características extraídas de la nube de puntos normalizada proporcionan información sobre la estructura interna de la vegetación de una parcela. Esta información se complementa con los valores de los percentiles 25, 50 y 75 de altura e intensidad de pulso.

Se generaron los perfiles de densidad, o histogramas de la distribución de las alturas en cada parcela, a partir de los cuales se determinaron parámetros relacionados con el número de máximos, su posición (altura) y el porcentaje de puntos situados a dicha altura.

La fracción de cabida cubierta se estimó directamente a partir del análisis de los perfiles de densidad, obteniendo una variable intermedia que después se corrigió mediante regresión lineal con la estimada en campo.

GENERACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LAS VARIABLES

Los modelos de estimación se calcularon mediante regresión múltiple paso a paso hacia delante, con un máximo de tres variables independientes en cada modelo generado. La relación entre las variables observadas en campo y las predichas a partir de los datos LiDAR se analizó mediante el coeficiente R^2, calculado como el cuadrado del coeficiente de correlación del momento producto de Pearson:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\phi_i - \bar{\phi}_i\right)\cdot\left(\phi_{iobs} - \bar{\phi}_{iobs}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(\phi_i - \bar{\phi}_i\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}\left(\phi_{iobs} - \bar{\phi}_{iobs}\right)^2}} \qquad (1)$$

donde ϕ_i es el valor pronosticado a partir de los datos LiDAR para la parcela i, ϕ_{iobs} es el valor observado en campo para esa misma parcela, y N es el número de parcelas analizadas. Se ha calculado, además, el error medio cuadrático (EMC), que representa la media de las diferencias promedio entre los valores pronosticados y observados, definido mediante la Ecuación (2):

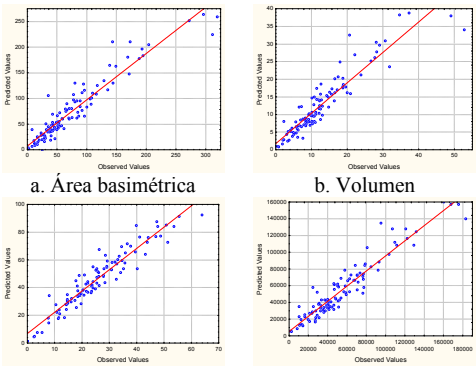
$$EMC = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(\phi_i - \phi_{iobs}\right)^2}{N}} \qquad (2)$$

La evaluación se llevó a cabo mediante validación cruzada, en la que 109 parcelas se emplearon en la generación del modelo y una en la validación, repitiendo el proceso 110 veces en las que la parcela de validación era siempre distinta e independiente del resto. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para cada modelo, empleándose únicamente entre 1 y 3 variables, para conferir una mayor robustez y facilidad de aplicación práctica. Para el área basimétrica, la biomasa del fuste y la biomasa de la raíz se obtuvieron valores de R^2 ligeramente inferiores a 0,90. La fracción de cabida cubierta, el volumen y la biomasa total se han estimado con una R^2 próxima a 0,9.

Variables forestales	R^2	EMC
Área basimétrica	0,862	3,38 m^2/ha
Volumen	0,902	19,95 m^3/ha
FCC	0,902	3,956 %
Biomasa total	0,902	11.384,45 kg/ha
Biomasa del fuste	0,872	10.088,46 kg/ha
Biomasa de la raíz	0,888	3.206,72 kg/ha

Tabla 1: Valores de R^2 y EMC obtenidos en la estimación de las variables dasométricas.

En la figura 3 se muestran las gráficas de regresión, relacionando las variables dasométricas observadas en campo con las variables estimadas mediante modelos obtenidos a partir del análisis de los datos LiDAR.



a. Área basimétrica b. Volumen

c. Fracción cabida cubierta f. Biomasa total

Figura 3: Regresiones de las variables dasométricas observadas y estimadas.

MAPAS DE VARIABLES FORESTALES

Una vez obtenidos y evaluados los modelos, se crearon mapas de las variables forestales aplicándolos a la zona de estudio completa. Para ello, se dividió el territorio en celdas cuadradas con una superficie equivalente a las de las parcelas de muestreo en campo, esto es $\pi \times 25^2 =$

1.963,5m^2. La figura 4 muestra como ejemplo el mapa de biomasa total de la zona.

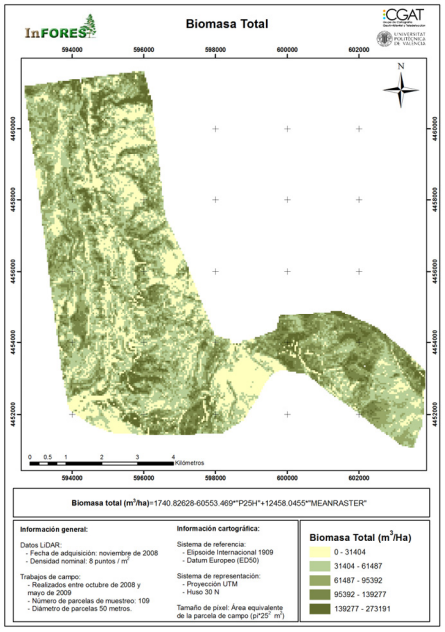


Figura 4: Ejemplo del mapa de biomasa total generado en la zona de estudio.

CONCLUSIONES

Con las características de la zona de trabajo, se puede concluir que la estimación de las variables dasométricas volumen, biomasa, área basimétrica y FCC pueden estimarse de forma precisa (R^2 próxima a 0,9) a partir de parámetros cuantitativos calculados directamente a partir de los datos LIDAR utilizados.

El procedimiento completo, desde la generación de los modelos digitales (MDT y MAV), extracción de características, generación de los modelos de regresión y obtención de los mapas finales se ha integrado en una aplicación software desarrollada específicamente, lo que permite su aplicación automática partiendo de los ficheros LiDAR y de los datos de campo.

Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de aplicación práctica de estas técnicas, pudiendo permitir la reducción de los trabajos de campo en inventarios, así como su actualización más dinámica.

BIBLIOGRAFÍA

ESTORNELL, J., RUIZ, L.A., VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. y HERMOSILLA, T., (en prensa). *Analysis of the factors affecting LiDAR DTM accuracy in a steep shrub area*. International Journal of Digital Earth (DOI: 10.1080/17538947.2010.533201).

HOLMGREN, J. y JONSSON, T., 2004. *Large scale airborne laser scanning of forest resources in Sweden.* ISPRS- International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 8/W2, pp.157-160.

LEFSKY, M.A., COHEN, W.B., ACKER, S. A., PARKER, G., SPIES, T. Y HARDING, D., 1999. *LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests*. Remote Sensing of Environment, Vol.70 (3), 339–361.

MEANS, J. E., ACKER, S. A., BRANDON, J. F., RENSLOW, M., EMERSON, L. Y HENDRIX, C. J., 2000. *Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LiDAR*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 66 (11), pp. 1367-/1371.

NÆSSET, E., 1997. *Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 52 (2), 49–56.

NELSON, R., KRABILL, W. Y TONELLI J., 1998. *Estimating forest biomass and volume using airborne LiDAR data*. Remote Sensing of Environment, Vol. 24 (2), 247-267.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en el marco del proyecto TSI-020100-2009-815, *Desarrollo de técnicas y métodos para la gestión forestal sostenible a partir de datos de observación de la Tierra* (INFOREST-II), así como a los socios y colaboradores del mismo.

Parametrización de la relación *f*APAR/IV para zonas forestales a partir de datos simulados con el modelo 4SAIL2

C. Sánchez, B. Martínez, M.A. Gilabert y A. Moreno

Unitat de Investigació en Teledetecció. Universitat de València. C\ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (València, España). beatriz.martinez@uv.es

RESUMEN

Este trabajo consiste en analizar la parametrización de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la cubierta (*f*APAR) en función de diferentes índices de vegetación para el caso concreto de zonas forestales de la Península Ibérica. Para ello se ha producido un conjunto de datos simulados de reflectividad bidireccional (BRDF) y *f*APAR a partir del modelo de transferencia radiativa 4SAIL2. La parametrización se ha ensayado con los índices NDVI, RDVI, EVI, SAVI y GESAVI para tres configuraciones de observación e iluminación. Los resultados ponen de manifiesto diferencias en cuanto a la normalización del suelo de fondo y según se considere una geometría de observación-iluminación.

Palabras clave: parametrización, *f*APAR, índices de vegetación, 4SAIL2.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the relationship between the fraction of photosynthetic active radiation absorbed by the canopy (fAPAR) and different spectral vegetation indices for forest canopies. The 4SAIL2 radiative transfer model has been used to simulate a data set of bidirectional reflectance (BRDF) and fAPAR. The NDVI, RDVI, EVI, SAVI and GESAVI have been considered for three different observation and illumination conditions. The results reveal important differences between the indices considered and the different observation-illumination conditions.

Keywords: *relationship, fAPAR, vegetation indices, 4SAIL2.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los productos de fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la cubierta *(f*APAR) operacionales a escala global se estiman a partir de algoritmos que deben ajustarse a la variabilidad existente a dicha escala. Por tanto, uno de los problemas que nos planteamos es la optimización de la estimación de la *f*APAR en los bosques de la Península Ibérica para obtener estimaciones más exactas de los flujos de CO_2 entre los ecosistemas y la atmosfera.

Este trabajo consiste en analizar la relación de la *f*APAR en función de diferentes índices de vegetación (IVs) para zonas forestales. Se ha producido un conjunto de datos sintéticos para analizar la relación entre la reflectividad y la *f*APAR a partir del modelo de transferencia radiativa 4SAIL2 (Verhoef & Bach, 2007). El 4SAIL2 permite simular el comportamiento de una cubierta heterogénea compuesta por dos capas, una componente verde y otra marrón.

La parametrización se ha ensayado con cinco IVs, NDVI, RDVI, EVI, SAVI y GESAVI diseñados para normalizar diferentes factores externos como, el suelo de fondo, la geometría de observación y la influencia de la atmósfera (Gilabert *et al*., 2011). Además, se han simulado tres configuraciones de geometría de observación e iluminación. Las diferentes relaciones se han aplicado a imágenes de reflectividad bidireccional (BRDF) derivadas de MODIS para el año 2008. Este ejercicio permitirá analizar las diferencias obtenidas entre las diferentes relaciones. Por último, se realizará una comparación con el producto oficial MODIS *f*APAR y con otro producto *f*APAR derivado a partir de la metodología con que se deriva el producto oficial *f*APAR MSG (García-Haro *et al*., 2008).

4SAIL2

El modelo 4SAIL2 es una versión del modelo de de cubiertas homogéneas SAIL (*Scattering by arbitrary inclined leaves*). El 4SAIL2 proporciona la BRDF y la absortividad de la cubierta

para un conjunto de geometrías de observación y de iluminación. El 4SAIL2 destaca por incluir el factor de disociación de las dos capas y el efecto del acoplamiento de las hojas en la cubierta a partir de la fracción de cubierta y el factor de forma de la planta.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Métodos

Los parámetros del modelo se han determinado para la clase de *Pinus pinaster* por su presencia habitual en los bosques de la península. Se ha utilizado el modelo PROSPECT (Jacquemond & Baret, 1990) para simular las propiedades ópticas de las hojas en cada canal espectral del sensor MODIS. Los parámetros característicos de las hojas verdes y marrones para esta clase de cubierta se han extraído de experiencias en el campo realizadas por De Santis *et al*., (2009) (Tabla 1).

Parámetro	Hoja verde	Hoja marrón
N	2.5	2.5
C_{a+b} (µg cm^{-2})	70	20
C_m (g cm^{-2})	0.035	0.0035
C_w (g cm^{-2})	0.048	0.0008
C_b	0.2	1.5

Tabla 1: Parámetros usados en el PROSPECT.

Posteriormente, se ha utilizado el modelo 4SAIL2 para simular la BRDF de la cubierta. Se han considerado 4 tipos de suelos (peridonítico, dolomítico, arenoso y granítico) representativos de la zona de estudio donde se localizan cubiertas forestales, 7 valores de LAI (0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4) y 6 valores de fracción de cubierta (0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1). En total, se han obtenido 168 espectros para tres configuraciones diferentes de geometría de observación-iluminación, (i) nadir (θ_s=0º, θ_v=0º, ϕ=0º), (ii) observación MODIS para un pixel situado en Madrid (θ_s=43.30º, θ_v=20.20º, ϕ=28.07º) y (iii) configuración óptima definida por Roujean & Breón (1995) para estimar la *f*APAR, (θ_s=60º, θ_v=45º, ϕ=0º).

Una vez obtenidas las reflectividades, se ha derivado la *f*APAR asumiendo que no existe componente difusa y considerando lo que absorbe la cubierta en el rango de longitud de onda entre 400 y 700 nm. La relación de la *f*APAR se ha ensayado con los índices descritos en la Tabla 2.

Índice	Ecuación
Normalized difference vegetation index	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$
Soil adjusted vegetation index	$SAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}(1+L)$
Re-normalized difference vegetation index	$RDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} + \rho_{red})^{1/2}}$
Enhanced vegetation index	$EVI = G\left(\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1\rho_{red} - C_2\rho_{blue} + L}\right)$ $L=1; C_1=6; C_2=7.5; G=2.5$
Generalized *SAVI*	$GESAVI = \frac{\rho_{nir} - a\rho_{red} - b}{\rho_{red} + Z}$

Tabla 2: Índices usados en la parametrización.

Material

Se ha considerado la serie BRDF MODIS para el año 2008 cada 8 días (MCD43A1) para el ejercicio de aplicación. La *f*APAR obtenida se comparará con los productos:

(i) *f*APAR_MODIS, es el producto oficial de MODIS (MOD15A2) a 1 km y cada 8 días.

(ii) *f*APAR_RB, es el producto derivado con datos BRDF MODIS al aplicar la metodología propuesta por Roujean & Bréon (1995). Este método se basa en una relación entre la *f*APAR y el RDVI para la configuración óptima descrita anteriormente. Se aplica actualmente a datos MSG para producir *f*APAR diariamente.

Por último se ha utilizado la clasificación *CORINE Land Cover* del año 2000 para distinguir las diferentes clases de bosques de la península. Se han considerado tres clases de cubierta: caducifolio, coníferas y bosque mixto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parametrización *f*APAR/IVs

De los resultados de la simulación, se ha observado que las principales diferencias en la parametrización de la *f*APAR son debidas al índice y no a la configuración de observación-iluminación. La Figura 1 muestra las relaciones obtenidas para los índices NDVI y RDVI para la configuración óptima, donde el RDVI muestra una menor dispersión y error de la pendiente y ordenada. En la Tabla 3 se incluyen las relaciones obtenidas para el NDVI, RDVI, EVI, SAVI y GESAVI para la geometría óptima, donde los índices RDVI, SAVI y GESAVI muestran las mayores correlaciones.

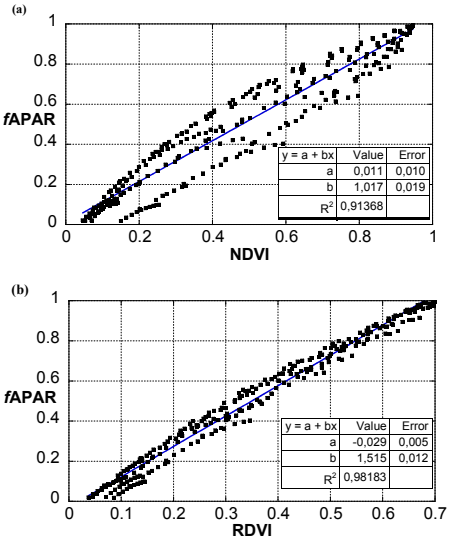


Figura 1: *f*APAR *vs* NDVI (a) y RDVI (b) para la configuración óptima.

Índice	Relación	R^2
NDVI	$y = 0.011 + 1.017\,x$	0.91
RDVI	$y = -0.029 + 1.515\,x$	0.98
EVI	$y = -0.004 + 1.200\,x$	0.95
SAVI	$y = -0.022 + 1.422\,x$	0.98
GESAVI	$y = 1.228 - 1.211 exp(-1.19\,x)$	0.98

Tabla 3: *f*APAR *vs* IVs para la configuración óptima.

Aplicación a imágenes BRDF MODIS

Se han escogido las relaciones de la Tabla 3 que mayor correlación presentan (RDVI, SAVI y GESAVI) y, además la del NDVI (para comparar, dada su extensa utilización en la bibliografía). Se ha calculado la reflectividad para la geometría óptima y se ha obtenido una imagen mensual a partir del método de máximo valor para filtrar la serie de nubes. La Figura 2 muestra los histogramas de *f*APAR para los meses de Enero (a) y Julio (b). Se observan mayores diferencias para el NDVI, el cual presenta valores más altos de *f*APAR. Todos los índices han conseguido reproducir la variabilidad estacional en los bosques de la península.

Se han obtenido pequeñas diferencias en la *f*APAR estimada a partir del RDVI, SAVI y GESAVI, con una alta dependencia del mes considerado. Las mayores diferencias se presentan (RMSE=0.019) entre los índices RDVI y el GESAVI, debido probablemente a que utilizan distintos modelos para el ajuste (lineal para el RDVI y exponencial para el GESAVI) y a que el GESAVI incluye la línea de suelo. La menor dispersión se obtiene entre el RDVI y SAVI. Estas diferencias se han cuantificado para cada mes a partir del RMSE, como la desviación de la *f*APAR para cada índice respecto al valor medio de los tres. En general, se han obtenido valores pequeños de RMSE, pero también con dependencia del mes considerado.

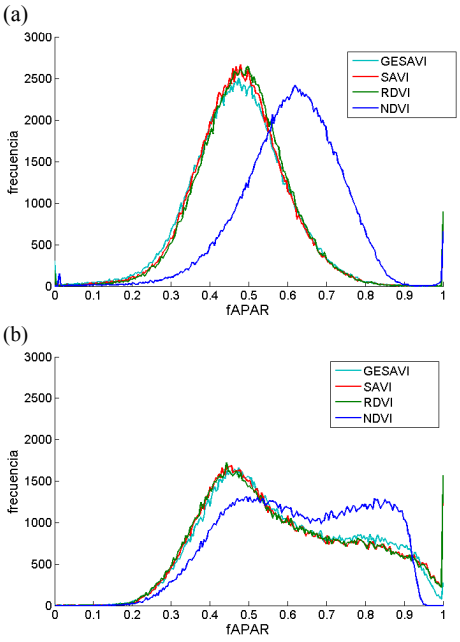


Figura 2: Histogramas de *f*APAR derivados a partir de las relaciones de la tabla 3 para Enero (a) y Julio (b).

La Figura 3 muestra un ejemplo del mapa de RMSE para Julio y para las zonas forestales. Se observan mayores discrepancias entre los índices para las clases que se alejan de la elegida en la simulación, como por ejemplo dos zonas de bosque caducifolio en el sur de Portugal y el norte de los Pirineos y otra zona de alcornocales en la provincia de Cádiz.

Comparación con productos

Se ha escogido la relación del RDVI para realizar la comparación con los productos *f*APAR_MODIS y *f*APAR_RB porque las diferencias en la *f*APAR estimada a partir de los tres índices son pequeñas y es el que menos información externa necesita, además de las bandas. La comparación se ha realizado sobre diferentes píxeles de bosque de la península. La Figura 4 muestra un ejemplo para, una zona de

bosque caducifolio situado en los Pirineos y otra zona de coníferas localizada al sur de Portugal. Se observan diferencias entre los productos *f*APAR_RB y *f*APAR_MODIS de hasta el 20%, de acuerdo con resultados obtenidos en Camacho (2007). El producto *f*APAR_RDVI también reproduce la variabilidad estacional de ambas cubiertas, con valores intermedios entre los dos productos en el caso de cubiertas más densas.

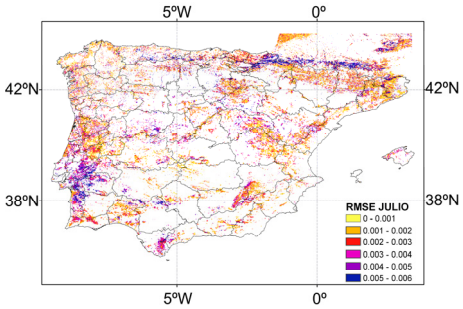


Figura 3: RMSE entre la *f*APAR derivada del RDVI, GESAVI y SAVI para bosques.

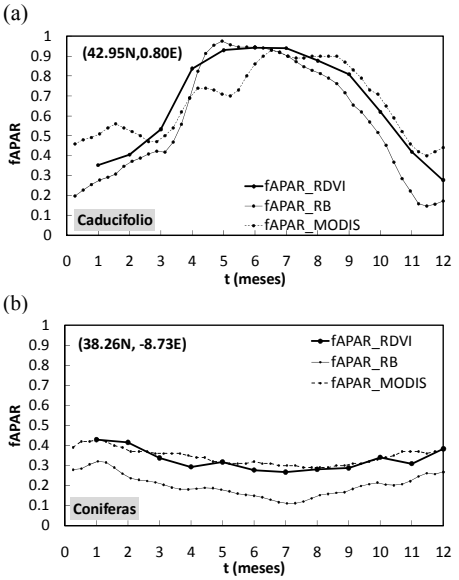


Figura 4: Evolución temporal de los productos *f*APAR_RDVI, *f*APAR_RB y *f*APAR_MODIS.

CONCLUSIONES

La mayor variación en la *f*APAR estimada a partir de los IVs la introduce la normalización del suelo de fondo y no tanto la configuración de observación e iluminación. La relación *f*APAR/NDVI es la que peor correlación y mayor error presenta, mientras que la relación *f*APAR/RDVI para la configuración óptima (θ_s=60º, θ_v=45º, ϕ=0º) muestra ser operativa para aplicar a imágenes. La comparación con productos derivados de metodologías operativas, muestra como el producto *f*APAR_RDVI reproduce la variabilidad estacional de las cubiertas seleccionadas y proporciona valores intermedios entre los productos considerados.

BIBLIOGRAFÍA

CAMACHO, F, 2007. *Evaluation of the Land-SAF FAPAR prototype along one year of MSG BRDF data: Algorithm, Product description, and intercomparison against equivalent satellite products and ground-truth.* LSA SAF Visiting Scientist report, 60 pp (http://landsaf.meteo.pt/).

DE SANTIS, A., CHUVIECO, E., VAUGHAN, P.J, 2009. *Short-term assessment of burn severity using the inverions of PROSPECT and GeoSail models*. Rem. Sens. Env., 113, 126-136.

GARCÍA-HARO, F. J., CAMACHO, F., and MELIÁ, 2008. *Product user manual (PUM) vegetation parameters (FVC, LAI, FAPAR).* SAF/LAND/UV/PUM-VEGA /2.1. 53 pp.

GILABERT, M.A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., and MARTÍNEZ, B. 2011. *Theory and applications of vegetation indices,* In Rem. Sens. optical observations of vegetation properties and processes (F. Maselli, M. Menenti, P.A. Brivio, eds). Res. Signpost. ISBN: 9788104217. pp. 1-43.

JACQUEMOUD, S., and BARET, F, 1990. *PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra*. Rem. Sens. Env., 34, 75-91.

ROUJEAN, J.L., and BREÓN, F.M, 1995. *Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements*. Rem. Sens. Env., 51, 375-384.

VERHOEF, W., and BACH, H, 2007. *Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfier modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data.* Rem. Sens. Env., 109, 166-182.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto ÁRTEMIS (CGL2008-00381) del MICINN y Land-SAF de EUMETSAT.

FOTOGRAMETRÍA, CARTOGRAFÍA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Implementación de la BTA desde el punto de vista de la empresa productora de cartografía

A. Alonso[1] y H. Zapico[1]

[1] SERESCO. S.A. C/ Fernando Alonso, 35 33009 Oviedo (Asturias, España). Correo electrónico: angela.alonso@seresco.es

RESUMEN

La aparición de la Base Topográfica Armonizada (BTA) como modelo de datos común entre las distintas administraciones para la producción de cartografía ha obligado a la empresa cartográfica a evolucionar de un sistema de producción enfocado a la cartografía vectorial a uno dirigido hacia las Bases de datos Geoespaciales. Esto ha implicado importantes cambios que abarcan desde la propia formación de los técnicos hasta el desarrollo de herramientas para la comprobación masiva de datos.

Palabras clave: BTA, SIG, CAD

ABSTRACT

The appearance of the Harmonized Topographic Base (BTA) as a common data model between administrations for the production of cartography has forced the company to evolve from a cartographic production system focused on vector map to one focused on Geospatial Databases. This has involved significant changes ranging from the very technical training to the development of tools for massive data verification.

Keywords: *BTA, GIS, CAD*

INTRODUCCIÓN

La Base Topográfica Armonizada (BTA) se compone de una serie de especificaciones técnicas, un modelo de datos y un catálogo de fenómenos que modelan los entes topográficos del mundo real, su versión 1.0 fue aprobada por la Comisión Técnica Permanente del Consejo Superior Geográfico en su reunión del 4 de noviembre de 2008.

Surge de la necesidad de homogeneizar la cartografía oficial española a grandes escalas ya que a nivel nacional son las comunidades autónomas las que, con propios criterios, desarrollan las labores cartográficas en el ámbito de su territorio. Además, las anteriores Normas Cartográficas elaboradas por la Comisión de Normas Cartográficas del Consejo Superior Geográfico (CNC) datan de 1.992 y se muestran insuficientes para asegurar la compatibilidad de los datos generados por distintos organismos siguiendo dicha normativa. Sobre todo teniendo en cuenta los avances tecnológicos, los cambios metodológicos introducidos en el proceso de obtención de la cartografía y, en definitiva, la evolución conceptual desencadenada en el mundo de la información geográfica en los últimos veinte años.

Queda clara, por tanto, la necesidad de que los diferentes organismos cartográficos llegaran a acuerdos para definir un modelo común a nivel autonómico y nacional. Esta ardua tarea conducirá a que no existan 'fronteras' entre las comunidades autónomas y garantizará una continuidad espacial y semántica en todo el territorio nacional. PNOA y SIOSE son proyectos que, basados en unas especificaciones consensuadas por los distintos organismos implicados, están permitiendo obtener coberturas de imagen y de usos del suelo a nivel nacional. Continuando con esta línea de trabajo, el Modelo de BTA debe permitir el intercambio, integración e interoperabilidad entre cartografías a escalas 1:5.000 o 1:10.000 generadas en las Comunidades Autónomas, Diputaciones Forales o en la Administración General del Estado.

MODELO BTA

Las Especificaciones de la Base Topográfica Armonizada 1:5000 (BTA) v1.0 (CNC-CSG)

fueron desarrolladas desde el Consejo Superior Geográfico por la Comisión de Normas Cartográficas (CNC). Se tuvo en cuenta la evolución conceptual habida desde la cartografía, ya sea como mapas en papel o como mapas digitales, hasta la información geográfica, en forma de conjuntos de datos geográficos para ser cargados en un SIG o integrados en una IDE.

Se entiende que la BTA es un conjunto de datos vectoriales de carácter topográfico que cubre todo el territorio español. Se organiza en bloques, uno por cada productor de datos, y los bloques están formados por hojas según una división que garantice el case exacto de los marcos de hojas.

El elemento básico en el modelo de la BTA es el fenómeno, que representa un ente del mundo real. A esta unidad básica de información geográfica se le pueda asignar, dentro de una hoja y con continuidad espacial, un valor determinado para cada uno de sus atributos.

Inicialmente se propone una distribución de los distintos fenómenos basada en la capas incluidas en los anexos del proyecto europeo INSPIRE, con la denominación propuesta por la IDEE y aceptada en las distintas comisiones del Consejo Superior Geográfico. La denominación establecida es: Puntos de referencia, Nombres geográficos, Redes de transporte, Hidrografía, Relieve, Cubierta terrestre, Edificaciones, poblaciones y construcciones, Servicios e instalaciones.

Para la descripción de los atributos espaciales de los fenómenos se contemplan las siguientes primitivas geométricas.

- Los entes del mundo real que, en aplicación de los criterios de modelado de la base, son percibidos como puntos se representan en la base como “Fenomeno_BTA_puntual”, describiéndose con la primitiva geométrica GM_Point y pudiendo estar orientados.
- Los entes del mundo real que, aplicando dichos criterios, son percibidos como líneas se representan en la base como “Fenomeno_BTA_lineal”, describiéndose con la primitiva geométrica GM_LineString y pudiendo tener orientación.
- Finalmente, los entes del mundo real que según los criterios de modelado son percibidos como superficies se representan en la base como “Fenomeno_BTA_ superficial”, describiéndose con la primitiva geométrica GM_Polygon. Asimismo, los tramos que constituyen sus contornos se representan como “Fenomeno_BTA_lineal”, y se describen mediante la primitiva geométricaGM_LineString. Se establece la asociación espacial “es_borde” por la cual dichos fenómenos lineales deben coincidir geométricamente, como mínimo en proyección plana, con las líneas de contorno (representadas en la base como “Anillo”) del polígono que describe espacialmente el fenómeno superficial.

Como criterio general, cuando dos o más instancias de cualquier tipo de fenómeno tengan primitivas geométricas coincidentes en proyección plana, dichas primitivas se repiten para cada instancia. En el preámbulo del diccionario se detallan los distintos roles que pueden cumplir los tramos coincidentes, haciendo mención explícita de la coincidencia con el marco de hoja. Nótese que la utilización de Bordes es una diferencia clara con respecto a la cartografía clásica.

Siendo como es un modelo cartográfico actual, la BTA presta especial importancia a las características geométricas y topológicas de la información geográfica, ya que se concibe para su explotación directa en un SIG.

IMPLEMENTACIÓN DE LA BTA

Desde el punto de vista de SERESCO, la implementación de la BTA ha supuesto un reto y una clara oportunidad de mejora. Surge un nuevo planteamiento y una nueva forma de pensar cartográficamente impulsada por el actual auge de los Sistemas de Información Geográfica que hace que no sólo se requiera una información puramente geométrica sino que se precise de datos calificadores y complementarios asociados. Hemos pasado así de trabajar con una información únicamente gráfica a poseer también una información alfanumérica.

A partir, de estas premisas se dan dos campos de actuación: la actualización de la cartografía existente o la generación de nueva cartografía bajo las especificaciones de la BTA.

Dentro del modelo de datos de la BTA se incluye, no sólo la forma de capturar y codificar la cartografía, sino los requisitos de calidad que debe cumplir dicha cartografía. Esto hace que sea extremadamente importante que la empresa productora tenga herramientas, no sólo para realizar la cartografía, sino para poder controlar su producto.

Si partimos de la generación de nueva cartografía la primera fase es la fase de restitución se realiza en un entorno CAD, tipo MicroStation Geographics, que permita combinar herramientas que de una forma eficiente faciliten las labores de captura para la información gráfica y asociación de información alfanumérica.

El resultado es un archivo vectorial que es necesario revisar de una forma exhaustiva, ya que cualquier posible error geométrico o de cualquier otra clase, se trasladaría íntegramente a trabajos posteriores. Para asegurar la calidad del producto final se debe obtener un producto vectorial altamente depurado de forma que ya en sí mismo cumpla las especificaciones de la BTA y en especial, las referidas a la consistencia conceptual y de dominio.

Una vez validada esta información básica se inician los trabajos de edición cartográfica más específica del modelo BTA. Ha sido necesario desarrollar herramientas automáticas de producción cartográfica, en especial herramientas para la vinculación automática de atributos a los vectores según la codificación de los mismos y utilidades para el control de calidad de las bases de datos asociadas.

Además, este modelo se caracteriza por establecer la continuidad geométrica en cada uno de los temas cartográficos, por lo que existirá repetición de geometría cuando exista coincidencia espacial entre diferentes elementos. En restitución los elementos se capturan una vez para posteriormente duplicarlos en caso de ser necesario en la BTA. Esto se produce en las entidades tipo borde. Por ejemplo, si un elemento poligonal se corta con el marco de la hoja se cierra con un borde de case, otro ejemplo es el borde virtual que se utilizan para generar polígonos que no tienen representación en la realidad, como es el caso de las líneas que se utilizan para cerrar dos carreteras en su intersección.

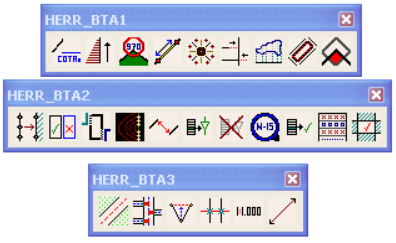


Figura 1: Herramientas de producción desarrolladas por SERESCO entre las que destacan (generación de polígonos, ejes, enlace a BdD, etc.).

A todos los elementos en CAD se les pasa un primer control de calidad y se enlazan a una base de datos. A partir de este momento se transforma, mediante nuestra propia aplicación, a un producto SIG.

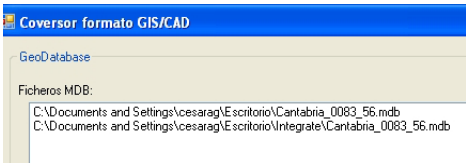


Figura 2: Herramienta de transformación de CAD a GIS.

El resultado es la entrega del producto cartográfico en formato SHP y geodatabase que será evaluado a partir de unos determinados controles de calidad específicos para la BTA que serán comentados en el siguiente apartado.

Los trabajos de la CNC abordarán en próximas versiones de la BTA las tareas de representación cartográfica no existiendo todavía normas consensuadas al respecto. No obstante, SERESCO ofrece a sus clientes una representación adecuada en soporte digital y de una impresión en papel como producto convencional. De este modo, generado el producto BTA en bruto, se pasa a la fase de maquetación cartográfica donde se abordarán los procesos de aplicación de una simbología puntal, lineal y superficial.

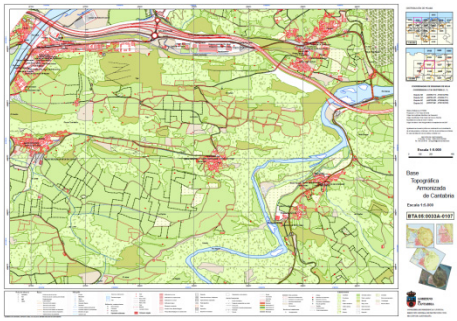


Figura 3: Ejemplo de salida gráfica.

CONTROL DE CALIDAD

Los controles de calidad que establecen las especificaciones de la BTA son muy exigentes por ello se incorporan todos los controles dentro del propio proceso productivo monitoreando los pasos que realizan todos los técnicos para asegurar que se siguen los procesos previstos.

En concreto se controla la exactitud posicional mediante la comprobación de puntos de chequeo y levantamientos topográficos de zonas de control distribuidas por toda el área de trabajo.

También se asegura la compleción de la cartografía tanto tras la fase de captura como durante la edición Este es un control visual no automático que debe realizar un técnico con experiencia. Se revisa las hojas comprobándose simultáneamente el grado de adaptación de la cartografía a la realidad y la homogeneidad del producto. También se indican errores de comisión, si los hubiere.

La consistencia lógica se comprueba mediante la herramienta ProBTAQC que asegura que todos los códigos utilizados estén en el catálogo de fenómenos BTA y que los atributos de cada fenómeno sean los correspondientes a dicho fenómeno y asegurando también que la cartografía cumple las reglas del modelo conceptual.

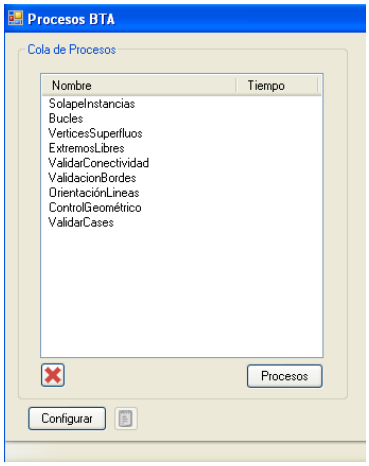


Figura 4: Herramienta de control de calidad desarrollada por SERESCO.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un completo sistema de producción conforme a la primera versión de la BTA. Como en todo proyecto innovador, ha requerido que el diseño metodológico se fuese ajustando progresivamente según los diferentes problemas detectados pero que finalmente ha concluido de manera óptima con la realización de diversos trabajos cartográficos con este modelo de datos.

Desde SERESCO somos conscientes que nos encontramos en una primera versión con lo que el software desarrollado tanto para la producción como para el control de calidad del producto se ha generado de manera que la adaptación para futuras versiones de la BTA se pueda realizar de manera sencilla..

Este cambio en la producción ha implicado dotar de mayor peso, tanto en medios humanos como técnicos, al departamento de edición cartográfica, puesto que su importancia en el proyecto ha aumentado considerablemente respecto al departamento de restitución cartográfica. Asimismo, la presencia de programadores dentro del entorno de trabajo ha resultado imprescindible para el éxito de esta migración.

BIBLIOGRAFÍA

COMISIÓN DE NORMAS CARTOGRÁFICAS. CONSEJO SUPERIOR GEOGRÁFICO. BTA, 2008: *Especificaciones y Diccionario de Fenómenos de la Base Topográfica Armonizada 1:5 000 (BTA) v1.0.* Enero, 2008.

INSPIRE, 2007: *Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE).* Official Journal of the European Union, 25.4.2007, L 108/1. 25 de Abril, 2007.

Propuesta metodológica para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe: Estado de situación y Avances

P.D. Blanco[1], G. López Saldaña[2], R.R. Colditz[2], L.A. Hardtke[1], N.A. Mari[3], A. Fischer[3], C. Caride[3], P.G. Aceñolaza[4], H.F. del Valle[1], S. Opazo[5], W.F. Sione[4], M. Lillo-Saavedra[6], P. Zamboni[4], M.I. Cruz López[2], J.A. Anaya[7], F. Morelli[8] y S.C. de Jesús[8]

[1]Centro Nacional Patagónico, CONICET, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
[2]Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), México DF, México
[3]Instituto de Clima y Agua, INTA, Castelar, Buenos Aires, Argentina
[4]Centro Regional de Geomática (CEREGEO-FCyT-UADER), Paraná, Entre Ríos, Argentina.
[5]Escuela de Ciencia y Tecnologias Agropecuarias, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile
[6]Departamento de Mecanización y Energía, Facultad de Ing. Agrícola, Universidad de Concepción, Chile
[7]Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia
[8]Centro de Previsao de Tempo e estudos Climáticos, INPE, Sao José dos Campos, Brasil

RESUMEN

Este trabajo fue desarrollado en el marco de la Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales (SERENA) en respuesta a la gran necesidad existente de contar con información de cobertura del suelo, con una resolución espacial media, en la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC). En el presente artículo se detalla la metodología y se presentan los resultados preliminares obtenidos para la cartografía de la cubierta superficial de LAC para el año 2008.

Palabras clave: cobertura del suelo, Latinoamérica y Caribe, MODIS, SERENA.

ABSTRACT

This work was developed in the framework of the Latin American Network of Monitoring and Study of Natural Resources (SERENA) in response to the need for accurate and reliable information on landcover, with a medium spatial resolution in the region of Latin America and the Caribbean (LAC). This article describes the methodology and presents the results obtained for the year 2008.

Keywords: *landcover, Latin America and Caribe*, MODIS, SERENA.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 40 años, Latinoamérica ha experimentado un proceso de cambios ambientales sin precedentes en la historia. La deforestación, los incendios, la expansión de la agricultura, el cambio climático y la globalización de la economía mundial son algunas de las principales causas. Para el estudio del cambio global, se requiere de información actualizada y accesible para el seguimiento del estado de los ecosistemas, el cual se viene desarrollando en distintos países a través de diferentes herramientas y metodologías. Este trabajo se enmarca en el contexto de la Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales (SERENA), que reúne a 18 institutos de investigación, con 52 investigadores participantes, de 11 países. El principal objetivo del proyecto SERENA es el seguimiento, el estudio y la difusión de información asociada a la quema de biomasa y de los cambios producidos en el uso y cobertura del suelo sobre Latinoamérica y el Caribe (LAC). En este contexto, una adecuada caracterización de la superficie, obtenida en forma periódica y con una resolución espacial media es esencial para implementar un sistema de monitoreo del cambio de la superficie terrestre que pueda ser actualizado anualmente y sea una fuente de información sostenible y crítica para los usuarios de esta región.

Los principales productos de cobertura del suelo en la región de LAC incluyen cartografías elaboradas a través de tres iniciativas internacionales a nivel global, como son el producto Global Land Cover (GCL2000) producido a partir de imágenes SPOT (Bartholome y Belward 2005), el

GlobeCover elaborado con imágenes MERIS (Arino et al. 2008), y más recientemente, el producto Land Cover obtenido a partir de imágenes MODIS colección 5 (Friedl et al. 2010). Estos productos presentan diferencias básicas a nivel instrumental (sensores utilizados), técnico (algoritmo de clasificación) y conceptual (sistema de clasificación). Asimismo, estudios recientes (Pérez-Hoyos y García-Haro 2009, Cabral et al. 2010) han mostrado importantes diferencias e inconsistencias entre los mismos.

El objetivo de este trabajo es aprovechar el alto potencial espectral y temporal que ofrece el sensor MODIS para derivar información precisa sobre la cobertura de suelo en LAC, utilizando algoritmos de clasificación supervisada, valiendose del conocimiento de los diferentes tipos de cubiertas, a nivel local, de los experto que son miembros de la red SERENA. Asimismo, se pretende elaborar un producto que sea compatible, tanto en la leyenda utilizada como a nivel técnico-instrumental, con la cartografía de cobertura y uso del suelo generado por el proyecto North American Land Cover Change Monitoring System (NALCMS) para Canada, EEUU y México, de manera de unificar ambas cartografías a nivel continental.

METODOLOGÍA

Las fases metodológicas realizadas para la generación del producto LandCover SERENA para la región de LAC, tomando como base el año 2008, fueron las siguientes:

1) Definición de la leyenda
2) Adquisición y pre-procesamiento de la información satelital base derivada del sensor MODIS y datos auxiliares (datos climáticos, topográficos, e índice verde)
3) Recopilación de datos de entrenamiento a partir del muestreo aleatorio de cartografía de detalle de la región
4) Clasificación con árboles de decisión
5) Aplicación de máscaras
6) Validación de resultados

Definición de la leyenda SERENA

Se utilizó un sistema de clasificación jerárquico que fuera compatible con el Land Cover Classification System propuesto por el Fondo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Esta elección permite compatibilizar la cartografía de coberturas de Latinoamérica y Caribe con la generada por el proyecto NALCMS. La Tabla 1 muestra la leyenda empleada.

	CLASE
1	Bosque de latifoliadas perennifolio tropical
2	Bosque de latifoliadas caducifolio tropical
3	Bosque de latifoliadas perennifolio subtropical
4	Bosque de latifoliadas caducifolio subtropical
5	Bosque de latifoliadas perennifolio templado
6	Bosque de latifoliadas caducifolio templado
7	Bosque de coníferas subtropical
8	Bosque de coníferas subtropical
9	Bosque mixto
10	Arbustal tropical
11	Arbustal subtropical
12	Arbustal templado
13	Pastizal tropical
14	Pastizal subtropical
15	Pastizal templado
16	Cuerpo de agua
17	Áreas urbanizadas
18	Hielo y nieve permanente
19	Suelo Desnudo
20	Cultivo
21	Humedal
22	Salinas
23	Datos nulos

Tabla 1: Leyenda SERENA para la clasificación de coberturas y uso del suelo de LAC.

Adquisición y pre-procesamiento de los datos MODIS y la información auxiliar

El Sensor MODIS a bordo de las plataformas satelitales Terra (desde 1999) y Aqua (desde 2002), posee una anchura de barrido de 2.300 km., proporcionando una visión completa de la tierra cada 1 ó 2 días. . Para este trabajo se generaron compuestos mensuales con 500 m de resolución espacial de las primeras 7 bandas del sensor a partir de imágenes diarias de reflectividad (producto original MOD09GA). Asimismo, el estimado de calidad del píxel fue utilizado para reemplazar aquellos píxeles marcados con baja calidad empleando un algoritmo de interpolación lineal basado en los píxeles vecinos en tiempo y espacio.

Para cada mes del año 2008 se estimó el Indice Diferencial de Vegetación Normalizada (NDVI) y para cada banda espectral se calculó media, desvío estándar, mínimo, máximo, y rango entre ambos, para año redondo, 6, 4 y 3 meses. De esta manera, se generaron 400 métricas derivadas de los datos MODIS. Las variables auxiliares topográficas fueron derivadas del SRTM (elevación, pendiente, aspecto) y las variables climáticas de la base de datos WORDCLIM (se utilizaron las siguientes variables: bio 1, 2, 4-7, y 12-15).

Obtención de datos de entrenamiento

Se convocó a expertos miembros de la red SERENA para generar puntos de entrenamiento según el protocolo que se detalla a continuación:

1) Recopilación de cartografía de referencia detallada y actualizada de los distintos países/regiones que conforman LAC.
2) Traducción de las distintas leyendas de la cartografía de referencia a la leyenda SERENA.
3) Generación de puntos de muestreo aleatorios a partir de la cartografía de referencia, distanciados 5 Km. y construcción de zonas cuadradas buffer de 2x2 Km a partir de los mismos.
4) Aplicación de un primer filtro: cruzamiento de la capa buffer con los polígonos de la capa de referencia, con la restricción que los elementos buffer que se superpongan con más de un polígono sean eliminados. Este filtro permite excluir puntos que podrían confundir más de una clase.
5) Aplicación de un segundo filtro: los elementos buffer son exportados como archivos KML y visualizados en Google Earth©. A partir del conocimiento experto son eliminados los objetos que no se correspondan con la clase de interés o que no cumplan con el requisito de pertenecer a clases homogéneas. A partir de la aplicación de estos dos filtros se genera la capa de puntos de entrenamiento.

Clasificación con árboles de decisión

Los árboles de decisión ofrecen varias ventajas sobre los algoritmos de clasificación tradicionalmente utilizados para el mapeo de la cobertura del suelo. Además de su naturaleza no-paramétrica (lo cual permite incorporar datos discretos a la clasificación, independientemente de la distribución y la correlación que exista entre ellos), posibilitan una fácil inclusión de distintos tipos de datos.

En este trabajo fue utilizado el algoritmo C5.0 para la generación de árboles de decisión, implementado en el software See5. Este algoritmo trabaja a partir de los puntos de entrenamiento determinando las características apropiadas de la variable de respuesta al fraccionar recurrentemente los datos explicativos en grupos cada vez más homogéneos con el resultado de producir un árbol jerárquico integrado por reglas. De manera de mejorar el desarrollo del algoritmo de aprendizaje se utilizó la técnica de *boosting* con diez iteraciones, que construye clasificadores mediante la asignación de pesos a los ejemplos de forma adaptativa. En cada iteración se construye un clasificador que intenta compensar los errores cometidos previamente por otros clasificadores. Por último, el conjunto de reglas y los clasificadores así obtenidos son utilizados para clasificar la región del LAC. Para esto se utilizó un programa desarrollado en Interactive Data Language (IDL).

Aplicación de mascaras

Las clases Cuerpos de Agua, Hielo y nieve permanente, y Areas Urbanizadas no son clasificadas, sino que son aplicadas en forma de mascaras a posteriori de la clasificación.

En particular, para la obtención de la máscara de cuerpos de agua, se utilizó el producto Global Raster Water Mask (GRWM-MOD44W). Para la generación de máscaras de nieve y hielo permanente, se calibró el índice NDSI6, que corresponde a la diferencia normalizada entre las basndas 4 y 6 de MODIS. La máscara de áreas urbanizadas se obtuvo a partir de imágenes DMSP-OLS (Nighttime Lights Time Series).

Validación de resultados

El conjunto de datos fue dividido en entrenamiento (80%) y validación (20%). Para estimar la precisión de la clasificación se calcularon los coeficientes Kappa global y por clase derivados a partir de la matriz de confusión.

RESULTADOS PRELIMINARES

La validación de los resultados de la clasificación preliminar mostró una fiabilidad satisfactoria (Kappa=71.7%), con un rango amplio de valores de precisión por clase comprendidos entre el 20 y 88.3%, siendo la clase Bosque de Coníferas Subtropical la que resultó con mayores errores de confusión con el resto de las clases. En el futuro, se prevé mejorar estos resultados mediante el balanceo de las muestras de entrenamiento en función del área ocupada por cada clase. En la figura 2 se muestra el resultado preliminar de la clasificación discreta Se determinaron 20 tipos de coberturas, las cuales se discriminan adecuadamente teniendo en cuenta los tipos de ecosistemas y los climas. Los bosques tropicales y subtropicales poseen una importante distribución espacial en comparación a los del tipo templado. Las áreas de suelo desnudo o con baja cobertura se encuentran asociadas, regionalmente, a las zonas desérticas del Caribe y del centro oeste de Latinoamérica y localmente, a playas y actividades antrópicas de

denudación. Los humedales presentan una amplia distribución espacial, posiblemente asociada a la presencia de un evento ENSO durante el año 2008. Puede observarse también que existe una buena discriminación para los bosques subtropicales estacionales y no estacionales.

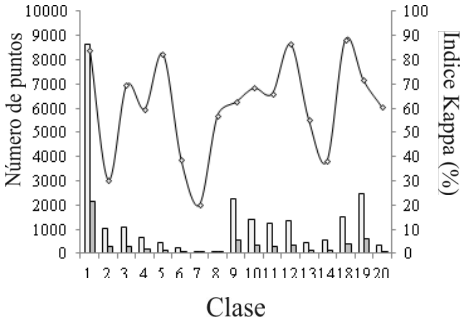


Figura 1: Distribución de puntos de entrenamiento (barras blancos) sobre eje izquierdo, y coeficiente Kappa (línea) sobre eje derecho, para cada clase considerada en la clasificación. Ver Tabla 1 para los códigos de las clases.

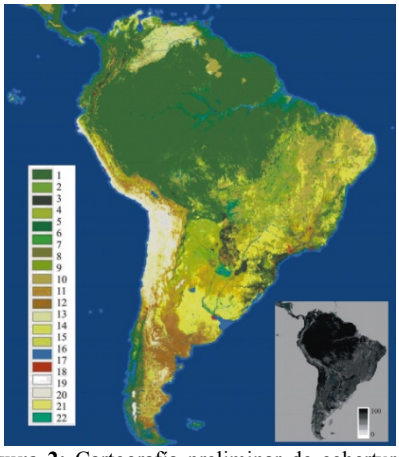


Figura 2: Cartografía preliminar de cobertura y uso del suelo para LAC con su respectiva confianza. Ver Tabla 1 para los códigos de la leyenda.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un método para la generación periódica de mapas de cobertura y uso del suelo para la región de LAC a partir de imágenes MODIS. Para ello se propuso utilizar conocimiento experto para entrenar algoritmos de árboles de clasificación. El análisis de los resultados preliminares permite concluir que la utilización de la dinámica anual de la respuesta espectral permitió discriminar adecuadamente la heterogeneidad de la distribución de las coberturas, ajustándose las mismas al concepto de tipos funcionales de ecosistemas.

Los próximos productos que se esperan generar en el marco del proyecto SERENA incluirán mapas actualizados de cobertura del suelo a intervalos regulares y productos para la detección del cambio. Estos productos servirán, entre otras aplicaciones, como indicadores diagnósticos del cambio en la cobertura del suelo en LAC y contribuirán a una mejor comprensión de la dinámica de la cobertura vegetal en la región.

BIBLIOGRAFÍA

ARINO, O., BICHERON, P., ACHARD, F., LATHAM, J., WITT, R., y WEBER, J., 2008. *GLOBCOVER-The most detailed portrait of Earth*. ESA Bulletin-European Space Agency, 24−31.

BARTHOLOME, E., y BELWARD, A., 2005. GLC2000: *A new approach to global land cover mapping from Earth observation data.* International Journal of Remote Sensing, 26, 1959−1977.

FRIEDL, M.A., SULLA-MENASHE, D., TAN, B., SCHNEIDER, A., RAMANKUTTY, N., SIBLEY, N., y HUANG, X., 2010. *MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets*. Remote Sensing of Environment 114:168–182.

CABRAL, A., VASCONCELOS, M., y OOM, D., 2010. *Comparing information derived from global land cover datasets with Landsat imagery for the Huambo Province and Guinea-Bissau.* En: Wagner W, Székely B (eds.): ISPRS TC VII Symposium-100 Years ISPRS, Vienna, Austria, 5-7 Julio, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7B. pp. 107-112.

PÉREZ-HOYOS, A., y GARCÍA-HARO, F., 2009. *Análisis comparativo de las principales cartografías de coberturas del suelo en la Península Ibérica*. En: Montesinos Aranda S y Fernández Fornos L (eds.): .XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-26 Septiembre, pp. 209-212.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida a través del proyecto SERENA, así como el apoyo de su coordinador Carlos Di Bella y la invaluable asistencia de Julieta Straschnoy para la realización de este trabajo

La constelación de satélites Pleiades-HR1 y 2: De la Teledetección a la Fotogrametría

T. Fernández de Sevilla

INFOTERRA SGSA. Paseo de la Castellana 149 1º, 28046 Madrid. España. T: +34 914490149; E-mail: tomas.sevilla@infoterra.es

RESUMEN

A tan sólo unos meses del lanzamiento, se revisan y exponen las características técnicas de Pleiades. Se detalla las características del sensor, los modos de captura, el preprocesamiento de las imágenes y los tipos productos. De forma específica se expone y desarrolla el concepto de "Sensor Perfecto", especialmente diseñado para las aplicaciones fotogramétricas y captura de datos en 3D.

Palabras clave: Pleiades, muy alta resolución, "Sensor Perfecto", imágenes estéreo y triestéreo.

ABSTRACT

Just a few months before of Pleiades' launch, the technical characteristics are reviewed and described. The characteristics of the sensor, the capture modes, preprocessing of images and product types are detailed. Specifically set out and develop the concept of "Sensor Perfect", especially designed for photogrammetric applications and 3D data capture.

Keywords: *Pleiades, very high resolution, "Perfect Sensor", stereo and tri-stereo images.*

INTRODUCCIÓN

La constelación de satélites Pleiades (nombre original en francés) de muy alta resolución óptica, es un sistema de observación de la tierra desarrollado por el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) con un doble uso: Militar y civil. La puesta en órbita del primer satélite está prevista para finales de 2.011. El lanzamiento del satélite Pleiades 2 tendrá lugar entre 9 y 15 meses después, dando lugar a un sistema con revisita diaria.

Los productos de Pleiades para el sector civil serán distribuidos por Spot Image, que actualmente está integrada con Infoterra, formando la división de Astrium Servicios de Geoinformación. La nueva generación de satélites Spot 6 y 7 está en proceso de fabricación con una planificación de lanzamiento en 2012 y 2014, estarán configurados en sus órbitas para complementar la constelación de Pleiades. Se genera un nuevo concepto de constelación al intercalar satélites de distintas resoluciones, que tendrá una capacidad de dos visitas al día para cualquier lugar del mundo.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE PLEIADES

Misión Pleiades HR

La misión Pleiades está diseñada para cubrir las necesidades de los usuarios del sector defensa y civil, con un alto nivel de proactividad, para responder adecuadamente en las aplicaciones de vigilancia y gestión de crisis. Sus principales aplicaciones son: Defensa, Cartografía, Vigilancia, Agricultura, Medioambiente, Geología e Ingeniería Civil.

Pleiades ofrece imágenes con una resolución nominal de captura de 50 cm en el nadir de la banda pancromática, y 2 m en las bandas multiespectrales (4 bandas en el visible e infrarrojo cercano). El ancho de barrido es de 20 km, con una órbita casi circular, heliosincrónica, a una altura de 694 km y con el nodo descendente a las 10h 30' hora local. Su ciclo de revisita orbital es de 26 días. La mejor precisión absoluta que se podrá conseguir sin puntos de apoyo de campo será de 4,5m CE90 (error circular al 90% de probabilidad) utilizando parámetros refinados de la órbita.

Arquitectura del satélite

Los principales aspectos del diseño del satélite se centran en la calidad de las imágenes, la agilidad en las maniobras de apuntamiento y la exactitud en la localización de las imágenes. La calidad de las imágenes depende del tamaño del instrumento de observación y su material. La agilidad de los movimientos requiere un diseño muy compacto del cuerpo del satélite, con una estructura de 1.080 kg, donde el telescopio está integrado de forma especial y los movimientos se

controlan con un conjunto de 4 giróscopos del tipo CMG (Control Momentum Gyros).

El cuerpo del satélite está fabricado con forma hexagonal, tiene 3 paneles solares a 120º y 3 sistemas seguidores de estrellas (star-tracker) para optimizar la precisión en los parámetros de orientación.

Tipo de instrumento

La solución óptica elegida es un telescopio de configuración Korsch, con un espejo principal de 650 mm de diámetro y una distancia focal de 12,9 m. Una de las principales características de Pleiades es su sistema único de imágenes, donde se capturan simultáneamente los datos pancromáticos y multiespectrales. En la captura de las imágenes pancromáticas se utiliza un sistema TDI (Time Delay Integration) para corregir el movimiento de avance de la plataforma durante la captura de las imágenes. Se han incluido 5 detectores, con 6.000 pixeles cada uno y un tamaño físico de 13 µm. (Lèbec 2.009).

La captura de la información multiespectral se realiza con 5 detectores CCD (Charged Coupled Device), de 1.500 píxeles cada uno y de 52 µm de tamaño físico por pixel. Cada juego de detectores consiste en 4 arrays lineales ensamblados, que formarán los 4 canales de color (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano). El rango dinámico es de 12 bits por pixel, para mejorar la sensibilidad y evitar saturaciones.

El plano focal está formado por 2 juegos de detectores simétricos. Para adquirir imágenes de 20 km de ancho, cada línea de vista se compone de arrays lineales consecutivo. Lo cual genera imágenes de 30.000 columnas en el canal pancromático, y 7.500 columnas en los canales multiespectrales.

MODOS DE PROGRAMACIÓN

Frecuencia de revisita

Los requerimientos básicos de la misión Pleiades son ofrecer una cobertura mundial y poder acceder diariamente a cualquier punto de la Tierra. Estos requerimientos se cumplirán con 2 satélites en constelación, con un desfase de 180º en la posición de su órbita y con ángulos de visión hasta 45º. De esta forma, un objetivo a 40º de latitud geográfica, podría ser capturado con tan solo 30º de imagen oblicua diariamente.

Para mejorar la capacidad de programación del satélite, hay 3 subidas de programación al día (lo usual son 2) desde las estaciones principales de Kiruna y Kerguelen, con Toulouse como complemento. Adicionalmente, existe la posibilidad del modo de comando directo, que permite a cualquier otra estación de recepción directa enviar optimizaciones de la programación hasta 20 minutos antes del paso sobre la estación, minimizando el periodo de tiempo entre el comando y la descarga.

Capacidad de adquisición

Dada la excepcional agilidad de Pleiades, es capaz de apuntar el telescopio 30º desde el nadir, en cualquier dirección de su traza (en roll o pich) en menos de 25 segundos. Cada satélite es capaz de adquirir y entregar un equivalente de 800 imágenes de 500 km^2 al día. La constelación podrá capturar 1 millón de km^2 al día. Los patrones de captura son:

Captura de objetivos: 20-30 imágenes por paso para variaciones angulares > 30°.

Bloques de pasadas hasta 10.000 km^2 por paso. Es el modo más adecuado para grandes coberturas de ortoimágenes.

Captura de imágenes estéreo y triestéreo: Hasta 6.000 km^2 en modo estéreo, y 2.000 km^2 en modo triestéreo en un solo paso. Es ideal para aplicaciones cartográficas y generación de modelos de elevación. Se minimizan las zonas ocultas en áreas urbanas. Con la capacidad triestéreo se consiguen modelos de elevación más fiables y precisos. Las relaciones B/H pueden ser entre 0,15 – 0,8 para el caso estéreo, y entre 0,3-1 para el caso triestéreo (Lèbec 2.009).

Capturas múltiples sobre un mismo objetivo. Hasta 12 imágenes tomadas durante 1’ 53’’ (7 u 8 segundos entre adquisición). Este modo es ideal para seguimiento de objetivos móviles.

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y PRODUCTOS

Se han definido unos niveles clásicos de procesamiento correspondientes a datos brutos (L0) y datos corregidos radiométricamente (L1). Adicionalmente, se ha definido un producto llamado “Sensor Perfecto” y los productos de ortoimágenes y mosaicos.

El producto “Sensor Perfecto”

La complejidad del plano focal de Pleiades-HR, hace que los productos de nivel L1 sean difíciles de utilizar. Por ello, se propone un nuevo nivel de producto llamado “Nivel de Sensor”, basado en el concepto de “Sensor Perfecto”. El objetivo es generar una imagen como si hubiera sido capturada por un sensor de tipo barrido

(push-broom), similar a Spot5 o las cámaras ADS40 de Leica-Geosystems. De manera que las imágenes puedan ser tratadas sin tener en cuenta la complejidad de la geometría del sensor real, y manteniendo al mismo tiempo su precisión original. El "Nivel de Sensor" está especialmente pensado para las operaciones y aplicaciones fotogramétricas de generación de modelos digitales de elevación y extracción de entidades 3D por técnicas estereoscópicas. Se entrega el modelo físico y el modelo de polinomios racionales, que contienen los parámetros de localización directa e inversa para poder ser utilizados con software comercial.

El producto "Sensor Perfecto" sólo tiene la corrección radiométrica inicial y las correcciones geométricas de distorsiones (dirección de vista y variaciones de alta frecuencia de actitud). No se le aplica ningún tipo de proyección. Se entregan las imágenes pancromáticas a la resolución nominal de 50 cm y las mutiespectrales a la resolución de 2,0 m. También es posible entregar imágenes multiespectrales a la máxima resolución de 50 cm tras el proceso de fusión con las imágenes pancromáticas.

El concepto de "Sensor Perfecto" se define para abstraer la complejidad de la geometría del plano focal de las imágenes a nivel bruto, donde se tienen que considerar 25 productos diferentes con sus propios modelos geométricos. Lo cual proviene de la capa de detectores, compuesta por 5 arrays CCD curvos que realizan la función TDI para la captura de información pancromática, y otros 5 por cada una de las 4 bandas multiespectrales. (Delussy, 2.005)

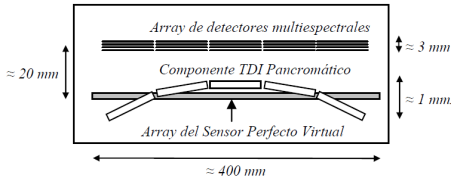


Figura 1: Plano focal y posición del array virtual del "Sensor Perfecto"

El marco de referencia geométrico de las imágenes del "Sensor Perfecto" emula la geometría de imagen de un sensor lineal de tipo "push-broom" y se sitúa muy próximo a los arrays TDI de la información pancromática. Además, el array ideal se supone que forma parte de un instrumento sin distorsiones ópticas y que va montado en una plataforma sin grandes perturbaciones en su trayectoria.

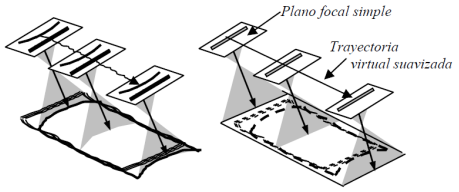


Figura 2: Geometría interna y externa del "Sensor Perfecto" antes y después de su conversión.

Las imágenes del array lineal ideal se generan a partir de imágenes en bruto L1 y el modelo de sensor riguroso. La utilización de un único Modelo de "Sensor Perfecto", común a todas las bandas (pancromática y multiespectrales), permite ofrecer productos corregistrados: Las imágenes del "Sensor Perfecto" pancromáticas y multiespectrales se podrán superponer sin desplazamientos en su posición (Delussy, 2.005).

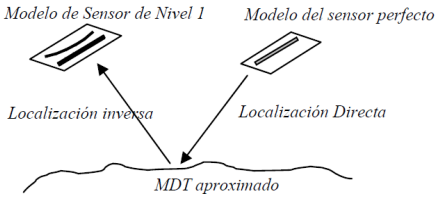


Figura 3: Proceso de generación de la imagen del "Sensor Perfecto".

La imagen en bruto se convierte a la geometría del Sensor Perfecto utilizando la información de un modelo de elevaciones aproximado. El proceso de localización directa se realiza utilizando un modelo riguroso del "Sensor Perfecto". El impacto del proceso de generación de las imágenes del "Sensor Perfecto" supone sólo errores del orden del centímetro (Delussy, 2.005).

En el caso de productos de pares estereoscópicos de Pleiades, se entrega un conjunto de 2 imágenes apuntando el satélite hacia delante y hacia detrás. El triplete estereoscópico está formado por un conjunto de 3 imágenes adquiridas con la secuencia de vista hacia delante, nadiral y hacia detrás. Son procesados utilizando el nivel de "Sensor Perfecto".

Con las imágenes estereoscópicas de Pleiades es posible plantearse la captura de cartografía vectorial 3D a escala 1:5.000 y Modelos Digitales de Elevación con resolución de 5 m x 5 m de paso de malla y 2 m de precisión estándar.

El producto ortoimagen

Uno de los productos de referencia más requerido por los usuarios, es la imagen color de resolución submétrica que pueda combinarse con cartografía a escala 1:5.000 o inferiores y que tenga una determinada proyección cartográfica.

Para obtener la máxima precisión en la localización absoluta, se recomienda utilizar puntos de apoyo de campo con precisión superior al tamaño de pixel y un modelo digital de elevaciones, con una resolución y precisión compatibles, como sería el caso de los modelos digitales del terreno de proyecto PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) con 2 m de precisión estándar. De manera que la máxima precisión sería de 1 m, ya que posible obtener un error de posición del orden de la mitad del error altimétrico del modelo de elevaciones utilizado (Molina S., 2008).

El producto ortomosaico

Los ortomosaicos están pensados para cubrir grandes áreas donde sea necesaria una cobertura continua de imágenes. Esto es posible gracias a la gran agilidad de la plataforma que puede apuntar y estabilizar en pocos segundos para adquirir pasadas adyacentes en un solo paso del satélite sobre la zona de interés. La superficie puede ser hasta 10.000 km^2 o incluso más, dependiendo de la longitud de las pasadas y de la relación B/H entre ellas.

Para conseguir unos resultados óptimos que permitan que el producto sea compatible con las especificaciones de los proyectos más exigentes, como es el caso de PNOA50, se debe seguir un flujo de trabajo basado en la triangulación espacial para refinar los parámetros de orientación y ajuste radiométrico de escenas.

Formato de los ficheros de imagen

El principal formato de imágenes será JPEG2000 (JP2). Este formato tiene compresión, que puede ser con o sin pérdida. El tipo de compresión se puede definir por el usuario. No obstante, la compresión con pérdida tiene un efecto casi imperceptible en la calidad de la imagen. La información se puede representar en 8 o 16 bits dentro del formato JP2.

La georreferenciación de las imágenes, y otros metadatos, se incluyen en la cabecera del fichero utilizando etiquetas GML (Geographic Markup Language), tanto para las ortoimágenes, los mosaicos o el producto "Sensor Perfecto".

Una imagen pancromática, de 50 cm de resolución, de un tamaño de 20 km x 20 km (40.000x40.000 píxeles) en formato JP2, tendrá un tamaño en disco de 1.472 MBytes para 8 bits con compresión sin pérdida. Mientras que incluyendo compresión con pérdida su tamaño será de 736 MBytes. Para imágenes PAN+MS de 3 o 4 bandas los tamaños se multiplican por el número de bandas.

CONCLUSIONES

La misión Pleiades tiene un doble uso civil y militar, que permite satisfacer las necesidades de cada sector y recuperar la inversión del programa.

El diseño de Pleiades ofrece una solución equilibrada entre resolución submétrica y la mayor cobertura superficial por escena (20 km x 20 km) entre los satélites de su clase. Junto a una capacidad de revisita diaria y una alta precisión. Su agilidad en las maniobras, permite capturar objetivos dispersos en un solo paso y puede tomar imágenes estéreo y triestéreo.

Gracias al concepto del "Sensor Perfecto", el manejo y procesamiento de imágenes Pleiades se simplifica, facilitando su uso en aplicaciones fotogramétricas y manteniendo a su vez la precisión original de los datos.

La capacidad estereoscópica permite obtener cartografía 3D a gran escala y generar modelos de elevación de alta densidad y precisión, que pueden aplicarse a la generación de cartografía básica a escala 1:5.000 o en proyectos más específicos de ingeniería civil en cualquier parte de la Tierra. Además es posible abarcar grandes extensiones del territorio para la producción de grandes coberturas de ortoimágenes.

Pleiades no sólo es un sistema para la generación de píxeles y coberturas ráster, sino que sus datos son capaces de satisfacer la necesidad de información tridimensional.

BIBLIOGRAFÍA

BAILLARIN, S. et al., 2010. *Pleiades-HR imaging systems: Ground processing and products performances, few months before launch*. ISPRS Comission VI, WG VI/4.

CNES, 2.011. http://smsc.cnes.fr/PLEIADES/

DELUSSY, F., et al. 2.005. *Pleiades-HR image systems products and quality.* CNES.

LEBÈC, L. 2.009. *Qualitè Images pleiades-HR.* CNES.

MOLINA, S. 2008. *Jornadas Técnicas del Plan Nacional de Ortofotografía.* TRAGSATEC.

Diferentes metodologías de cálculo de volumen de copa en *Platanus hispanica* empleando láser escáner terrestre

A. Fernández-Sarría[1], L. Martínez[1], B. Velázquez-Martí[2], M. Sajdak[2], J. Estornell[1], J.A. Recio[1] y T. Hermosilla[1]

[1] Dpto. Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia. Cno. de Vera s/n, 46022, Valencia (España). Correo electrónico: afernan@cgf.upv.es

[2] Dpto. Ing. Rural y Agroalimentaria, Universidad Politécnica de Valencia. Cno. de Vera s/n, 46022, Valencia (España).

RESUMEN

El desarrollo continuo de escáneres láser terrestres permite que los equipos sean cada vez más versátiles y precisos y se puedan emplear en tareas como la modelización tridimensional y caracterización geométrica de árboles. Esta tecnología permite automatizar operaciones de medición dendrométrica para cálculo de biomasa, evitando operaciones de gabinete, obligatorias cuando se aplican sistemas de dendrometría clásica. Ésta requiere medir a mano parámetros geométricos de cada árbol y aplicar ecuaciones que los relacionan con biomasa o volumen aproximado. Las relaciones clásicas están basadas en formas geométricas sencillas. El objetivo principal de este trabajo es calcular el volumen aparente de forma automática de 30 ejemplares de *Platanus hispanica* mediante un láser escáner. Estos árboles han sido escaneados con un equipo Leica Scanstation 2. De la nube de puntos se ha extraído el volumen de la copa por 4 métodos distintos, *convex hull* global, *convex hull* por secciones, triangulaciones por secciones y rasterización de la nube de puntos en *voxels*. La comparación de los volúmenes obtenidos muestra que algunos algoritmos proporcionan valores por exceso al considerar los huecos internos a la planta, mientras que otros proporcionan valores volumétricos ajustados a la forma y estructura interior de la copa.

Palabras clave: Láser escáner, volumen de copa, *convex hull*, *voxel*.

ABSTRACT

The continued development of terrestrial laser scanners enables to become more versatile and precise devices and they can be used in tasks, such as three-dimensional modeling and geometric characterization of tree. This technology allows automatic dendrometric measuring operations for calculation of biomass, avoiding office operations. These operations are required when classical dendrometry systems are applied, where geometric parameters are manually measured in each tree, and then, equations for estimating biomass or volume are applied. Classical relations are based on simple geometric forms. The main objective of this study was to calculate automatically the apparent volume from30 specimens of Platanus hispanica by a laser scanner. These trees were scanned with a Leica Scanstation 2. From the point cloud has been calculated crown volume by 4 different methods, global convex hull, convex hull sections, sections and rasterizing of the point cloud into voxels. The comparison of volumes obtained shows that some algorithms provide excess values when considering the internal voids of the plant, while others provide volumetric values more adjusted to the internal structure of the crown.

Keywords*: Laser scanner, canopy volume, convex hull, voxel.*

INTRODUCCIÓN

La tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es un sistema activo en teledetección que permite registrar de manera masiva información en 3 dimensiones de la superficie terrestre, bien sea instalado en aviones en vuelo (LIDAR aéreo) como estacionado en tierra (LIDAR terrestre). Los sistemas LIDAR terrestre (o *terrestrial laser scanner* TLS) se basan en diferencias de fase o en tiempos de vuelo para proporcionar nubes de puntos con coordenadas X, Y, Z del objeto analizado, pudiendo así generar su modelo tridimensional. Los sistemas terrestres (TLS) son cada vez más empleados en aplicaciones muy variadas que van desde el

ámbito industrial, edificación, ingeniería civil, documentación de accidentes e investigación criminal, aplicaciones forestales y agrícolas, etc.

Los trabajos más recientes del TLS en este último campo van orientados hacia la determinación del volumen de cultivos arbóreos y viña por varios métodos y su comparación con medidas de campo clásicas y la determinación de la cantidad de superficie foliar (Palacín et al., 2008) de cara a su gestión óptima. Otros autores se centran en otras magnitudes geométricas de las copas en frutales como son altura, anchura y área de la superficie (Lee et al., 2009), o en la estimación de la biomasa de cada árbol usado como parámetro biofísico que indica su estado de salud (Lin et al., 2010). También se puede combinar con el LIDAR aéreo, consiguiendo datos de toda la planta al proporcionar éste poca información de las partes bajas y laterales. Se puede tener una buena definición de la estructura de los árboles y relacionar los parámetros de los modelos digitales con los datos dendrométricos clásicos, que requieren medidas lentas y laboriosas (Velázquez-Martí et al., 2010). Algunas especies como el platanero de sombra (*Platanus hispanica*) tienen gran vigor vegetativo y necesitan podas anuales. Esto genera una gran cantidad de residuos biomásicos a gestionar cuya estimación podría realizarse a partir del volumen global del árbol. En este trabajo se presentan los métodos analizados para cubicar a partir de un escáner terrestre. Las relaciones con la biomasa estimada son objeto de otras publicaciones.

DATOS DE PARTIDA E INSTRUMENTAL

Los árboles elegidos para el estudio han sido 30 ejemplares de *Platanus hispanica* situados en la localidad de L'Alcudia, provincia de Valencia, dispuestos a ambos lados de una avenida. Las separaciones longitudinal de 20m y lateral de 12m permiten diferenciar los ejemplares, aspecto importante para el escaneado y el procesado posterior. Son árboles de mediana edad, 10-12 años, con altura máxima sobre 13m y diámetro máximo sobre 11m. La geometría de las tomas está condicionada por la proximidad de los edificios laterales y porque las dos filas de árboles se encuentran a ambos lados de una calle de doble sentido de circulación. Por ello, algunos árboles no se han podido tomar más que desde una única estación si bien la mayor parte de ellos han sido observados desde 2 como mínimo.

El instrumento empleado es un láser escáner Leica ScanStation 2, basado en la tecnología tiempo de vuelo, con un compensador de doble eje, alta velocidad de escaneado (50.000 puntos por segundo) y tiene una cámara fotográfica de alta resolución (http://hds.leica-geosystems.com). Se han realizado 13 estaciones para escanear las 30 plantas. La resolución de escaneo es de 5mm, teniendo en consideración la distancia media del láser a cada árbol (la densidad será algo mayor a 5mm en las partes más próximas mientras que será menor en las más alejadas). En cada una de las tomas aparecen reflejados objetos o superficies ajenas al árbol (mobiliario urbano, fachadas, vehículos, personas,…Figura 1) que deben ser filtrados. También se toman las referencias o puntos de enlace entre escaneos, con un mínimo de 4 para asegurarnos el registro en caso de que falle alguna diana.

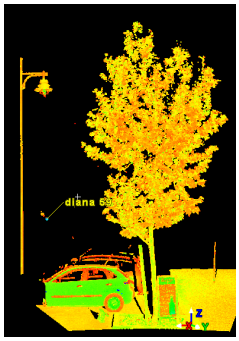


Figura 1: Elementos escaneados en una toma.

Los datos tomados en campo han sido procesados con el software específico de Leica, Cyclone v.6. Se han eliminado puntos anómalos y se han hecho 2 registros entre las diferentes tomas (errores medios absolutos de 18mm y 3mm respectivamente) para tener nubes de puntos unificadas. De ellas, y para facilitar el procesado, se ha extraído cada árbol en un archivo propio.

MÉTODOS PARA CALCULAR VOLUMEN

Se ha trabajado con 4 aproximaciones al volumen de cada copa. Los métodos estudiados y aplicados en MATLAB, dadas sus grandes capacidades de programación y de cálculo, son:

Método 1: Envolvente convexa o *convex hull*. Para un grupo de puntos en el plano o en el espacio es la menor de las superficies o volúmenes que los contienen. A la frontera que delimita dicha superficie o volumen se le llama envolvente convexa o *convex hull*, y se genera mediante triangulaciones de Delaunay entre los puntos exteriores.

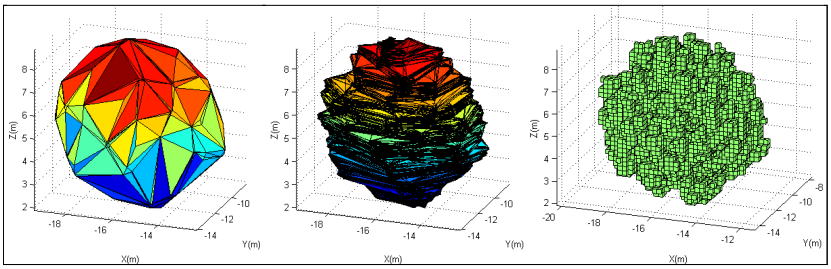


Figura 2: Izquierda: Convex hull para toda la copa; centro: convex hull por capas; derecha: voxels.

Consiste en ir descartando los puntos que no formarán parte de la frontera del cierre convexo, es decir, los situados en el interior de la nube de puntos. El volumen de la copa de un árbol obtenido mediante esta aproximación sería el encerrado por la forma geométrica que envolviera la copa (Figura 2). Es un volumen por exceso porque se incluyen en el cálculo espacios vacíos donde realmente no existen hojas o ramas.

Método 2: *Convex hull* por capas. Consiste en aplicar el algoritmo anterior sobre secciones de la copa de 5cm de grosor. De esta manera, se seguirían incluyendo espacios vacíos de puntos en el plano XY, pero se obtendría una mayor aproximación a lo largo del eje Z. Se parte de la cota mínima de la copa, se seleccionan todos los puntos que se encuentren entre ésta y los 5cm siguientes de cota y se calcula su envolvente convexa. A partir de esta última cota se repite la operación sobre los 5cm de cota siguientes y así sucesivamente. El resultado final es la suma de todos los volúmenes resultantes. En este caso se puede apreciar como la forma se ajusta mejor que antes a la copa del árbol (Figura 2).

Método 3: Método clásico de cálculo de volúmenes por secciones. Se realizan secciones de 2cm de grosor cada 10cm de variación de altura en la copa del árbol. Se considera que los puntos englobados en esa sección de 2cm de altura pertenecen a un mismo plano.
Se realiza sobre ellos una triangulación en superficie, en lugar de hacerlo en volumen como en el caso anterior, y de esta manera se obtiene el área de cada superficie. Para el cálculo del volumen de cada sección se aplica la Ecuación 1.

$$V = \frac{S1 + S2}{2} * h \qquad (1)$$

donde S1 y S2 son las respectivas superficies superior e inferior de la sección y h la altura de ésta, en este caso 10cm. El volumen final de la copa será simplemente el resultado de la suma de las distintas secciones.

Método 4: Rasterizar la nube de puntos a formato *voxel* (*volumetric pixel*). Este concepto expresa la mínima unidad, con apariencia cúbica, que forma parte de un objeto tridimensional y que puede ser procesada. Esto permite un amplio abanico de aplicaciones, al estar los datos organizados como una matriz tridimensional (Stoker, 2009), que permite conocer la geometría de los árboles.

El procesado consiste en partir de las coordenadas X, Y, Z de la nube de puntos y, obteniendo los valores mínimos y máximos, componer el modelo tridimensional de partida. En el siguiente paso se averigua dentro de qué *voxel* existe parte de la nube de puntos. Para ello, partiendo de uno de los vértices del cubo, se obtienen las coordenadas que delimitan esta primera unidad mínima y sobre el fichero de puntos se observa si existen puntos cuyas coordenadas se sitúen dentro de estos límites. El proceso se repite sobre cada uno de los *voxels*. Se obtiene, por un lado, cuantos *voxels* contienen puntos en su interior, de modo que para calcular el volumen final bastará con multiplicar ese número por el volumen de cada unidad (20cm de lado).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se detallan los volúmenes obtenidos en m^3 para los 8 primeros árboles y aplicando los 4 métodos de cálculo. Se pueden apreciar diferencias significativas entre los valores obtenidos por cada método. Se aprecia como el método *convex hull* para toda la copa (CH global) proporciona los valores más altos. Ello es coherente con la propia naturaleza del método, que crea un sólido limitado por triángulos cuyos vértices son los puntos extremos de la nube captada por el láser. Se incluyen todos los huecos internos a la copa y los espacios externos a la copa existentes entre ramas. Es una aproximación poco precisa y por exceso al volumen real.

Árbol	CH global	CH capas	Seccs.	Voxel
1	158.5	110.8	112.5	57.8
2	92.1	51.1	56.8	30.7
3	453.6	342.8	346.2	154.8
4	135.5	106.6	108.0	64.9
5	470.0	361.2	364.3	163.8
6	373.9	264.5	267.6	143.6
7	253.1	152.6	158.0	55.7
8	255.4	186.5	188.9	108.9
…	…	…	…	…

Tabla 1: Volúmenes obtenidos (en m^3) por cada uno de los 4 algoritmos.

Los métodos 2º y 3º (*convex hull* por capas y secciones planas) muestran resultados menores a los del primer método y muy parecidos entre sí. Los dos métodos se parecen en su definición ya que dividen la copa en volúmenes y planos horizontales, con lo que se consigue una mejor aproximación a la forma real de la copa en cada altura. No se contabilizan tantos huecos y se reducen los espacios externos que son incluidos como volumen de copa. La modelización tridimensional con *voxels* proporciona los volúmenes más bajos. Esto es lógico porque la rasterización se hace en función de los puntos existentes dentro de la nube en cada bloque cúbico del espacio. Donde no hay ningún punto no se define *voxel* y no se incluye en el volumen total. Es el método que mejor consigue ajustarse a la forma real externa de la copa del árbol, de sus ramas y hojas. Pero presenta el inconveniente de la ocultación que las hojas de exterior del árbol ejercen sobre las interiores. Quedarán más huecos de los reales dentro de la copa porque la señal proveniente del láser no haya podido penetrar y rebotar en las ramas u hojas del interior de la copa. A pesar de ello, los valores obtenidos según este procedimiento son los que mejor se ajustan al volumen real de biomasa existente en la copa.

Los volúmenes de los 4 métodos tienen un buen ajuste entre ellos, siendo R^2 de 0.92 entre CH global y *voxel,* 0.93 entre CH capas y *voxel* y 0.93 entre secciones y *voxel* (Figura 3).

CONCLUSIONES

El modelado tridimensional con láser escáner muestra importantes ventajas frente a métodos clásicos para analizar la geometría de las copas de los árboles. Por otro lado, los cuatro métodos analizados para calcular volumen de copa se han mostrado útiles para realizar diferentes aproximaciones al problema. El *convex hull* global es más impreciso al calcular por exceso, mientras que el método *voxel* consigue mejores aproximaciones al volumen de biomasa real.

Los coeficientes R^2 de ajuste entre los valores de los 4 volúmenes evidencian una alta relación lineal entre ellos, significando que los algoritmos implementados en Matlab son correctos y los resultados obtenidos son fiables.

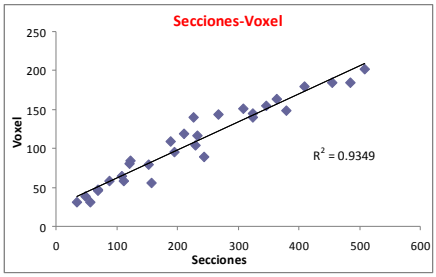


Figura 3: Ajuste entre 2 volúmenes.

BIBLIOGRAFÍA

LEE, K. H., EHSANI, R. 2009. *A Laser Scanner Based Measurement System for Quantification of Citrus Tree Geometric Characteristics.* Applied Engineering in Agriculture, 25, 5, 777-788.

LIN, YI, JAAKKOLA, A., HYYPPÃ, J., KAARTINEN, H., 2010: *From TLS to VLS*: *Biomass Estimation at Individual Tree Level.* Remote Sensing, 2, 8, 1864-1879.

PALACIN, J., PALLEJA, T., TRESANCHEZ, M., TEIXIDO, M., SANZ, R., LLORENS, J., ARNO, J., ROSELL, J.R., 2008: *Difficulties on Tree Volume Measurement from a Ground Laser Scanner*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 1-5.

STOKER, J., 2009: *Volumetric Visualization of Multiple-Return Lidar Data: Using Voxels.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 75, 2, 109-112.

VELÁZQUEZ-MARTÍ B., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ E. 2010. *Residuos de poda del olivar e incremento de la renta agraria*. La Semana Vitivinícola, 3330: 2496-2500.

Modelización tridimensional semiautomática de entornos urbanos a partir de datos LIDAR combinados con información cartográfica

Carlos Fuentes García[1], Javier Suárez Quirós[2] y Ángela Alonso Fernández[3]

[1] Triciclo Gestión y Diseño S.L. Avda. de la Argentina, 132. 33213 Gijón (Asturias, España).
Correo electrónico: carlos.fuentes@triciclodesign.com

[2] Área de Expresión Gráfica, Grupo I3G. Universidad de Oviedo. Campus de Gijón.
Correo electrónico: quiros@uniovi.es

[3] Seresco S.A. C/ Matemático Pedrayes, 23. 33005 Oviedo (Asturias, España).
Correo electrónico: angela.alonso@seresco.es

RESUMEN

La modelización de entornos urbanos (es decir, la representación virtual de edificios, calles, mobiliario, vegetación o cualquier otra infraestructura) añade un valor significativo en numerosas aplicaciones de gestión relacionadas con el procesamiento de información cartográfica. La adición de esta geometría no sólo supone una ayuda a la visualización, mejorando el aspecto estético de la solución final, sino que abre la puerta a otro tipo de procedimientos y análisis para la obtención de información complementaria de elevado valor añadido.

Aunque existen en la literatura numerosos procedimientos para su obtención, la generación semiautomática de modelos urbanos tridimensionales de precisión y calidad aceptables es todavía un proceso costoso que requiere una elevada interactividad por parte del usuario. La línea de trabajo más habitual consiste en la integración de fuentes de datos de diversa procedencia para minimizar los errores del proceso de reconstrucción.

En este proyecto se plantea una metodología innovadora para simplificar el proceso de recreación tridimensional partiendo del cruce entre información cartográfica y datos LIDAR, minimizando la participación del usuario y generando una serie de productos diferenciados en función del equilibrio entre precisión y rapidez con la que sean generados en cada caso. La implementación, testeada sobre una zona de contraste del norte de España, emplea la aplicación Terrasolid y aplicaciones de desarrollo propio para la reconstrucción virtual y utiliza estándares X3D para el entorno de visualización tridimensional interactivo.

Palabras clave: Reconstrucción urbana; LIDAR; cartografía; X3D.

ABSTRACT

The modeling of urban environments (this is, the virtual representation of buildings,streets, furniture, vegetation or other infrastructure) adds significant value in many business applications related to the processing of mapping information.The addition of this geometry is not only an aid to visualization, improving the aesthetic appearance of the final solution, but it may lead to other procedures and tests on complementary information with high added value.

Although there are numerous procedures in the literature for their production, the generation of accurate and precise semi-automatic three-dimensional urban models is still an expensive process that requires high interactivity by the user. The most common line of work is the integration of data from various sources to minimize errors in the reconstruction process.

This project proposes an innovative methodology to simplify the process of three-dimensional recreation, by combining map data and LIDAR data, minimizing user involvement and generating a series of differentiated products, based on the balance between accuracy and speed with which they are generated in each case. The implementation, tested on a contrast area of northern Spain, uses the application Terrasolid and own development applications for the virtual reconstruction using X3D standard for interactive three-dimensional viewing environment.

Keywords: *urban reconstruction, LIDAR, mapping, X3D.*

INTRODUCCIÓN

En los comienzos se pensó que los modelos de ciudad tridimensionales iban a tener su utilidad principal en la localización de antenas de telecomunicación, sin embargo hoy en día existen numerosas aplicaciones para los modelos de ciudad tridimensional y tanto las empresas privadas como las administraciones públicas son conscientes cada vez más sobre las posibilidades técnicas, ambientales y comerciales que ofrecen. Es además objeto de estudio en expansión, estimulado estos últimos años por la llegada de los mundos virtuales al público general como los proporcionados por Google Earth o Visual Earth.
De entre el amplio número de aplicaciones de estos modelos, se pueden destacar:

- planeamiento urbano
- estudios y simulaciones ambientales
- catastro 3D
- planeamiento de redes de telecomunicación
- navegación peatonal o en automóvil
- juegos

Utilización de LiDAR frente a otros sistemas

Los métodos tradicionales de adquisición de datos tridimensionales incluyen el plano topográfico, la fotogrametría aérea, la fotogrametría cercana, estudio de campo, etc, cada cual con sus propias características. No obstante, todos comparten una limitación: son procedimientos complicados de adquisición de datos, que conllevan tiempos grandes y alto coste.
Las principales ventajas del LiDAR son:

- Alta eficiencia.
- Alta precisión, especialmente en los datos de altitud.
- Información detallada, puede obtener no sólo coordenadas tridimensionales de puntos terrestres, sino también simultáneamente coordenadas tridimensionales de otros objetos como árboles, edificios, etc.

Los sistemas láser pueden medir la geometría directamente, por lo que están especialmente indicados para obtener modelos digitales de superficie en áreas extensas. La tecnología LiDAR lleva actualmente consigo un desarrollo de más de diez años. No obstante su mayor inconveniente es la tecnología del post-procesado de datos, pues sigue estando por detrás de la demanda, cuyo principal problema es el manejo, clasificación y extracción de la enorme cantidad de datos que suministra.

FLUJO DE TRABAJO HABITUAL

En la bibliografía se describen numerosos métodos para la reconstrucción geométrica de edificios a partir de datos LiDAR. Aunque los procedimientos difieren en algunos aspectos, presentan un flujo de operaciones congruente que se indica a continuación:

Adquisición de los datos de partida

Se procede a la adquisición, normalización y filtrado de los datos obtenidos del barrido láser en bruto como parte del preprocesado de la información.

Clasificación de los puntos

La clasificación de los puntos puede realizarse manualmente o de manera automática, previa definición de las diferentes clases en las que se agruparán los puntos.

Obtención de los diferentes Modelos Digitales

Tras esta clasificación se puede obtener el Modelo Digital de Terreno (MDT) y el Modelo Digital de Superficie (MDS). En el MDT se distribuyen los puntos en dos grupos, suelo y no suelo, lo que nos da una malla que representa la superficie del terreno. En el MDS se distinguen diversas capas como son el suelo, diferentes niveles de vegetación o los edificios.

Modelado 3D

Con los puntos ya clasificados se puede generar de manera casi automática la reconstrucción 3D de los edificios acudiendo a técnicas de procesado geométrico.

Estos algoritmos permiten el mallado de las superficies en función del análisis complejo de relaciones de incidencia entre los puntos. Para el tratamiento de los datos LiDAR se recurre a un desarrollo propio elaborado con el lenguaje de programación Processing, y utilizando las herramientas gratuitas del kit LAStools disponibles en la web.

PROBLEMAS

En general, los procedimientos empleados en el reconocimiento de superficies a partir de datos LiDAR presentan dificultades de diverso orden, debido a la propia naturaleza de la fuente empleada y de la propia complejidad del proceso de reconstrucción geométrica. De forma sintética, los problemas detectados son los siguientes:

Discretización de los datos de partida

Debido a la gran densidad de puntos que se obtienen en los barridos LiDAR, los procesos de filtrado de los puntos y su identificación en capas resulta complejo. La validez de la reconstrucción y el riesgo de exclusión de geometrías ocluidas son sus principales consecuencias.

Obtención del mallado geométrico

Por las razones antes expuestas, los algoritmos de triangulación convencionales presentan

dificultades a la hora de obtener un mallado regular, con las implicaciones que esto tiene en la calidad del modelo final (distorsiones, geometrías mal reconocidas, etc.)

Calidad de la representación final

No existe un criterio unificado para asignar a cada una de las caras del modelo obtenido unos metadatos identificativos únicos, lo que añade una dificultad de segmentación a la hora del proceso del texturizado de dichas superficies. Esto lleva implícito un fuerte impacto sobre la verosimilitud del modelo tridimensional reconstruido, ya que solo es posible garantizar una visualización aceptable con representaciones simplificadas basadas en segmentación de color, por lo tanto la comprensión del modelo queda seriamente en entredicho.

HACIA UN MAYOR GRADO DE COMPRENSIÓN DEL MODELO

En este trabajo se plantean, dentro de la gran complejidad que presentan los problemas anteriormente citados, un conjunto de soluciones para reducir el grado de incertidumbre en la calidad final de la visualización del modelo tridimensional obtenido. Las líneas de trabajo en las que se ha profundizado son las siguientes:

Empleo de diversas fuentes de datos

La combinación de imágenes aéreas y tecnología LiDAR, permite obtener mejores resultados en cuanto a la precisión y nivel de detalle de las reconstrucciones de las ciudades en 3D. Las técnicas fotogramétricas son potentes en la interpretación visual del área, mediciones de contornos y pequeños detalles, mientras el láser muestra su potencial en las alturas, planos de cubierta y cumbreras. A su vez, la combinación de éstas con la información procedente de la cartografía municipal reduce los tiempos y el grado de incertidumbre a la hora del procesado.
De ese modo, se mantienen las ventajas de la adición de imágenes al procesado, añadiendo una fuente de información no grafica que permiten mejorar la segmentación. En este trabajo se utiliza cartografía municipal 1:500 cedida gentilmente por el excelentísimo ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. También se utilizan datos LiDAR y ortofotomapas obtenidas en un vuelo sobre las provincias de Álava y Bizkaia.

Visualización del Mod. Geométrico Escalable

La mayor parte de los algoritmos de mallado utilizados en el proceso de reconstrucción generan redes de triangulación irregular (TIN), recurriendo a estructuraciones de datos de naturaleza muy diversa para almacenar la malla.

El empleo del estándar X3D, un formato abierto que permite representar en tiempo real objetos y escenas tridimensionales usando XML, proporciona no sólo un esquema de datos homogéneo y compartido por numerosas aplicaciones comerciales.

DESARROLLO DEL PROYECTO

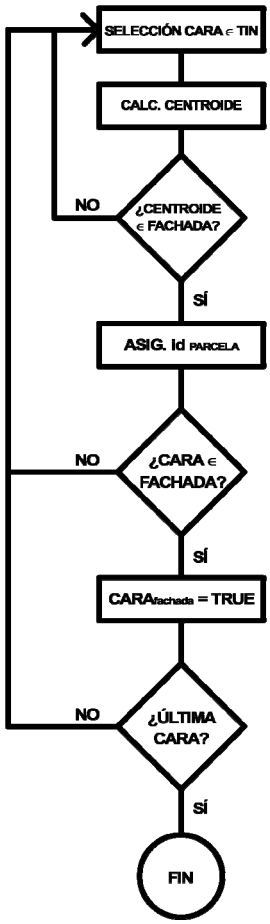


Figura 1: Algoritmo de segmentación

El primer paso consiste en la estructuración de la información disponible en una Base de Datos mediante la adquisición y normalización de los mismos en 3 capas: Ortofotomapas, LiDAR y Cartografía.

Los algoritmos desarrollados para esa fase permiten asignar para cada uno de los triángulos de la red TIN un conjunto de metadatos, entre los cuales se incluye el identificador de la parcela.

De esa manera es sencillo segmentar el

conjunto de triángulos sobre los que se llevará a cabo la texturización posterior.

El algoritmo recorre el conjunto de caras de la geometría, analizando para cada una de ellas si las coordenadas X e Y de su centroide están dentro de una determinada parcela.

Partiendo de un conjunto de imágenes de las fachadas principales de cada parcela, es posible, gracias a la segmentación efectuada en el paso anterior, implementar un algoritmo para automatizar el proceso de texturización sólo sobre los triángulos afectados de la TIN.

El algoritmo propuesto realiza un barrido por todas las caras de la red de triangulación irregular obtenidas del procesamiento con una herramienta de terceros como TerraScan. Una vez calculado el centroide de la cara seleccionada, se analiza su pertenencia a la parcela, asignando el identificador de la misma a las caras que cumplan esta condición.

El algoritmo comprueba a continuación la pertenencia de la cara analizada a la fachada principal de la parcela. Para ello, se calcula el vector normal de dicha fachada que actúa como término de comparación. Si la normal de la cara seleccionada coincide con la de la fachada, la cara pasa al conjunto segmentado.

VENTAJAS DEL X3D

X3D es un formato estándar abierto escrito sobre XML, con el que resulta sencillo editar el contenido del fichero(texto ASCII). Los nodos de la estructura jerárquica de X3D tienen la propiedad LOD, cosa que mejora mucho el rendimiento de las aplicaciones frente a cambios en la visualización del modelo. Permite evitar herramientas propietarias especificas que involucren costes posteriores, al poder implementarse en múltiples plataformas.

CONCLUSIONES

Una de las conclusiones principales de este estudio es que es posible mejorar la eficacia de la tecnología LiDAR con la integración de diversas fuentes de datos que complementen la información obtenida en los barridos láser. Dicha combinación de información permite un incremento en la precisión del modelo, disminuye el grado de incertidumbre, aumenta el nivel de realismo y deriva en una mejora de la visualización del modelo. En este caso, el uso de información catastral y de ortofotomapas georreferenciadas junto con los datos LiDAR facilita la comprensión del modelo y, a la hora de tratar los datos, simplifica el proceso de catalogación de los puntos pertenecientes a las parcelas que desean ser representadas.

Por otra parte, el uso de estándares X3D permite la gestión de la calidad de la malla geométrica de forma semiautomática, pudiendo obtener de manera interactiva y en tiempo real diferentes niveles de detalle en la visualización gracias a los distintos LOD. El hecho de que sea un estándar abierto que trabaja perfectamente con documentos XML, abre la puerta a diferentes entornos de visualización.



Figura 2: Visualización de resultados

BIBLIOGRAFÍA

ESPIÑO, R.,2010. *Generación automatizada y semiautomatizada de modelos tridimensionales urbanos.*

MALAMBO, L.M., HAHN, M., 2010. *LiDAR Assited CityGML Creation.*

LIN, H., JING, H.T., ZHANG, L.P., 2008. *Fast reconstruction of three dimensional city model based on airbone lidar*.

VISINTINI, D., GUERRA, F., ADAMI, A.; VERNIER, P., 2007. *A 3D Virtual model of the Gorizia downtown by matching historical maps with aerial and terrestrial surveying techniques*. e-Perimetron, Vol. 2, No. 3, ISSN 1790-3769.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se ha llevado a cabo en colaboración con la empresa Seresco S.A, dentro del proyecto "**Modelización tridimensional automatizada de entornos urbanos"**, financiado por el Principado de Asturias en la convocatoria pública de ayudas a empresas para la ejecución de proyectos de i+d+i durante el período 2009-2012 con la referencia "ie09-085".

Control Geométrico de un nuevo prototipo de colector solar cilindro-parabólico en la fase de pre-montaje mediante fotogrametría convergente

Silverio García Cortés[1], Antonio Bello García[2] y Celestino Ordóñez Galán[1]

[1] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. Asturias, España. sgcortes@uniovi.es

[2] Dpto. Construcción e Ing. Fabricación, Universidad de Oviedo / Gijón, España.

RESUMEN

En la fase de producción y pre-montaje de los prototipos de colectores solares cilindro parabólicos, es necesario garantizar su fidelidad geométrica a la superficie de diseño. El nivel de ajuste de su geometría a dicha superficie, determina su eficiencia óptica energética y se cuantifica mediante el coeficiente intercepción. Los defectos de montaje se traducen en una variación de la pendiente de la superficie real del espejo con respecto a la teórica, lo que producirá una desviación de los rayos solares reflejados con respecto a la línea focal del cilindro. Si la magnitud de la desviación transversal supera el diámetro del tubo absorbedor, el rayo no incidirá sobre él perdiéndose eficacia energética. El objeto del control geométrico debe ser por tanto la determinación de las normales a la superficie real de los espejos, para lo cual se necesita una nube densa de puntos sobre la misma. Dicha nube de puntos se determina en este trabajo mediante fotogrametría convergente. Adicionalmente, la tubería absorbedora que debe recoger la radiación solar sobre la línea focal no se monta hasta su instalación definitiva en el campo solar, de modo que en esta fase de pre-montaje en planta está ausente del módulo, siendo imposible señalizar su situación. Para evitar el empleo de equipos que materialicen esta línea, se propone un método matemático que orienta la nube de puntos y simultáneamente proporciona las desviaciones de la superficie ajustada con respecto a la superficie de diseño. Posteriormente se determina, el coeficiente de intercepción con el colector en posiciones vertical y horizontal.

Palabras clave: fotogrametría de objeto cercano, colector solar cilindro parabólico, coeficiente de intercepción

ABSTRACT

When a new design for a solar trough is developed it is necessary to guarantee that interception coefficient is good enough to produce the expected thermic jump. This coefficient is directly related with the fidelity of the trough geometry with respect to the parabolic cylinder design shape. In this paper the measurement of this shape using convergent photogrammetry with off the shelf equipment and the determination of this coefficient is showed. The obtained 3D point data cloud must be oriented in the space to allow for the determination of surface normal in any point and compared with the ideal cylinder parabolic shape. With the mathematical adjustment proposed in this paper these two are performed simultaneously. After that, reflected rays intersection with the focal length pipe can then be determined allowing for the geometric interception coefficient computation. The full process is described in detail and a real case of this measurement and analysis over a new prototype of parabolic cylinder solar trough is also presented.

Keywords: *close range phtotogrammetry; parabolic trough collector, interception coefficient*

INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica mediante campos solares, está comenzando a desarrollarse intensamente tanto en Europa como en USA. En este proceso se emplean lazos de colectores solares cilindro-parabólicos, cuya longitud es de unos 600 m, que a su vez están compuestos de elementos menores (de 150 m) divididos en componentes de 12m que se denominan colectores cilindro-parabólicos. Estos colectores, dotados de seguimiento solar, transforman la energía radiante del sol en energía térmica recogida por un aceite, que circula por una tubería dispuesta sobre la línea focal de cilindro parabólico. Los colectores cilindro parabólicos, están compuestos de un número de espejos elementales (28 habitualmente) de grandes dimensiones (155 cm x

170 cm) que deben conformar una superficie cilindro-parabólica lo más perfecta posible. De dicha geometría dependerá la eficacia del salto térmico en el fluido que circula por la tubería absorbedora. La temperatura que alcanza dicho fluido (aceite en general) al final del campo solar es del orden de unos 400ºC. Dicha energía térmica se transfiere al agua en un intercambiador de calor que acciona una turbina clásica de vapor.

Gran parte de la eficiencia del proceso depende del grado de ajuste de la geometría del conjunto de espejos del colector, a la geometría parabólica. Si esto ocurre, se garantiza que los rayos solares que inciden en el colector son reflejados sobre la tubería dispuesta en el plano focal. Los errores en el montaje y alienación de los espejos con respecto al cilindro influyen muy intensamente en la eficacia de la producción eléctrica. El grado de ajuste de la forma del colector a esta superficie teórica ideal se mide mediante el coeficiente de intercepción. El cálculo de este coeficiente para cada colector requiere la medida de la geometría real del conjunto de espejos una vez concluida la fase de ensamblaje pero antes del montaje del mismo en el campo solar.

En los apartados que siguen se describen los trabajos de medida de las desviaciones de uno de estos colectores con respecto a la geometría teórica a través de métodos fotogramétricos. Estos trabajos se han agrupado en las siguientes etapas: señalización del colector, tomas fotográficas, cálculo de las coordenadas 3D de las señales, ajuste mínimo cuadrático y auto-orientación de un cilindro–parabólico a la nube de puntos obtenida, cálculo de las desviaciones entre la superficie real y teórica, modelado mediante mallado triangular de la superficie real y cálculo del coeficiente de intercepción. La medida con láser terrestre fue considerada pero presentaba problemas a causa de la precisión necesaria y la reflectividad de los espejos.

MEDIDA DEL COLECTOR SOLAR MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CONVERGENTE

Los procesos fotogramétricos se basan en el registro de puntos del objeto en varias imágenes tomadas desde distintas posiciones. Las posiciones en el espacio de estos puntos son reconstruidas posteriormente a partir de sus posiciones en los fotogramas (Luhmann,T.2006). Por esta razón, es necesario que la posición del punto pueda ser medida con la máxima precisión sobre los fotogramas. La superficie de los espejos presenta dificultades para su medida a causa de su comportamiento reflectante. Al carecer de puntos naturales destacables, se disponen unas dianas sobre la superficie del colector que puedan ser detectadas de modo automático (Ahn et al. 1999) durante el proceso. El procedimiento habitual consiste en adherir una lámina de vinilo adhesivo sobre la superficie, en la que están impresas unas dianas de tamaño y forma adecuados. El espaciamiento entre dianas y su tamaño depende de la distancia a la que se realicen las tomas fotográficas y de las capacidades de detección de las señales del software fotogramétrico empleado. En general, se recomiendan dianas de forma circular puesto que la detección automática del centro del círculo (que se convierte en una elipse a causa de la proyección perspectiva de la fotografía) es un proceso que se puede llevar a cabo de modo preciso mediante la técnica de correspondencia mínimo cuadrática (LSM). La disposición de las señales y su tamaño, en este caso, ha sido diseñada por la Plataforma Solar Almería

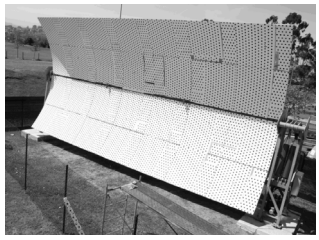


Figura 1: Colector cilindro-parabólico con vinilos de señalización adheridos en posición vertical.

La geometría de las tomas fotográficas será convergente con respecto al objeto y cada punto del objeto debe aparecer al menos en dos imágenes. La medida del colector se ha realizado en dos posiciones vertical y horizontal. En este caso al tratarse de un objeto grande (12 m de largo y 5.30 m de apertura) era necesario decidir la distancia media a la que se realizarían las tomas y el número de las mismas en función de la óptica disponible. La distancia media resultó ser de unos 8 metros para las 9 tomas del colector en posición vertical y un poco inferior (6 m aprox) en horizontal del colector a causa del límite en la altura que era posible alcanzar para realizar las tomas con los medios existentes. La cámara empleada ha sido una CANON EOS 1000D y la distancia principal de 28mm (equiv).

Los residuos sobre las imágenes están por debajo del pixel lo cual indica que no existen errores groseros apreciables. Además los valores de las precisiones relativas se encuentran por debajo de

1 mm (1 sigma). Las coordenadas obtenidas para los puntos anteriores están referidas a un sistema de ejes diferentes en ambos casos y son exportadas a ficheros de texto para ser procesadas.

Posición Colector	Vertical	Horizontal
Núm. dianas medidas	7136	6900
So (a posteriori)	0.663	0.531
Max. Residuo	1.07 píx	1.023 píx
e.m.c global ajuste	0.078 píx	0.061 píx
Precisiones puntos		
Long. máx. vector residuo	0.64 mm	0.54 mm
Max. Sx	0.434 mm	0.22 mm
Max. Sy	0.275 mm	0.39 mm
Max.Sz	0.544 mm	0.36 mm

Tabla 1: Calidad de los ajustes fotogramétricos.

AJUSTE DE LOS PUNTOS OBTENIDOS A UN CILINDRO PARABÓLICO

Es necesario ahora comprobar el grado de discrepancia de los puntos obtenidos con las posiciones correspondientes en una superficie cilindro-parabólica ideal. Este problema cuenta con la dificultad de que se desconoce la situación y orientación exacta del sistema de ejes (han sido situados solamente de modo aproximado) y por tanto es imposible el cálculo de las coordenadas teóricas que corresponderían a cada punto según la ecuación básica (Ecuación. 1):

$$z = \frac{y^2}{2p} \tag{1}$$

Para tener en cuenta el desalineamiento y la traslación entre los sistemas de referencia real y teórico incluimos una transformación de coordenadas en el espacio, con sus parámetros como incógnitas. De este modo se permite durante el ajuste que la nube de puntos del colector gire en el espacio a través de la matriz de rotación y se traslade para ajustarse a la superficie cilindro-parabólica ideal (no se permite un cambio de escala). La formulación matemática del modelo anterior se apoya en la definición geométrica de parábola. Cualquier punto del cilindro parabólico debe cumplir que su distancia a la línea focal ρ_1 y al plano generatriz ρ_2 sean iguales.

$$\left.\begin{aligned} F \equiv \rho_1 - \rho_2 = \sqrt{y^2 + \left(z + \frac{p}{2}\right)^2} - \left(z + \frac{p}{2}\right) = 0 \\ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

No obstante este modelo está aún incompleto. La posición de la nube de puntos en relación al eje x del colector es arbitraria. Se impone como cero la traslación en X. Cada punto genera una nueva ecuación mientras que las incógnitas se reducen a siete (ω, φ, κ, Tx, Ty, Tz, p). Los resultados obtenidos para el ajuste de los puntos del colector en las dos posiciones se resumen en la tabla 2.

Posición Colector	Vertical	Horizontal
Núm. iteraciones	6	6
Omega (deg)	-1.8219	0.1307
Phi (deg)	0.2730	0.0147
Kappa (deg)	-0.3996	0.1983
Tx (mm)	0	0
Ty (mm)	1.641	-38.5787
Tz (mm)	-9.0905	-2.0291
e.m.c ajuste (mm)	7.2961	5.8865
Max. Resid. (mm)	19.13	10.7024

Tabla 2: Parámetros del ajuste de las nubes de puntos a la superficie de diseño y medidas de error globales.

Los residuos no están asociados a ninguna coordenada, sino que se trata de las diferencias entre las distancias ρ_1 y ρ_2. Esto representa una dificultad puesto que se necesitan los residuos en la coordenada Z para conocer las desviaciones de la nube de puntos con respecto a la superficie ideal con el fin de corregir las desviaciones encontradas, mediante el accionamiento de los tornillos de sujeción a los soportes cerámicos de que están dotados los espejos. Se calculan entonces nuevos valores para las coordenadas de todos los puntos aplicando la traslación y rotación 3D que acaba de obtenerse y estas nuevas coordenadas X e Y se emplean para el cálculo de la Z ideal mediante la ecuación (1). Una vez conocida la geometría del conjunto de puntos sobre el colector es necesario calcular las normales al mismo para poder estudiar la reflexión de los rayos (Lüpfert, et al 2007). Se calculan entonces los valores de las normales para los baricentros de cada triángulo de la malla. La dirección de esta normal se emplea para el cálculo de los rayos reflejados sobre el colector, cuando inciden los rayos solares desde una dirección paralela al plano de simetría longitudinal del colector.

En la práctica las desviaciones de la geometría del colector impiden que esto sea así. El coeficiente de intercepción mide el tanto por ciento de rayos que interceptan el tubo absorbedor (Kreith et al. 2007). En este cálculo es necesario tener en cuenta que el tubo absorbedor tendrá un diámetro finito (11cm en este caso) y que la distancia de las distintas zonas del colector a dicho tubo es variable

DESVIACIONES DE LA GEOMETRÍA TEÓRICA EN LAS DOS POSICIONES

Las diferencias entre la geometría del colector real con respecto a la superficie cilindro-parabólica pueden verse en la figura 2.

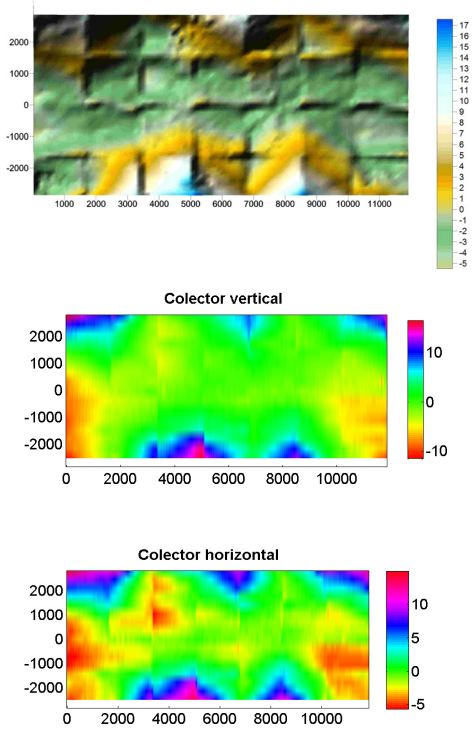


Figura 2: Diferencia en coordenada Z en mm con respecto a la sup. teórica. (a) Colector horizontal con discontinuidades entre espejos. (b) Colector vertical. (c) Colector horizontal.

En las separaciones transversales entre los espejos.se acumulan las mayores desviaciones en Z. Cada espejo está sujeto a la estructura base mediante unos soportes regulables con unos tornillos (Lüpfert,.et al 2001). Dado que la posición respecto a los bordes del espejo de estos apoyos es conocida es posible interpolar los valores de las desviaciones en z y calcular los movimientos a aplicar para compensar esas diferencias. La mayor superficie de colector desviada que aparece en la posición horizontal tiene su justificación en el efecto de la gravedad sobre el colector en esa posición. El efecto del peso propio tiende a deformar la geometría del mismo en especial en los bordes. Puede apreciarse también, como existen varios espejos en los perfiles inferior y superior que aparecen claramente desalineados. El coeficiente de intercepción se calcula finalmente obteniéndose un valor de 90.7% para la posición vertical y de 92,02% para la posición horizontal. Diferencia que no se considera significativa.

CONCLUSIONES

Se han identificado los espejos que presentan errores de montaje con respecto a la geometría cilindro-parabólica del colector solar. La medida del colector en las dos posiciones, vertical y horizontal aporta mayor información sobre las discrepancias con la forma teórica, permitiendo estimar con mayor fundamento, qué defectos se deben a errores de montaje y cuáles a deformaciones de la estructura. El valor del coeficiente de intercepción no varía sensiblemente entre ambas posiciones, indicando una deseable rigidez de la estructura portante. Se estima que este parámetro mejorará con la corrección de aquellos espejos identificados con problemas de ensamblaje. El empleo del modelo matemático propuesto, ha permitido evitar la necesidad de la materialización de los ejes y ha suministrado una autoorientación de las nubes de puntos, permitiendo el cálculo del coeficiente de intercepción.

BIBLIOGRAFÍA

AHN, S.J., W. RAUH, AND M. RECKNAGEL.1999. *Circular Coded Landmark for Optical 3D-Measurement and Robot Vision.* Interntional Conf. on Intelligent Robots & Systems.

KREITH, F. AND D.Y. GOSWAMI, 2007 *Handbook of energy efficiency and renewable energy. Mechanical engineering series*. Boca Raton: CRC Press

LUHMANN, T.,2006. *Close range photogrammetry: principles, methods and applications*. Dunbeath: Whittles 510 p

LÜPFERT, E., ET AL. 2007, *Parabolic Trough Optical Performance Analysis Techniques*. Journal of Solar Energy Engineering, 129(2): p. 147-152

LÜPFERT, E., ET AL.2001, *Eurotrough design issues and prototype testing at PSA*, in ASME Solar Energy: The Power to Choose. Washington, DC

Cambios de ocupación del suelo en el área de Barcelona (1988-2004)

J. Jorge, A. Reyes y R. Tarruella

EPSEM. Departamento de Física Aplicada. Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Bases de Manresa, 61-73. 08242 Manresa (Barcelona, España). Correo electrónico: joan.jorge@upc.edu

RESUMEN

En esta comunicación se presenta un proceso de clasificación multispectral basado en el uso de segmentos, como unidades de cambio/no cambio, aplicado a una zona de 30.4 x 42.7 km centrada en el río Llobregat en su tramo final, que incluye el área metropolitana de Barcelona, con enclaves por todos conocido que han experimentado cambios (la zona olímpica, la zona del fórum, el aeropuerto y el puerto), con un intervalo de tiempo bastante amplio de 16 años (1988-2004). Los resultados obtenidos, considerando un umbral +/- la desviación estándar para el vector de cambios que se define, muestran un 98% de acierto en la detección de segmentos con cambio y un 97% en la medida de las superficies que cambian.

Palabras clave: vector de cambios, territorio, Barcelona.

ABSTRACT

This communication shows a multispectral classification process based on image segmentation, to detect zones with a temporal change/no change, along the time interval 1988-2004. The study area (30.4x42.7 km) is centered over the last section of the Llobregat river (near the delta) and includes the Barcelona metropolitan area and its main facilities (the Olympic area, the Forum zone, the airport and the harbor). Using a threshold for a new proposed change vector, the applied method identifies the 98% of changed segments and the 97% of changed surface.

Keywords: *change vector, territory, Barcelona.*

INTRODUCCIÓN

El seguimiento de la ocupación del territorio sigue siendo un tópico en las aplicaciones de la teledetección, sobre todo en aquellas regiones donde se producen constantes cambios en los usos del suelo, y en consecuencia en el tipo de cubierta (Xian et al., 2009). La definición, identificación y cuantificación de los cambios estructurales en el territorio son, por lo tanto, susceptibles de ser tratados a diferentes escalas mediante imágenes de satélite (Carlson, 2010).

Ahora bien, muchas de las metodologías empleadas tienen ámbitos de aplicación restringidos a áreas geográficas concretas. No hay apenas metodologías fácilmente aplicables a áreas metropolitanas con las características de las ciudades mediterráneas, ya que en ellas se tiene una alta fragmentación del paisaje. La variabilidad orográfica y geomorfológica, la escasez de grandes masas forestales y la proximidad al mar, así como muchos siglos de actividad antrópica, han ido modelando este paisaje. Los fuertes cambios socio-económicos de las últimas décadas han producido, además, un cambio en las actividades agrícolas e industriales, junto a la presencia de nuevas infraestructuras y la expansión de las zonas urbanas, cambios que quedan reflejados en los usos del suelo y que han llevado a la compleja cobertura actual.

DATOS DE PARTIDA

La zona de estudio se haya encuadrada entre la esquina superior izquierda de coordenadas 41º 28'44"N, 1º15'47"E, y la esquina inferior derecha 41º15'47"N, 2º16'57"E; corresponde a una área de 30.4 x 42.7 km aproximadamente, e incluye el área metropolitana de Barcelona y algunos municipios adyacentes.

Para este trabajo se han utilizado las bandas VIS-IR de dos imágenes Landsat-5 TM (197-031) registradas en agosto de 1988 y junio de 2004, y los datos verdad-terreno se han considerado a partir de una antigua clasificación de usos del suelo, de fotografías digitales en color 1:5000 y de mapas topográficos 1:50000, todos ellos elaborados por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).

La imagen del 2004 ya había sido rectificada y geo-referenciada a la proyección cartográfica UTM (Zona 31) por el proveedor, por lo que esta imagen se ha empleado como escenario de referencia. La imagen del 1988 se ha ajustado a la de referencia mediante un polinomio de segundo grado a partir de 81 puntos de control, con un error cuadrático medio (RMSE) de 1.0743 m.

METODOLOGÍA Y VALIDACIÓN

La metodología utilizada para la detección de cambios se basa en la segmentación de las imágenes y el análisis posterior de los polígonos extraídos en base a sus diferentes atributos (Pineda et al., 2001).

Segmentación

El algoritmo de segmentación considera cada píxel una región diferente y se funde iterativamente con píxeles de características similares en varios pasos, utilizando como criterios de terminación la relación señal a ruido ente la imagen original y la imagen de facetas y también el número total de facetas de la imagen. El algoritmo se ejecuta sobre la imagen CP2 de 2004, y se obtiene una nueva imagen segmentada con 20.000 unidades poligonales que cubren la totalidad de la imagen. El proceso genera el contorno de estas regiones como un vector objeto listos para ser usados en cualquier SIG estándar.

Corrección de las imágenes

Se procedió a la normalización radiométrica de la imagen del 1988 a la que se le aplicaron cuatro metodologías diferentes basadas en la obtención de una recta de regresión a partir de un diagrama de dispersión 2D, pero difiriendo en el protocolo de obtención de los parámetros fundamentales de la recta (Estornell et al., 2004).

La selección de la metodología que producía mejores resultados se estableció a partir de tres parámetros estadísticos que comparan los valores de los píxeles en la imagen normalizada y en la imagen de referencia que en este caso era la de 2004. Estos estadísticos fueron:

- MSE ("mean square error"):

$$MSE = \frac{\sum (X_k - Y_k)^2}{|NC_{set}|}$$

- Rango Dinámico de la banda normalizada ("max value - min value")
- Coeficiente de variación (CV), cociente entre la media y la desviación estándar de los valores de la banda normalizada.

Cuanto más bajo es el valor de MSE mejor es el ajuste realizado. En caso de valores similares de MSE se considera como mejor la que presenta el rango dinámico mayor y también mayores valores de CV.

A partir de los valores obtenidos se decidió utilizar el método consistente en seleccionar un conjunto de píxeles considerados invariantes, de la zona central del diagrama de dispersión. Se calculan los valores medios y las desviaciones típicas de los valores de este conjunto de píxeles para obtener los coeficientes de la recta de normalización y = a*x + b, donde a=Sy/Sx , b=Ym-a*Xm y Sx, Sy son las desviaciones estándar de x, y (Agosto 1988 y Junio 2004, respectivamente), y Xm, Ym representan los valores medios.

Como innovación metodológica se aplicó el proceso de normalización que mejores resultados produjo, pero empleando como unidad de trabajo los 20.000 polígonos de segmentación, es decir, en lugar de trabajar con los píxeles de las imágenes de cada banda y por cada fecha, se segmentaron todas las bandas de cada imagen y, a partir del valor asignado a cada polígono de segmentación, se procede a normalizar las bandas de 1988 obteniéndose resultados mejorados tal como muestra la tabla 1.

Banda	Unidad base	MSE	Rango	VC
TM1	píxel	3.0673	254	4.2298
	objecto	0.7026	141	4.9123
TM2	píxel	1.2072	138	2.6405
	objecto	0.2334	87	2.7139
TM3	píxel	1.2768	238	1.7630
	objecto	0.7615	100	2.0435
TM4	píxel	3.0623	193	1.6970
	objecto	1.0346	133	1.7611
TM5	píxel	1.6951	254	1.4375
	objecto	0.9885	244	1.5257
TM7	píxel	1.1597	254	1.3214
	objecto	0.3371	149	1.4095

Tabla 1: Estadísticos correspondientes a todos los métodos de normalización.

Extracción de los índices de trabajo

Para cada uno de los segmentos se procedió a determinar las diferencias temporales en los índices de vegetación NDVI y SAVI; las tres componentes Tasseled-Cap (Brightness, Greenness y Wetness) y dos índices geológicos TM5/TM4 y TM5/TM7. A continuación se diseñó un nuevo vector de cambios (VC) basado en las diferencias del SAVI y de las tres componentes T-C en la forma:

$$VC = \sqrt{(\Delta B)^2 + (\Delta G)^2 + (\Delta T)^2 + 1000 \cdot (\Delta SAVI)^2}$$

Estudio de las clasificaciones automáticas

Otra ventaja de trabajar con objetos de segmentación poligonales es que una vez obtenidas las diferencias en cada parámetro se pueden introducir en un SIG, como se ha dicho antes, y proceder a obtener clasificaciones automáticas. En este caso, se realizaron cuatro clasificaciones automáticas con los parámetros que aportaban más información. Las áreas de mayor cambio y algunos tipos de cambio específicos se pudieron determinar directamente a partir de estas clasificaciones.

1. *Clasificación basada en las diferencias en el índice de vegetación NDVI* (figura 1). Se pone de manifiesto que las mayores pérdidas en la cubierta vegetal se han producido en toda la zona del río Llobregat, incluyendo un cambio en la desembocadura, la ampliación del aeropuerto de El Prat y las nuevas zonas industriales y urbanas cercanas a Barcelona y algunos municipios del Baix Llobregat. Estos cambios corresponden a pérdidas en el índice NDVI comprendidas entre -0.68 y -0.26. Los cambios en el interior de zonas urbanas y las nuevas infraestructuras costeras presentan valores entre -0.26 y -0.095. Finalmente parques urbanos nuevos como los de la zona olímpica de Montjuïc y algunos cambios fenológicos con incremento de vegetación presentan aumentos de NDVI entre 0.124 y 0.49. En gris aparecen las zonas de no cambio.

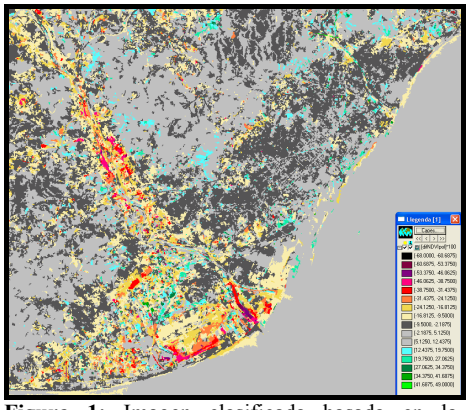


Figura 1: Imagen clasificada basada en la diferencia de NDVI.

2. *Clasificación automática basada en la diferencia de la componente Brightness* (figura 2). En esta clasificación las zonas con mucha edificación nueva, la desembocadura actual del Llobregat, las construcciones olímpicas en Montjuïc, los cambios en la Barceloneta y la Zona del Foro presentan diferencias superiores a -22. Construcciones sobre el mar y sobre algunas zonas húmedas en la zona del aeropuerto presentan aumentos superiores a 43. Con valores entre 11 y 42 y tonos amarillos se aprecian cambios en las cubiertas y pavimentaciones de áreas industriales y urbanas.

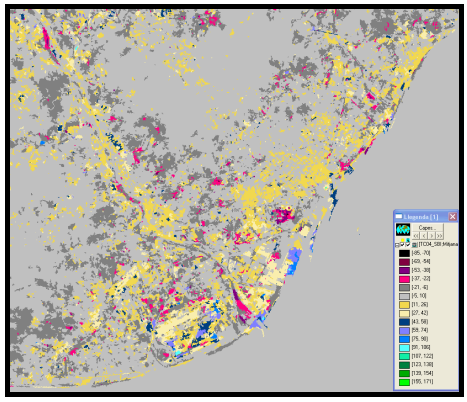


Figura 2: Imagen clasificada basada en la diferencia de Brigthness.

3. *Clasificación realizada con los valores del Vector de Cambios*. Las áreas de cambio se detectan con valores superiores a 28.1250. Estos cambios se localizan fácilmente superponiendo otras capas de información SIG como vías de comunicación, perímetros municipales, etc.

4. *Clasificación basada en un árbol de decisión* (figura 3). Con la información de los parámetros cambio de NDVI y los valores del vector cambio se realizó una cuarta clasificación basada en un árbol de decisión consiguiéndose hacer una primera separación en diferentes tipos de cambio. Los segmentos con valores de Vector Cambio igual ó superior a la mediana y que presentaban pérdidas en NDVI aparecen en la clase1 (rojo). Esta es la clase más importante e incluye las nuevas áreas construidas (urbanas e industriales) así como nuevas carreteras. La clase2 (verde) corresponde a polígonos con valores del vector cambio iguales o superiores a la mediana y con aumento de NDVI, aparecen algunos cambios fenológicos, nuevas áreas verdes urbanas y las nuevas infraestructuras construidas sobre el mar. Los polígonos con

valores del vector cambios inferiores a la mediana son clasificados como no-cambio (grises en la figura).

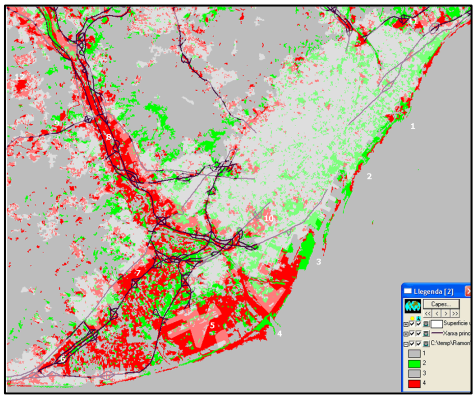


Figura 3: Clasificación obtenida mediante árbol de decisión.

Verificación de resultados en la discriminación de los polígonos que presentan cambios

Para verificar los resultados se procedió a identificar un conjunto de 2.816 polígonos de segmentación escogidos al azar para utilizarlos como verdad-terreno. La identificación se realizó visualmente a partir de una composición RGB de cada fecha, fotografías digitales 1:5000, antiguas clasificaciones y mapas topográficos del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC). Posteriormente se estableció para cada clasificación un parámetro adecuado para discriminar los polígonos como cambio o no cambio, y se estudiaron los resultados para la diferencia de NDVI y para la diferencia de Brightness correspondientes al valor medio +/-media desviación típica, y los valores dentro o fuera del intervalo formado por primer y tercer cuartil. Para el vector de cambios los valores escogidos fueron la media menos media desviación típica y el valor de la mediana. La verificación numérica de la asignación de cambio o no cambio para los polígonos identificados se recoge en la tabla 2.

Método Umbral	Cambios detectados	Área de cambios detectados
Dif NDVI100 1_3Q	83.78	79.94
Dif NDVI100 mean ±0.5σ	81.11	76.73
Difbrightness	87.79	84.67
CV mean-0.5σ	98.47	97.34
CV median	95.99	95.27

Tabla 2: Verificación numérica de los resultados obtenidos en porcentajes

CONCLUSIONES

En este trabajo se han conseguido una serie de mejoras para el análisis de detección de cambios tradicionales en zonas metropolitanas:

- mediante el uso de segmentos como unidades de normalización radiométrica, obteniéndose buenos resultados;
- utilizando una amplia gama de índices de fácil extracción a partir de los valores de las bandas TM, y una propuesta de vector de cambios;
- trabajando con objetos y no píxeles como unidades a clasificar, ofreciendo la ventaja de un método de clasificación automática basado en la categorización de las distintas características calculadas utilizando un software SIG.

Este estudio ha demostrado la eficacia de la detección de las áreas de cambio utilizando un vector de cambios sobre la base de unidades segmentadas y proporcionando el primer paso para estudios de cambios concretos en las cubiertas.

A nivel socio-económico, el estudio ha permitido corroborar los cambios en las principales infraestructuras de Barcelona, puerto y aeropuerto, así como visualizar y cuantificar los cambios sufridos en el área de estudio, disminuyendo el uso agrícola a expensas de un incremento del uso industrial.

BIBLIOGRAFÍA

CARLSON, T., 2010. *Applications of remote sensing to urban problems*. Remote Sensing of Environment, 86, 3, 273-274.

ESTORNELL, J., RUIZ, L.A., PEREZ, P. y DEL REY, A., 2004. *Análisis metodológico para la detección de cambios urbanos en la ciudad de Valencia*. Revista de teledetección, 22, 55-66.

PINEDA, N., JORGE, J., GARRIDO, L. & SALEMBIER, P., 2001. *Estudios de campos de golf mediante técnicas de segmentación*. Revista de Teledetección, 16, 41-46.

XIAN, G., HOMER, C. & FRY, J., 2009. *Updating the 2001 National Land Cover Database land cover classification to 2006 by using Landsat imagery change detection methods*. Remote Sensing of Environment, 113, 6, 1133-1147.

Desarrollo de un SIG para la vigilancia ambiental de ríos situados en áreas urbanas

C. Ordóñez[1, 2], M.R. Varela[2], E. Covián[1] y S. García-Cortés[1]

[1] Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: ordonezcelestino@uniovi.es

[2] Dpto. de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad de Vigo. Campus Lagoas-Marcosende. Rúa Maxwell s/n. 36310 Vigo (Pontevedra, España).

RESUMEN

Los ríos situados en áreas urbanas influyen de manera esencial en la calidad de vida de sus habitantes, por lo que es primordial mantenerlos en el mejor estado posible. Sin embargo, los ríos urbanos están a menudo sometidos a importantes agresiones ambientales que es necesario reducir a través de programas de vigilancia ambiental. En general estos programas no son efectivos porque no se dispone de una herramienta que permita integrar y gestionar toda la información relativa a aspectos que afectan al río. En este trabajo se presenta una aplicación informática desarrollada sobre el programa gvSIG 1.9, ideada para que los servicios municipales tengan acceso a datos espaciales y alfanuméricos que son necesarios para el control y vigilancia del estado de los ríos, y dotada de funciones de análisis específicas para tal cometido. Tiene una estructura cliente-servidor para que los usuarios accedan desde sus puestos a bases de datos externas situadas en uno o más servidores, de manera que no se genere información redundante ni se modifiquen, excepto con los permisos adecuados, los datos almacenados en esas bases de datos.
Con esta aplicación se pueden realizar acciones propias de cualquier sistema de información geográfica, como visualizar mapas e imágenes, superponer capas, realizar consultas espaciales y temáticas, etc., pero también otras desarrolladas ex profeso para el control y vigilancia ambiental de los ríos urbanos, como determinar las empresas que están aguas arriba de un vertido y detectar, en base a la información relativa a su actividad y/o a denuncias anteriores por vertidos, aquella que con mayor probabilidad lo ha producido.

Palabras clave: SIG, vigilancia ambiental, ríos urbanos, bases de datos.

ABSTRACT

Rivers in urban areas have an essential influence on the quality of life of its inhabitants, so it is important to keep them in top condition. However, urban rivers are often subject to major environmental stresses that must be reduced through environmental monitoring programs. In general, these programs are ineffective because they do not have a tool to integrate and manage all information concerning issues that affect the river. This paper presents an application developed over the gvSIG 1.9 software, designed for municipal services to have access to spatial and alphanumeric data that are necessary for controlling and monitoring the state of rivers, and endowed with specific analysis functions for this task. It has a client-server structure for users accessing from their computers to external databases located in one or more servers, so that no redundant information is generated or modified, except with the appropriate permissions.
With this application it is possible to perform normal operations in any Geographic Information System, such as displaying maps and images, overlaying layers, doing spatial and thematic queries, etc., But also other actions developed expressly for the control and environmental monitoring of urban rivers, such as identifying companies that are upstream of a spill and to detect, based on information concerning its business and / or previous complaints by dumping, the company that most likely produced the spill.

Keywords: *GIS, environmental surveillance, urban rivers, databases.*

INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental de los ríos urbanos es uno de los retos ambientales más importantes para las administraciones locales. El objetivo de éstas es que los ríos y su entorno constituyan un

espacio natural para disfrute de todos los habitantes de las ciudades. Conseguir que las aguas de los ríos tengan una calidad aceptable no es fácil en ningún caso, pero menos aún en los ríos urbanos, que por su localización están sometidos a mayores agresiones ambientales que aquellos que no transcurren por núcleos de población (Gao y Wu, 2010; Zeilhofer et al., 2010).

Son muchos los factores que hay que tener en cuenta para llevar a cabo una gestión ambiental adecuada de los ríos urbanos. La calidad de las aguas es uno de ellos, pero hay muchos otros, relacionados con el río y su entorno, que deben ser tenidos en cuenta, como el cuidado de los márgenes, la flora y la fauna, las áreas recreativas, los paseos fluviales, la iluminación, las instalaciones de depuración, el control de los vertidos, etc. (Morra, et al. 2009). Manejar toda la información asociada a estos factores es una tarea complicada, y en muchos casos no se hace de manera adecuada, teniendo en cuenta las relaciones entre los diferentes factores. Uno de los principales problemas es que no se hace uso de las tecnologías de la información que existen actualmente, bien por desconocimiento o por falta de tiempo y/o presupuesto (Arctur y Zeiler, 2004). En este trabajo se explica cómo se pueden utilizar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mejorar la vigilancia y gestión ambiental de los ríos que discurren por los núcleos de población. Para ilustrarlo se muestran los aspectos más relevantes de un SIG desarrollado para la vigilancia y gestión ambiental de un río que transcurre por una ciudad del norte de España debido a la extensión, frecuencia e intensidad alcanzada en los últimos años. Estos incendios tienen notables repercusiones sobre los ecosistemas, la biodiversidad, la gestión duradera de los recursos forestales y las economías locales y nacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y construcción de la base de datos

Un aspecto esencial en cualquier proyecto de desarrollo de un SIG es el diseño y la construcción de la base de datos (DeMers, 2008). El éxito o fracaso del proyecto depende en gran medida de cómo se lleve a cabo esta fase. Si la base de datos no está bien diseñada o no contiene la información necesaria, es muy posible que el proyecto no llegue a alcanzar las expectativas iniciales y, en no pocos casos, que no llegue nunca a implantarse.

El primer paso es pues hacer un análisis de los datos de que se dispone y de los que se necesitan. Estos datos son fundamentalmente mapas y planos (componente espacial), y los datos asociados a los objetos cartográficos contenidos en esos planos. Ortofotos, ficheros de imágenes y documentos de texto suelen completar el conjunto de datos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Parte de la información de que se dispone está a menudo incompleta, por lo que se precisa una labor de edición cartográfica y de diseño y construcción de nuevas tablas. Otra parte simplemente no está disponible inicialmente, lo que conlleva un trabajo de búsqueda de la misma, en ocasiones bastante laboriosa. En última instancia, si esa información no existe o no es aprovechable, será necesario crearla. En el proyecto concreto a que nos referimos en este artículo, se han dado esas tres posibilidades. En el cómputo total del proyecto, llegar a tener todos los datos necesarios para construir la base de datos ha supuesto aproximadamente un 50% del tiempo total de trabajo.

En total se dispone de 27 capas vectoriales de datos geográficos con 36 tablas asociadas. Algunas de estas capas son editables y otras no. Buena parte de ellas almacenan toda la información en una sola tabla (tabla de atributos), pero otras utilizan varias tablas que se relacionan con la tabla de atributos (la tabla de atributos es la que está ligada a la capa de datos geográficos) y entre sí a través de un campo común. Las capas vectoriales que se almacenan en la base de datos son: río (como línea y como polígono), afluentes, cuencas hidrológicas, arroyos, flora, fauna, carteles publicitarios, puntos de muestreo, empresas situados en los márgenes del río, fuentes, puentes, molinos, parroquias, barrios, patrimonio, áreas de recreo, paseo fluvial, tanques de tormenta, puntos de muestreo, vertidos detectados, mobiliario urbano, instalaciones de depuración, red de desagüe, zona de influencia del río, carreteras y caminos adyacentes, iluminación y usos de suelo. A estas capas hay que añadirles fotografías tomadas sobre el terreno, fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Otra cuestión fundamental en relación con la base de datos es que parte de la información de que se dispone está en bases de datos diferentes, a las que los usuarios están acostumbrados, por lo que no desean que un nuevo proyecto les haga cambiar su forma de trabajar. Por este motivo es necesario construir un programa que permita acceder y trabajar con todas las bases de datos en las que se almacena toda la información. En el

caso particular del proyecto desarrollado por los autores, la base de datos principal es PostGIS (2001), pero además ha sido necesario conectarse a Informix, donde se almacena parte de la información relacionada con los expediente asociados al río.

En la figura 1 se muestra una ventana que se utiliza para conectarse a bases de datos externas a través de JDBC. También permite acceder a la base de datos principal y establecer conexiones a un servidor WMS (web map service)

Se ha elegido PostGIS como base de datos principal por su capacidad para trabajar con información espacial y por ser libre y gratuita. Trabajar con software gratuito era una de las premisas del proyecto, pues se pretendía evitar pagar por licencias de uso y, especialmente, por las actualizaciones.

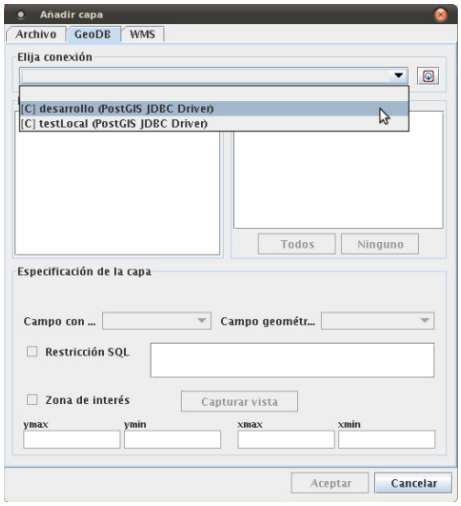


Figura 1: Ventana para la conexión del programa con bases de datos externas.

Implementación del SIG

Existen diferentes programas para trabajar con información geográfica, que constituyen una parte fundamental de los SIG (en ocasiones cuando se habla de SIG se refieren exclusivamente al software, aunque, siendo estrictos, el término SIG engloba también el hardware, los datos y los usuarios). Algunos de estos programas son comerciales, pero también existen soluciones gratuitas. En este proyecto hemos utilizado gvSIG 1.9 (2011), que es un programa promovido por la Generalitat de Valencia y que cuenta actualmente con un gran número de usuarios en todo el mundo especialmente en España y Latino América, aunque también en otros países de Europa e incluso de Asia. El código de gvSIG es de acceso libre, bajo licencia GNU (General Public License), lo que permite desarrollar aplicaciones y difundirlas sin coste alguno.

El programa se ha desarrollado en Java, utilizando Eclipse (2001) como entorno de desarrollo. El entorno gráfico de gvSIG 1.9 se ha modificado teniendo en cuenta la finalidad del proyecto. Lo que se pretende es que cuente con los menús imprescindibles para las funciones que debe tener, evitando sobrecargarlo con herramientas innecesarias que únicamente sirven para hacer una aplicación más compleja de manejar, y que, lejos de mejorar el resultado, produce a menudo un rechazo en los usuarios, que no tienen por qué ser personas diestras en informática.

gvSIG es un SIG de escritorio que debe instalarse en cada ordenador, pero el programa desarrollado tiene una estructura cliente-servidor que permite a los usuarios acceder a las diferentes bases de datos en que se encuentra la información (servicios de informática, medio ambiente y laboratorio). Existe un usuario con privilegios de administrador y un usuario común que puede visualizar la información, realizar consultas y análisis de tipo espacial, pero no puede editar las capas ni las tablas asociadas. Los resultados de sus trabajos puede guardarlos localmente en su disco duro.

Esencialmente el programa tiene las funciones de visualización de información geográfica usuales en un SIG, permite hacer consulta generales a cualquier tabla y algunas consultas específicas para las capas más importantes. También permite introducir información nueva en la capa de expedientes, asociada a incidentes localizados geográficamente por sus coordenadas UTM. Incorpora también funciones de geoprocesamiento típicas, como determinación de zonas de influencia alrededor de un objeto cartográfico, unión espacial y superposición de capas.

RESULTADOS

En la figura 2 se muestra la interface de usuario de la aplicación desarrollada. Se distingue una zona de influencia alrededor del río (color azul) superpuesta a una ortofoto. En la parte inferior izquierda está el localizador, que es una imagen a pequeña escala de toda la zona que sirve para ubicarse cuando en la vista se ha hecho

un zoom a escala grande. Sobre la vista se ha superpuesto un formulario para introducir datos de una de las capas, junto con la tabla de atributos de esa capa. Se han resaltado en amarillo los registros seleccionados tras una consulta que, en este caso, corresponde a la búsqueda de los registros correspondientes a una fecha determinada.

Las consultas a las bases de datos conforman una de las principales aplicaciones prácticas del programa desarrollado. Con el resultado de una consulta se puede crear un informe en formato pdf (doc, xls), listo para su impresión.

Otra de las utilidades del programa desarrollado es un sistema de aviso de nuevas incidencias. Cuando algún técnico encargado de los expedientes introduce datos sobre algún incidente nuevo, el resto de los técnicos del departamento ven en pantalla, cuando abren el programa, un aviso que les indica que la tabla de expedientes ha sido modificada.

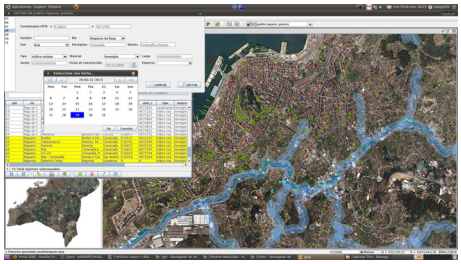


Figura 2: Interface gráfica del SIG en la que se aprecia una ortofoto, una zona de influencia alrededor del río, el localizador, una tabla con registros seleccionados y un formulario para introducir datos.

CONCLUSIONES

El resultado del proyecto presentado en este trabajo es un programa informático que permite mejorar sustancialmente la gestión ambiental de los ríos urbanos por parte del personal de la administración correspondiente.

Este programa facilita la interconexión entre los diferentes departamentos implicados en la conservación de los ríos, lo que permite compartir datos y mejorar el flujo de información.

Los usuarios pueden acceder mucho más rápido a la información, relacionar la componente espacial con la temática y ver sobre una cartografía la localización de los elementos a los que hace referencia esa información.

Además de las consultas, espaciales y temáticas, pueden realizar análisis de tipo espacial para responder a preguntas claves como determinar las empresas aguas arriba de un vertido detectado que, en función de los deshechos que generan, son las causantes potenciales de ese vertido.

BIBLIOGRAFÍA

ARCTUR, D. y ZEILER, M., 2004. *Designing Databases: Case studies in GIS data modeling*. Publicado por ESRI, 380 New York street, Redlands, California (USA).

DEMERS, M.N., 2008: *Fundamentals of Geographical Information Systems.* Wiley (USA).

GAO, Z., y WU, C., 2010. *Quantitative assessment of urban human activity intensity based on GIS - A case study of the pearl river delta.* 2010 18th International Conference on Geoinformatics, 2010 , art. no. 5567819.

gvSIG, 2011. *http://www.gvsig.org/web/ (último acceso 28/03/2011).*

MORRA, P. et al., 2009. *The assessment of human health impact caused by industrial and civil activities in the Pace Valley of Messina.* Science of the Total Environment, 407 (12), 3712-3720.

PostGIS, 2011. *http://postgis.refractions.net/ (último acceso 28/03/2011).*

ZEILHOFER, P., LIMA, E.B.N.R y LIMA, G.A.R., 2010. *Land use effects on water quality in the urban agglomeration of Cuiabá and Várzea Grande, Mato Grosso State, central Brazi.* Urban Water Journal, 7 (3), 173-186.

Servicio interoperable (WPS) de procesado de imágenes Landsat

L. Pesquer[1], J. Masó[1], G. Moré[1], X. Pons[2], J. Peces[3] y E. Doménech[3]

[1] CREAF. Universitat Autònoma de Barcelona. E-08193 Bellaterra. Tel: 935811312, Fax: 935814151**.** Correo electrónico: l.pesquer@ creaf.uab.cat**.**

[2] Dept. Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona.

[3] Servicio de teledetección, Instituto Geográfico Nacional

RESUMEN

El trabajo que se presenta describe las características, metodologías y potencialidades del próximo servicio interoperable para el procesado de imágenes Landsat según el estándar Web Processing Service (WPS) del Open Geospatial Consortium (OGC) en el marco del Plan Nacional de Teledetección (PNT), impulsado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España. El procesado es totalmente automático y parametrizable por el usuario; consta de dos fases fundamentales: la corrección geométrica y la corrección radiométrica.

Palabras clave: Corrección geométrica y radiométrica, Landsat, WPS, OGC, PNT.

ABSTRACT

This work describes the properties, methods and potentialities of the future interoperable processing service for Landsat image that follows the Web Processing Service (WPS) standard of the Open Geospatial Consortium (OGC) as a part of National Remote Sensing Program (PNT) promoted by Spanish National Geographic Institute (IGN). The process is fully automatic and customizable and is composed by two main steps: geometric correction and radiometric correction.

Keywords: *Geometric and radiometric correction,* Landsat, WPS, OGC, PNT.

INTRODUCCIÓN

La directiva por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (INSPIRE 2007, Vandenbroucke *et al.* 2008) tiene entre sus principales objetivos, la difusión de datos espaciales desde un punto de vista interoperable. Siguiendo este mandato y en el marco del Plan Nacional de Teledetección (PNT) (Villa *et al.*, 2005), el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España se marcó el objetivo de facilitar coberturas de imágenes satelitales de alta, media y baja resolución espacial para todo su territorio y con el mayor alcance temporal posible. En la media resolución espacial, la serie Landsat (NASA, 2011) iniciada en 1972 es la más adecuada para alcanzar dichos objetivos. Sin embargo, tal como suministran las imágenes de teledetección la mayoría de agencias y, concretamente la NASA para Landsat, las imágenes necesitan un procesado, a ser posible siguiendo procedimientos estándaradizados, para determinadas utilidades a los usuarios finales (Gutman y Justice, 2010). En función de las aplicaciones en los distintos ámbitos de la teledetección que puedan tener estas imágenes, necesitarán un nivel u otro de procesado, pero además debe tenerse en cuenta que para usos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) es necesario que el usuario pueda disponer de un control adecuado sobre algunos parámetros del procesado. Por consiguiente, no basta con ofrecer los productos ya procesados; la solución que ofrece una mayor flexibilidad y control es aquella que permite al usuario elegir el nivel y las características del procesado. Una posibilidad sería ofrecer las imágenes tal como las suministran las agencias acompañadas por un paquete de herramientas o utilidades para que el usuario realice en su ordenador personal el procesado. Esta solución va ligada a formatos, plataformas y *software* concretos, y por tanto, está alejada de los mandatos de interoperabilidad de la directiva INSPIRE. Adicionalmente, el uso de un *software* necesita de un previo aprendizaje y aleja una parte de los usuarios potenciales. En este contexto, la solución que adopta el IGN y que en este

trabajo se presenta, un Web Processing Service WPS (Schut, 2007) encaja con los requisitos anteriormente expuestos: accesibilidad, flexibilidad e interoperabilidad. De esta forma, el usuario no únicamente selecciona las escenas para la descarga, sino que selecciona los procesos bajo demanda, especificando sus características si lo desea o manteniendo las opciones habilitadas por defecto. Estas opciones son enviadas al servidor según el protocolo interoperable (WPS), de forma que el propio servidor ejecuta las tareas adecuadas y genera el producto final.

WPS

WPS es un servicio interoperable que permite al usuario demandar los procesos habilitados por el servidor según sus preferencias (Michaelis, 2009). La estandarización de su protocolo ha sido realizada por el Open Geospatial Consortium (OGC) organismo internacional que impulsa y regula la interoperabilidad en los datos y procesos geoespaciales.

De la misma forma que otros servicios estándar, WPS tiene definidas unas operaciones elementales que el cliente puede solicitar al servidor:

- *GetCapabilities*: Descripción de las posibilidades del servicio y lista de operaciones disponibles.
- *DescribeProcess*: Detalle de los parámetros de entrada y salida de las operaciones del servicio.
- *Execute*: Orden de ejecución de un proceso.

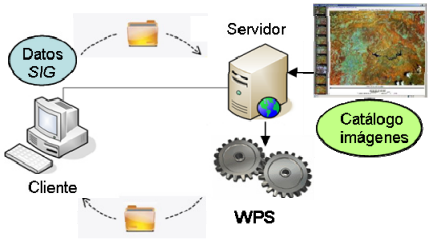


Figura 1: Esquema de transferencia de datos y solicitud de procesos entre el cliente y el servidor.

Si bien la ejecución se realizará en el servidor, los datos necesarios para dicha ejecución pueden residir en el propio servidor, o bien necesitar de transferencia entre el cliente y servidor, así como para la recepción del resultado por parte del cliente, tal como se ilustra en la Figura 1.

WPS de CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Las imágenes Landsat con nivel de procesamiento L1G suministradas por la NASA tienen un corrección geométrica aproximada que utiliza datos orbitales para orientar y georeferenciar aproximadamente la escena a una proyección UTM con datum WGS-84. Los errores geométricos de dicha corrección pueden superar el centenar de metros y, consecuentemente, debe corregirse con una mayor exactitud planimétrica utilizando puntos de control y un modelo digital del terreno.

El algoritmo de corrección geométrica, necesariamente automática en un contexto WPS que sustituya la habitual identificación y digitalización manual de puntos de control (Toutin, 2004), se basa esencialmente en la identificación de puntos de la imagen de satélite no-georeferenciada sobre una ortofotografía de alta resolución. Estos puntos identificados son puntos de control que determinan una transformación polinómica z-dependiente (sólo en x) de primer grado que responde a la Ecuación 1 (Palà y Pons 1995):

$$X'(x,y,z) = A + B \cdot x + C \cdot y + D \cdot z + E \cdot z \cdot x + F \cdot z \cdot y$$
$$Y'(x,y) = G + H \cdot x + I \cdot y + J \cdot z$$

Ecuación 1: parámetros y variables**:**
x,y: coordenadas planimétricas y z altimétrica en el espacio georeferenciado.
X',Y': coordenadas en espacio no-georeferenciado.
A,B,C,D,E,F,G,H,I,J coeficientes que definen la transformación.

La automatización del proceso se aborda en el trabajo de Pons *et al.* (2010a) donde los puntos de control se buscan por máxima correlación entre ambas imágenes y se busca una distribución que abarque todo el rango X, Y y Z de la escena a corregir.

En la implementación WPS, se ha generado un proceso preliminar que crea un índice de las posibles escenas a corregir y va actualizándose con las nuevas adquisiciones del IGN. De este listado de posibles escenas a corregir el usuario elige la de su interés, así como el criterio de interpolación deseado en el remuestreo (vecino más próximo, bilineal o bicúbico) y decide si aplicar el mismo criterio a todas las bandas o bien especificar un criterio para cada banda (por ejemplo, puede resultar aplicar vecino más próximo a las bandas multiespectrales para preservar su radiometría original y remuestrear bicúbicamente la banda pancromática para una mejor visualización). Por defecto la ortofotografía patrón y el modelo digital de elevaciones

son los suministrados por el IGN, pero se ha contemplado la posibilidad que el usuario pueda suministrarlos. En la Figura 2 se muestra la interfaz de este proceso y en la Figura 3 se ilustra un fragmento de la respuesta a una operación *DescribeProcess*.



Figura 2: Interfaz de solicitud y parametrización del WPS de corrección geométrica.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<wps:ProcessDescriptions xmlns:wps="http://www.opengis.net/wps/1.0.
  <ProcessDescription wps:processVersion="1" storeSupported="true"
    <ows:Identifier>LandsatGeometricCorrection</ows:Identifier>
    <ows:Title xml:lang="es">Corrección geométrica de imágenes LAND
    <ows:Abstract xml:lang="es">Corrección geométrica automática de
    <ows:Metadata xlink:title="Landsat"/>
    <ows:Metadata xlink:title="Satellite"/>
    <ows:Metadata xlink:title="Correction"/>
    <ows:Metadata xlink:title="Geometric"/>
    <DataInputs>
      <Input minOccurs="1" maxOccurs="1">
        <ows:Identifier>InputImage</ows:Identifier>
        <ows:Title xml:lang="es">Imagen a corregir</ows:Title>
        <ows:Abstract xml:lang="es">Identificador la de imagen a co
        <ComplexData maximumMegabytes="500">
          <Default><Format><MimeType>image/tiff</MimeType></Format>
          <Supported>
            <Format><MimeType>image/tiff</MimeType></Format>
            <Format><MimeType>application/x-mmz</MimeType></Format>
          </Supported></ComplexData></Input>
      <Input minOccurs="1" maxOccurs="1">
        <ows:Identifier>ImageTemplate</ows:Identifier>
        <ows:Title xml:lang="es">Ortoimagen patrón</ows:Title>
        <ows:Abstract xml:lang="es">Ortoimagen patrón sobre la que
        <ComplexData maximumMegabytes="500">
          <Default><Format><MimeType>image/tiff</MimeType></Format>
          <Supported><Format><MimeType>image/tiff</MimeType></Forma
            <Format><MimeType>application/x-mmz</MimeType></Format>
          </Supported></ComplexData></Input>
      <Input minOccurs="1" maxOccurs="1">
        <ows:Identifier>DEM</ows:Identifier>
        <ows:Title xml:lang="es">Modelo Digital de Elevaciones</ows
        <ows:Abstract xml:lang="es">Modelo digital de elevaciones d
        <ComplexData maximumMegabytes="500">
          <Default><Format><MimeType>image/tiff</MimeType></Format>
          <Supported><Format><MimeType>image/tiff</MimeType></Forma
            <Format><MimeType>application/x-mmz</MimeType></Format>
          </Supported></ComplexData></Input>
```

Figura 3: Documento (fragmento) XML correspondiente a la respuesta a una petición *DescribeProcess* del WPS de corrección geométrica.

WPS de CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

La transformación de los valores digitales de la imagen a reflectividades se realiza mediante una corrección topográfica y atmosférica basada en el modelo que se expone en la Ecuación 2 de Pons y Solé (1994):

$$\rho = \frac{\pi \cdot (L - L_a) \cdot d^2}{\cos\theta \cdot E_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}$$

Ecuación 2: parámetros y variables**:**
ρ: *reflecividad a nivel de suelo.*
τ_1, τ_2: *transmitancia atmosférica ascendente y descendente.*
E_0*: radiancia solar exoatmosférica.*
L, L_a*: radiancias a nivel de sensor: total y recibida únicamente por contribuciones atmosféricas.*
θ: *ángulo entre dirección solarczenital y normal superficie topográfica.*
d: distancia Tierra-Sol.

El ajuste de los parámetros del modelo a partir de valores de referencia determinados en áreas pseudoinvarinates (PIA) permite el procesado automático que se detalla en Pons *et al.* (2010b). Estos valores de referencia pueden provenir de medidas sobre el terreno o valores radiométricos casi-constantes en series coherentes de algunas imágenes corregidas manualmente o pueden ser obtenidos a partir de productos de otros sensores con bandas espectrales asimilables (p.ej MODIS).

En el cliente WPS implementado, tal como muestra la interfaz de la Figura 4, se selecciona una de las imágenes ya georeferenciadas, el modelo digital de elevaciones de la región y un conjunto de zonas pseudoinvariantes con valores de reflectividad de referencia, pertenecientes al repositorio del servidor o suministrado por el usuario en las zonas donde no existan datos previos. En este segundo caso, las zonas pseudoinvariantes proporcionadas constituirán un fichero de polígonos en formato GML, estándar para capas vectoriales (Lu *et al.*, 2007) con atributos de reflectividades para cada canal espectral.

Como cualquier servicio interoperable, es importante remarcar que las Figuras 2 y 4 sólo corresponden a una implementación concreta del cliente, en este caso MiraMon (Pons 2000); pero la estandarización del protocolo permite que cualquier otro cliente WPS pueda invocar los procesos que se presentan en este estudio y, de esta forma, la solución adoptada garantiza la independencia respecto a cualquier *software* libre o propietario permitiendo el acceso a un gran número de usuarios potenciales.

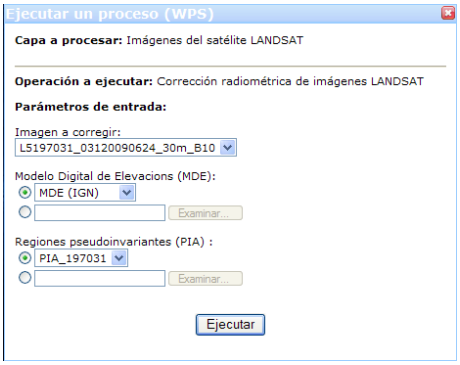


Figura 4: Interfaz de petición y parametrización del WPS de corrección radiométrica.

CONCLUSIONES

El suministro, adicional a los datos, de un procesado bajo demanda para los usuarios de imágenes Landsat, proporciona un mayor control y adaptabilidad a las necesidades particulares que una simple descarga de productos cerrados.

El procesado, implementado como servicio WPS, sigue protocolos estándares impulsados por el OGC, consiguiendo una completa interoperabilidad al poder ser invocados desde cualquier cliente que interrogue al servidor con las especificaciones descritas en el WPS.

La solución adoptada por el IGN en el marco del PNT sigue las normativas europeas de acceso a los datos y procesos geoespaciales.

BIBLIOGRAFÍA

GUTMAN, G. y JUSTICE, C. 2010 *Land Cover and Land-Cover Change Products from Optical Coarse and Moderate Spatial Resolution Global Datasets*. Proc. ESA Living Planet Symposium.

INSPIRE, 2007 Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community.

LU C.T., DOS SANTOS R.F., SRIPADA L.N. y KOU Y., 2007 *Advances in GML for Geospatial Applications*, Geoinformatica 11: 131 -157.

National Aeronautics and Space Administration (NASA), Landsat Program http://landsat.gsfc.nasa.gov.

MICHAELIS C.D. y AMES D.P., 2009 *Evaluation and Implementation of the OGC Web Processing Service for Use in Client-Side GIS*. Geoinformatica, 13: 109-120.

PALÀ V. y PONS X. 1995, *Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections,* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 61: 935–944.

PONS X. y SOLÉ-SUGRAÑES L., 1994 *A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data,* Remote Sensing of Environment, 48: 191–204.

PONS X., 2000. *MiraMon. Geographical Information System and Remote Sensing Software*, CREAF, ISBN: 84-931323-4-9. http://www.creaf.uab.es/MiraMon

PONS X., MORÉ G. y PESQUER L., 2010, *Automatic matching of Landsat image series to high resolution orthorectified imagery,* Proc. ESA Living Planet Symposium SP-686.

PONS X., CRISTÓBAL J., PESQUER L., MORÉ G. y GONZALEZ Ò. 2010 *Fully automated and coherent radiometric (atm+top) correction of Landsat MSS-TM-ETM images through pseudoinvariant areas,* Proc. ESA Living Planet Symposium SP-686.

SCHUT P. 2007, OGC *Web Processing Service* (WPS), Version 1.0.0, OGC 05-007r7: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=24151.

TOUTIN T., 2004 *Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and method,* International Journal of Remote Sensing. 25.10: 1893–1924.

VANDENBROUCKE D., ZAMBON M.L., CROMPVOETS J., DUFOURMONT H. 2008 *INSPIRE Directive: Specific requirements to monitor its implementation.* Capítulo de libro A Multi-View Framework to Assess SDIs.

VILLA G., AROZARENA A., DEL BOSQUE I., VARCÁRCEL, N., GARCÍA C., SOLÍS M.J., 2005. *El Plan Nacional de Observación del Territorio en España*. Proc. XI Congreso Nacional de Teledetección, Tomo I, 249-254.

Estudio de biomasa forestal utilizando técnicas de fotogrametría y clasificación supervisada

Rut Y. Rey Moure, Miguel CastroFernandez, Jaime F. Peón Fernandez y JesusM.TorresPalenzuela

Dep. de Física Aplicada. Fac. de Ciencias del Mar. Universidad de Vigo. Lagoas Marcosende 36200, Vigo. (Galicia, España). Correo electrónico: yolandarey@uvigo.es,jesu@uvigo.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio realizado en la zona forestal de Gondomar (Pontevedra). Se han empleado técnicas de fotogrametría y datos obtenidos mediante modelos de elevación digital del terreno para obtener volúmenes de biomasa forestal. Se ha elaborado un índice de verdor para este tipo de imágenes y mediante clasificación supervisada se han podido diferenciar tipos de cubiertas y en concreto pinar y eucalipto. Datos de estudio de biomasa tomados in situ nos permiten extrapolar el volumen vegetal (total o parcial) con el objetivo de realizar estudios de gestión sostenible de los recursos forestales.

Palabras clave: biomasa forestal, fotogrametría, clasificación supervisada, gestión sostenible

ABSTRACT

This paper presents a study carried out in the forest zone of Gondomar (Pontevedra). Photogrammetry techniques were used and data were obtained through digital elevation models in order to get forest biomass volume.An index of greennessfor this kind of images has been developed and through supervised classification it was possible to differentiate types of forest covers and in particular pine and eucalyptus. Field biomass data allow us to extrapolate the volume of the forest (partial or total biomass) in order to carry out studies of sustainable management of forest resources.

Keywords:forest biomass, photogrammetry, supervised classification, sustainable management.

INTRODUCCIÓN

La biomasa forestal primaria reúne características que la convierten en un recurso energético competitivo en el mercado de las energías renovables. Su relevancia radica no sólo en su capacidad para hacer frente a la reciente subida de los precios de los combustibles fósiles, sino porque se ha convertido en una alternativa a este tipo de combustibles, cuyas reservas tienen un carácter finito.

La gestión sostenible de los recursos forestales necesita herramientas como las presentadas en este trabajo, a través del uso de la fotogrametría con fotografía aérea, índices de verdor y clasificación supervisada.

DATOS DE ESTUDIO

El área de estudio se corresponde con la zona forestal de Gondomar (Pontevedra).Partimos de dos imágenes aéreas del monte de Vincios (figura 1), realizadasen agosto de 2010 con una cámara ULTRA CAMXp-WA de focal 070.5 a bordo de una aeronave CESSNA T-310-R y a unos 1000 m de altura sobre el terreno. El procesado de imágenes se realiza a 270º y con RGB de 8 bits.Por otra parte, también contamos con un mapa topográfico de curvas de nivel de la zona de Gondomar, facilitado por el Ayuntamiento de Gondomar.



Figura 1: Fotografías aéreas de la zona de estudio.

METODOLOGÍA

Descripción de Modelos de Elevación Digital

Un modelo de elevación digital (DEM) se

define como un archivo o conjunto de datos que contiene puntos de elevación sobre un área contigua (Miller, 2004; Ma, 2005). Los DEMs pueden subdividirse en:

1. Modelos digitales de superficie (DSM) que contienen información de la elevación de todas las características del paisaje, como vegetación, edificios y otras estructuras.

2. Modelos digitales del terreno (DTM) que contienen información de la elevación de la superficie de la Tierra al descubierto, sin la influencia de la vegetación o de estructuras hechas por el hombre.

El DTM se ha calculado a partir de las curvas de nivel y con la ayuda del software ENVI utilizando el sistema de coordenadas basado en la proyección de Mercator, Huso 29 N y Datum WGS84 (figura 2).

La interpolación de la superficie se realiza utilizando el *Lineargriddinginterpolationmethod*, (figura 2).

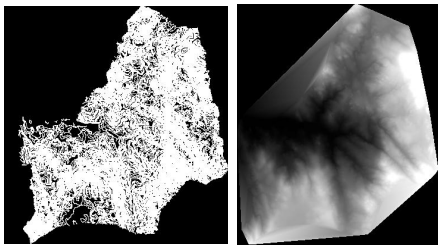


Figura 2: Mapa topográfico de Gondomar digitalizado y modelo digital del terreno.

Con este modelo se puede generar una vista tridimensional conla imagen de Gondomar superpuesta y seleccionar la zona correspondiente a las fotografías aéreas mostradas en la figura 1.

El DSM se ha realizado aplicando técnicas fotométricas a las fotografías aéreas.

Descripción de Fotogrametría

La Fotogrametría es una técnica que determina las propiedades geométricas de los objetos y de las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Gracias al gran desarrollo de la computación, en la actualidad, se aplica a diversos campos de actuación.

El primer paso a realizar es la calibración de la cámara. Consiste en determinar el valor de sus elementos de orientación interna, y compensar éstos de la mejor manera posible. En este apartado se obtienen una serie de datos (distancia focal de lentes, distorsión de lentes – tanto en la dirección radial como en la tangencial- y la localización de los principales puntos del sensor de cámara) que se utilizan para corregir la distorsión de las lentes.

Seguidamente, se realiza una orientación externa con la introducción de puntos de control sobre ambas imágenes. De esta manera se obtiene una visión estereoscópica. Es una imagen en la que percibimos la sensación de profundidad, lejanía o cercanía de los objetos que conforman la imagen. Es un proceso similar al que emplea nuestro mecanismo de visión para ser capaces de apreciar, a través de la visión binocular, las diferentes distancias y volúmenes del entorno que nos rodea.

Por último, se completa la reconstrucción 3D a partir de las imágenes 2D. Para obtener el modelo 3D se emplean múltiples imágenes (un mínimo de 2 imágenes) utilizando el método estéreo de imágenes.

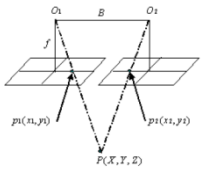


Figura 3: Método estéreo de imágenes.

En el método estéreo, el objeto es fotografiado desde diferentes posiciones (a la derecha y a la izquierda) y la medición se realiza con las partes solapadas. Por el principio de triangulación, las coordenadas 3D del objeto se determinan de los correspondientes puntos de las imágenes izquierda y derecha.

La superficie que se obtiene es un TIN (*Triangulated Irregular Network*) que se puede visualizar como triangulación o con textura. A esta superficie se le puede aplicar líneas de contorno, perfiles de sección, orto imágenes, medidas tanto de áreas como de volúmenes y el modelo en 3D propiamente dicho.

RESULTADOS

Descripción de Clasificación

En nuestro estudio hemos definido 4 clases temáticas: 0_Fondo, 1_Prado, 2_Pino y 3_Eucalipto. Entendemos como fondo las zonas no forestales, las carentes de vegetación vigorosa y las sombras producidas por la vegetación.

Previo a la clasificación debemos descomponer la imagen de color de la figura 1 en sus bandas espectrales: Azul(B), Verde (G) y Roja (R) y calcular la cantidad de verdor a través del Índice de Verdor Normalizado (IVN) para enmascarar las zonas que carecen de interés en este estudio. Dado a que no disponemos de banda infrarroja cercana en la imagen, hemos tenido que diseñar este índice utilizando como límites de discriminación de verdor,el valor cero. La expresión viene dada por :

$$IVN = [(G-R) / (G+R)]$$

A los resultados obtenidos debemos sustraer los valores de los píxeles correspondientes a zonas en sombra entre la vegetación. Este resultado nos permite obtener una máscara de las zonas de mayor verdor vegetal correspondientes a las zonas forestales.

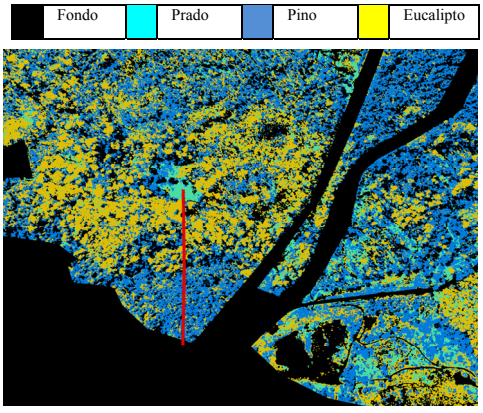


Figura 4: Mapa temático de clasificación donde se observan en azul y amarillo ocre las dos especies más significativas en la zona: el pino y el eucalipto.

Para la realización de la clasificación, se ha utilizado una imagen de un gradiente entre la banda roja y azul de la imagen enmascarada para resaltar las diferencias espectrales entre los pinos y los eucaliptos.

La clasificación supervisada se realiza con el algoritmo de máxima probabilidad (*maximumlikelihood*). Finalmente al resultado se leaplica un filtro de máximo valor, con un kernel de 3x3. De esta forma se consigue el mapa temático deseado (figura 3).

Estudio de perfil de biomasa

A partir del DSM resultado de la fotogrametría, se obtiene un perfil de sección de una zona forestalcon las distintas cubiertascomo pinar y eucalipto (ver figura 4 y 5). El perfil del terreno se obtiene del DEM (*Digital ElevationModel*) dibujado en marrón en la Figura 6.

Gracias a la clasificación supervisada se obtienen los diferentes tipos de cubiertas, que se representan longitudinalmente en el perfil. La diferencia volumétrica entre el perfil del terreno (obtenida del modelo 3D mediante técnica fotogramétrica) y el perfil del terreno (obtenida del DEM) da como resultado el volumen de biomasa forestal de la zona que observa en la figura 6.



Figura 5: Imagen en 3D con perfil de sección.

La importancia de este trabajo, no sólo radica en la obtención de los diferentes modelos digitales (DSM y DTM), sino en la demostración de que la diferencia de ambos modelos proporciona información de la masa forestal existente.

La clasificación por si solanos da información de la distribución de las clases temáticas seleccionadas a priori e, incluso, permite el cálculo de la extensión que ocupa cada una de estas clases. Pero, si combinamos la diferencia de ambos modelos con los resultados del clasificador, podemos determinar el volumen de cada una de las cubiertas vegetales clasificadas (figura 6).

Con estos resultados y con datos de biomasa tomados in situ (o bien datos dasométricos tabulados para cada especie), podemos extrapolar el volumen vegetal obtenido a recursos de biomasa total o parcial (podas, selección de brotes, clareos, cortas fitosanitarias y desbroces) con el objetivo de realizar estudios de gestión sostenible de los recursos forestales de esta localidad.

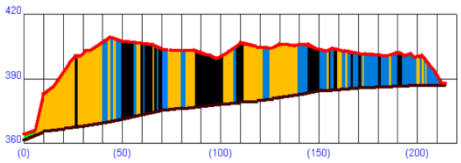


Figura 6: Perfil de la sección con los diferentes tipos de cubierta y el volumen de biomasa forestal.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la utilización de técnicas de fotogrametría combinadas con los modelos de elevación digital son herramientas de gran utilidad para obtener volúmenes aproximados de biomasa forestal.

Si bien, el resultado obtenido de esta clasificación es bastante heterogéneo, no podemos extrañarnos dada las singularidades del relieve, la mezcla de especies, la distribución de la población y de los usos del suelo de Galicia. La zona estudio no se escapa de esta definición.

El estudio que se lleva a cabo en este trabajo requiere de una etapa de validación, utilizando datos in situ, para una valoración cuantitativa de resultados tanto del clasificador como de la biomasa obtenida por hectárea. Hasta el momento la etapa de validación no ha sido rematada ya que está programada para los meses de Junio y Julio de este año.

Respecto al clasificador, aunque podría mejorar utilizando bandas en el infrarrojo, nuestra intención ha sido utilizar clasificadores basados en imágenes en formato RGB dada la gran disponibilidad de este tipo de documentación en el territorio de Galicia.

Por otro lado la utilización de datos LIDAR nos permitiría mejorar los resultados obtenidos tras el proceso de validación.

La relación entre el volumen vegetal de una especie y sus características dasométricas proporcionan información de la biomasa total o parcial disponible.

Los datos de biomasa resultan de gran interés para un buen aprovechamiento de una masa forestal. Estudios de gestión forestal, de recursos de personal, coste económico y rentabilidad están intrínsecamente ligados a la biomasa generada en los montes.

BIBLIOGRAFÍA

JENSEN, J. R., 2007. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. PEARSON Prentice Hall, 2nd ed.

MARTÍN, J., 2002. *Análisis y parametrización del territorio para gestión del hábitat en conservación*.Tesis Doctoral. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Vigo.

MOSQUERA, A., TORRES, J.M., GONZÁLEZ, L., MOURELLE, M.L., 2007. *Utilización de teledetección para el estudio de zonas de sedimentación de peloides en las costas gallegas*. I Congreso Iberoamericano de Peloides. Baiona.

REY, R.Y., YAROVENKO, N.V., MARTIN, M.C., CASTRO, M., TORRES, J.M., 2010. *Estudio de sedimentos de peloides en el complejo intermareal de A Ramallosa utilizando teledetección*. II Congreso Iberoamericano de Peloides.Lanjarón.

DIEGUEZ, U., BARRIO, A., CASTEDO, F., ALVAREZ, J.G., 2005. *Relación altura-diámetro generalizada para masas de Pinussylvestris*. Invest Agrar. Sist Recur For 14 (2), 229-241

PAINE, D. P. and KISER, J. D., 2003. *Aerial photography and image interpretation.* WILEY.

CICIARELLI, J. A., 1991.*A practical guide to aerial photography with an introduction to surveying.*VAN NOSTRAND REINHOLD.

RUIZ MORALES, M., 2003. *Nociones de topografía y fotogrametría aérea*. UNIVERSIDAD DE GRANADA.

Utilidad de las imágenes sintéticas para la determinación de la bondad de distintos algoritmos de corrección topográfica.

I. Sola[1], M. González de Audícana[1], J. Álvarez-Mozos[1] y J.L. Torres[1]

[1] Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural. ETSIA. Universidad Pública de Navarra. Edificio de Los Olivos. Campus Arrosadía s/n 31006 Pamplona (Navarra, España). Correo electrónico: sola.69407@unavarra.es

RESUMEN

En este trabajo se evalúa la utilidad de las imágenes sintéticas como procedimiento para determinar la bondad de diferentes algoritmos de corrección topográfica, siendo una imagen sintética aquella en la que el nivel digital de cada píxel representa la radiancia que detectaría un sensor procedente de cubiertas con un determinado valor de reflectividad, bajo unas condiciones de adquisición concretas, geométricas y temporales. En esta presentación se describe el proceso para generarlas, y se propone un sencillo índice estadístico para evaluar la calidad de las imágenes corregidas, y determinar, de ese modo, el algoritmo de corrección topográfica que ofrece mejores resultados para un caso concreto.

Palabras clave: Teledetección, imagen sintética, irradiancia, corrección topográfica.

ABSTRACT

The main objective of this work is *to evaluate the utility of synthetic images as a procedure in order to determinate the goodness of the different algorithms of topographic correction. A synthetic image is composed by pixels whose value represents the radiance the sensor would receive coming from land-covers with the same reflectivity, under specific acquisition conditions, as geometric as temporal. In this paper it is described the process to generate them and a group of statistical indexes will be evaluated as a tool to determinate the most suitable algorithm for each case.*

Keywords: *Remote sensing, synthetic image, irradiance, topographic correction.*

INTRODUCCIÓN

El relieve o topografía tiene un gran efecto en la irradiancia solar que incide en la superficie terrestre. Esta irradiancia depende, entre otros, de la pendiente y la orientación del terreno, que determinan el ángulo de incidencia entre los rayos solares y la normal a la superficie. Diferencias en el valor de éste en muchas ocasiones implican variaciones en los valores de radiancia detectados por los sensores espaciales en zonas con cubiertas similares y propiedades biofísicas y estructurales parecidas (Soenen *et al*., 2005). Este hecho afecta negativamente a la utilidad de las imágenes de satélite para cartografiar cubiertas o usos del suelo.

La Corrección Topográfica (TOC) tiene por objeto compensar las diferencias en la irradiancia solar recibida en laderas con distinta orientación y pendiente, y en consecuencia permite obtener a partir de los valores de radiancia y reflectividad recibidos por el sensor de las cubiertas situadas sobre el terreno, los valores de radiancia y reflectividad que éste hubiera captado en caso de que las cubiertas terrestres se extendieran sobre una superficie totalmente horizontal.

Los métodos empleados más frecuentemente para corregir este fenómeno requieren determinar el valor del ángulo de incidencia solar en cada punto de la imagen, para lo cual es necesario utilizar un modelo digital de elevaciones (MDE) de la zona de estudio. Entre ellos podemos citar los algoritmos C-Correction (Teillet *et al*., 1982), Minnaert (Minnaert, 1941), método Empírico (Meyer *et al*., 1993), Variable Empirical Coefficient Algorithm-VECA (Gao *et al.*, 2008), método Sun-Canopy -Sensor+C (Soenen *et al.*, 2005) o B-Correction (Vincini *et al.*, 2003).

Un aspecto crucial para poder comparar de forma rigurosa los diferentes métodos de corrección topográfica es el del análisis de calidad de las imágenes resultantes. Hasta la fecha, en el campo de la corrección topográfica

de imágenes se han propuesto pocos procedimientos o índices para evaluar la calidad de las correcciones, siendo los más habituales los siguientes: (1) Evaluación visual de la desaparición de la apariencia de relieve en las imágenes de satélite (Kobayashi *et al.*, 2008); (2) Análisis de la dependencia entre la radiancia de la imagen corregida y el ángulo de incidencia solar (Vincini *et al.*, 2003); (3) Análisis de la variabilidad en las respuestas de diferentes cubiertas (Shepherd *et al*., 2003); (4) Análisis de los resultados de la clasificación realizados antes y después de la normalización topográfica. (Baraldi *et al*., 2010)

Estos índices son un buen punto de partida, pero hasta el momento no hay definido un protocolo para la evaluación de la bondad de los diferentes algoritmos TOC. En este trabajo se propone, precisamente, la utilización de imágenes sintéticas como herramienta para determinar de forma cuantitativa la calidad de los algoritmos de corrección topográfica.

Una imagen sintética es aquella en la que el nivel digital de cada píxel representa la radiancia que detectaría un sensor procedente de cubiertas con un determinado valor de reflectividad, bajo unas condiciones de adquisición concretas, geométricas y temporales. Por lo tanto, para generar una imagen sintética de una determinada zona es necesario disponer del MDE de dicha zona y determinar la reflectividad de las cubiertas, así como fijar la hora y fecha de adquisición, que condicionarán los parámetros solares.

CÁLCULO DE LA IMAGEN SINTÉTICA

En este estudio se ha generado la imagen que hubiera captado un sensor que trabajara en todo el dominio óptico del espectro, para unas coordenadas, una fecha y una hora concretas, considerando que la reflectividad de todas las cubiertas presentes en la zona es constante e igual a 0,2. El proceso para generar la imagen sintética consta de las siguientes tres fases:

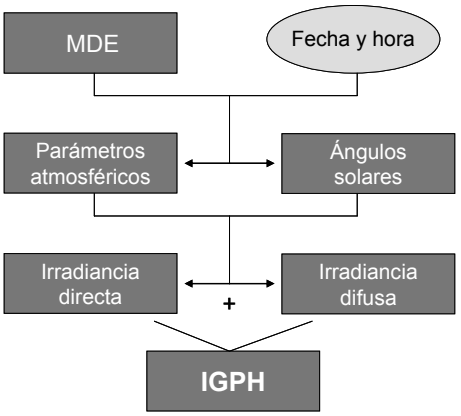
1. Estimación de la Irradiancia Global sobre Plano Horizontal (IGPH) que llega a cada uno de los píxeles de la zona considerada.

2. Estimación de la Irradiancia Global sobre Plano Inclinado (IGPI), es decir, considerando la pendiente y la orientación de cada píxel.

3. Estimación de la Radiancia Total recibida por el sensor (L_{se}), teniendo en cuenta la geometría de adquisición fijada para la imagen sintética.

En la figura 1 se resume el procedimiento seguido para obtener la imagen de irradiancia global sobre plano horizontal en la fecha y hora definida. Esta imagen es la suma de dos términos: Irradiancia directa, estimada mediante el modelo de Page (Page *et al.*, 1996), e irradiancia difusa, estimada a partir del modelo de Dumortier (Dumortier *et al.*, 1998). En primer lugar se precisa obtener los ángulos solares (zenith θ_z y azimuth Φ_s) calculados a partir de la declinación, el ángulo horario y las imágenes de latitud y longitud.

A continuación es necesario calcular una serie de parámetros atmosféricos tales como la irradiancia normal extraterrestre, la turbidez, la densidad óptica del aire y la masa de aire, que condicionan cuanta de la energía irradiada por el sol llega a cada punto.



Esquema 1: Proceso para la obtención de la imagen sintética de irradiancia estimada en plano horizontal.

Con estos datos se puede obtener la irradiancia solar directa y difusa en plano horizontal, tal como se muestra en el esquema, que viene condicionada principalmente por la altitud de cada punto y por la orientación y elevación del sol, ya que el resto de parámetros se mantienen constantes o sus variaciones son leves entre distintas zonas de la imagen.

Para estimar la irradiancia global sobre plano inclinado se parte de las imágenes de irradiancia directa, difusa y global en plano horizontal, y se aplica, considerando nuevamente el MDE, el modelo de Pérez en su versión simplificada (1987) y actualizada (1990).

La irradiancia total recibida sobre un plano inclinado se calcula como la suma de tres términos, la irradiancia directa, la difusa reflejada por el suelo y la difusa procedente del cielo. Éste tercer término es el más complejo de obtener, y requiere el cálculo previo de los índices de brillantez del cielo y claridad del cielo.

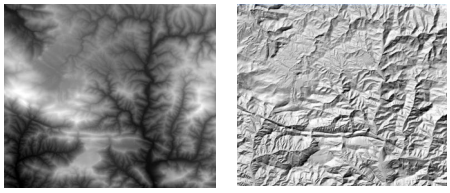
Una vez obtenida la irradiancia total en plano inclinado, suma de los tres términos anteriormente citados, se genera la imagen sintética, es decir, la relativa a la radiancia que habría recibido el sensor considerando, para cada píxel, el valor de la reflectividad y la transmisividad atmosférica ascendente (Gilabert *et al.*, 1994), que depende a su vez de la altitud del mismo y del ángulo de observación del satélite.

En la obtención de esta imagen sintética no se ha tenido en cuenta la dispersión atmosférica y se asume que todo el territorio está ocupado por un mismo tipo de cubierta con reflectividad de 0,2.

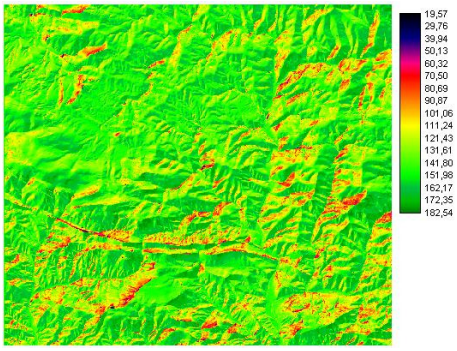
RESULTADOS

Obtención de la imagen sintética

En este trabajo se ha generado una imagen sintética, cuyas condiciones de adquisición, temporales y geométricas, coinciden con las de una imagen SPOT5 captada un 15 de agosto de 2009 a las 10:44 UTC para la zona del Pirineo Navarro, cubriendo una extensión de 20x18km. y en la que a cada píxel, de 10 m. de resolución le corresponde un valor de radiancia que varía de 19 a 182 W/m^2.sr., siendo el valor medio de 140.52 W/m^2.sr.



a) **b)**



c)

Figura 1: a) Imagen de irradiancia total recibida sobre un plano horizontal **b)** Imagen de irradiancia total recibida sobre un plano inclinado (modelo de Richard Pérez) **c)** Radiancia recibida por el sensor. Imagen sintética utilizada para evaluar la bondad de los diferentes algoritmos de corrección topográfica.

Aplicación de los diferentes métodos de corrección (TOC)

En esta comunicación se muestran los resultados obtenidos al evaluar la calidad de las imágenes corregidas empleando seis de los procedimientos TOC más aceptados en la literatura existente: Método C-Correction, método Empírico, método VECA, método B-Correction, método Minnaert y método SCS+C.

Se ha considerado el índice estadístico indicado en la Ecuación 1, como criterio para determinar la calidad de los distintos algoritmos:

$$RDS = 100 - \left(\frac{\sigma_{cor} \cdot 100}{\sigma_o} \right) \qquad (1)$$

donde:
σ_o = *desviación estándar original*
σ_{cor} = *desviación estándar de la imagen corregida*

TOC en imagen sintética.		
	ΔL	RDS
C-Correction	6,140	94,2
Empiric	0,000	94,5
VECA	0,004	94,4
B-Correction	5,327	83,5
Minnaert	9,365	43,0
SCS+C	-8,421	29,6

Tabla1: Índices estadísticos obtenidos para las imágenes corregidas a partir de los diferentes algoritmos de corrección topográfica.

El índice que se propone en este trabajo para evaluar la bondad de cada TOC es la reducción de la desviación estándar de la imagen sintética, siendo el algoritmo perfecto aquel que consiga una imagen sintética corregida con un RDS=100, es decir, con una desviación estándar nula, lo que supone una eliminación completa del efecto del relieve en la radiancia detectada por el sensor.

No obstante, es importante que el algoritmo empleado no haga variar el valor medio de radiancia de la imagen original, de manera que hemos considerado también la variación normalizada de la radiancia media (ΔL), cuya expresión se indica en la Ecuación 2, como índice estadístico a la hora de evaluar la bondad de cada algoritmo.

$$\Delta L = \frac{(L_o - L_{cor}) \cdot 100}{L_o} \qquad (2)$$

donde:
L_o *= radiancia media original*
L_{cor} *= radiancia media de la imagen corregida.*

Análisis de calidad

En base al índice RDS los métodos que mejores resultados ofrecen son el C-Correction, el VECA y el método Empírico, alcanzándose con ellos valores del rango de 93-94%, siendo este último método el que mejores resultados proporciona, ya que altera en menor medida el valor de radiancia media de la imagen a corregir.

CONCLUSIONES

Las imágenes sintéticas, que pueden generarse para cualquier geometría y condiciones de adquisición, permiten seleccionar el algoritmo TOC que mejores resultados ofrece en cada situación concreta. El análisis de la bondad de la corrección con este tipo de imágenes puede realizarse de forma sencilla y objetiva, calculando índices estadísticos como el propuesto en este trabajo.

La utilización de imágenes sintéticas para determinar la bondad de los métodos de corrección existentes viene a completar el vacío existente en el campo del análisis de la bondad de los algoritmos de corrección del efecto topográfico.

REFERENCIAS

TEILLET, P.M., GUINDON, B. and GOODENOUGH, D.G., 1982. *On the slope-aspect correction of multispectral scanner data.* Canadian Journal of Remote Sensing, 8, 84-106.

VINCINI, M. AND FRAZZI, E., 2003. *Multi-temporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(11), 2586-2590.

MINNAERT, M., 1941. *The reciprocity principle in lunar photometry.* Astrophysical Journal, 93 (3).

MEYER, P., et al., 1993. *Radiometric Corrections of Topographically Induced Effects on Landsat TM Data in an Alpine Environment.* ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 48(4), 17-28.

SOENEN, S.A. et al., 2005. *SCS+C: A modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain.* IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 43(9), 2148-2159.

GAO, Y. and ZHANG, W., 2009. *Variable Empirical Coefficient Algorithm for Removal of Topographic Effects on Remotely Sensed Data from Rugged Terrain.* International Journal of Remote Sensing, 30 (9).

BARALDI, A. et al., 2010. *Operational Two-Stage Stratified Topographic Correction of Spaceborne Multispectral Imagery Employing an Automatic Spectral-Rule-Based Decision-Tree Preliminary Classifier.* IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE & REMOTE SENSING, 48 (1).

SHEPHERD, J.D. and DYMOND, J.R., 2003. *Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography.* Int. Journal of Remote Sensing, 24 (17), 3503–3514.

PEREZ, R. et al., 1988. *The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model.*

PAGE, J., 1996. *Algorithms for the Satel-light programme*. Technical Report for the 2nd SATEL-LIGHT meeting in Bergen.

DUMORTIER, D., 1998. *The Satel-light model of turbidity variations in Europe*. Report for the 6th SATEL-LIGHT meeting in Freiburg.

KOBAYASHI, S. and SANGA-NGOIE, K., 2008. *The integrated radiometric correction of optical remote sensing imageries.* International Journal of Remote Sensing, 29 (20).

Aplicación de fotografía digital + escaneado láser 3D para la virtualización de Arte Paleolítico Parietal

J.A. Suárez[1], P. González-Pumariega[1], R. J. Argüelles[1] y A. Vidal[1]

[1] **Gtc** Equipo investigador en geomática, topografía y cartografía. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). jsuarez@uniovi.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una aplicación de la tecnología "Trimble Spatial Imaging" para la documentación, estudio y divulgación del Arte Paleolítico Parietal utilizando como referentes varias muestras significativas procedentes de dos cuevas de la Región Cantábrica (España): La Lluera y El Pindal.

Palabras clave: Arte Parietal, escaneado láser 3D, teledetección a la mínima distancia de visión distinta.

ABSTRACT

This paper presents the application of technology "Trimble Spatial Imaging for documentation, study and dissemination of Paleolithic Art by reference Parietal significant number of samples from two caves of the Cantabrian region (Spain): La Lluera and El Pindal.

Keywords: *Parietal Art, 3D Laser Scanner*

Ellos pintaron porque vivir no bastaba. Nosotros cartografiamos porque ver no es suficiente.

ARTE PARIETAL

EL ARTE, en sus diversas manifestaciones, es una experiencia inherente al ser humano que brota, innata e irreprimiblemente, de la necesidad de expresar una paralela y diferenciada vida interior.

La mayoría de los estudiosos del arte gráfico prehistórico coinciden en plantear que el nacimiento de la conducta simbólica se produjo en un instante dado, como una explosión creativa o "eureka", en forma comparable a la del "click" de un interruptor. Ese salto de preferencia sensorial, que parece haberse dado hacia el 40000 BP, supuso relegar lo tacto-olfativo en beneficio de lo audiovisual y permitió a las modernas formas de *Homo sapiens* establecer un mundo social más eficaz y diferente al que, previamente, habían desplegado sus antecesores (*Homo neanderthaliensis* y *sapiens* arcaicos).

Si bien solemos utilizar el término Arte Rupestre como sinónimo de Arte Paleolítico, porque la gran mayoría de las obras han sido halladas en cuevas o en grutas, conviene matizar que ni todo el arte rupestre pertenece a ese período, ni todo el arte decorativo que se hizo en el Paleolítico fue ejecutado exclusivamente sobre las paredes de las cavernas. Nuestro trabajo se ciñe a esta última y concreta categoría, la del Arte sobre pared o Parietal y en ella las técnicas de representación utilizadas fueron: la pintura, el grabado y la escultura.

PATRIMONIUM: Bienes heredados

Aunque el deseo de conservar el Patrimonio como "bien común" ha estado presente en la sociedad desde antiguo, el referente para la catalogación de **Bien de Interés Cultural** surgió, en Francia y en 1912, tras el intento de extracción del bajorrelieve de un salmón en un abrigo natural.



Figura 1: Imagen de *L'Abri du Poisson* en Dordogne, France (hacia 23000 BP).

Pero fue tras los desastres de la II Guerra mundial cuando, con la creación de la ONU y concretamente de su Organización para la

Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), los países occidentales se plantearon seriamente la necesidad de inventariar el Patrimonio Histórico-Artístico Universal con fines de protección y prevención.

Tras años de debates, a los que no fue ajena la construcción de la presa de Assuan y el traslado de Abu-Simbel, la **"Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural"** fue adoptada por la UNESCO en 1972. En ella se consolidó la figura de **Patrimonio de la Humanidad** que el salmón de Les Eycies -de-Tayac, Lascaux y otras cuevas del Valle del Vézère obtuvieron en 1979. Altamira fue inscrita en 1985 y en julio de 2008, 17 cuevas más del Arco Cantábrico (entre ellas El Pindal) han recibido esta consideración.



Figura 2: Placa conmemorativa en El Pindal**.**

La **"*Carta Internacional para la gestión del Patrimonio Arqueológico*" (**Lausanne, 1990), considera que *"... el patrimonio arqueológico constituye el testimonio esencial de las actividades humanas del pasado. Su protección y su adecuada gestión son imprescindibles para permitir a los arqueólogos* ***y a otros científicos*** *estudiarlo e interpretarlo en nombre de generaciones presentes y futuras, para beneficio de las mismas."*

Por éstas y otras razones, la protección del patrimonio cultural debe basarse en una leal colaboración multidisciplinar entre profesionales cualificados diversos y apoyarse en los medios tecnológicos más avanzados de los que, en cada momento, se pueda disponer.

El resultado final de todas las intervenciones sobre lo irremplazable ha de ser proteger, conservar, analizar y difundir los valores que estos bienes heredados atesoran. Y principalmente porque no nos pertenecen, sino que se los debemos a quienes nos sucederán.

DOCUMENTACIÓN

El Arco Atlántico Hispano Francés y los Pirineos concentran el 95% de asentamientos paleolíticos europeos con arte parietal. En la mayoría de ellos los estudios métricos de precisión han estado siempre limitados por las restrictivas peculiaridades de los ambientes subterráneos: dificultad de acceso, humedad, oscuridad, baja temperatura, sustrato irregular e inestable, etc. Además, la antigüedad y fragilidad del arte rupestre paleolítico, especialmente de las pinturas, hace necesario que para su conservación se aparte a los observadores de la distancia de visión y de la temperatura de color en las que, a la flamente luz de una tea, fueron concebidas.

Desde sus inicios, a finales del S.XIX, las labores de documentación arqueológica de arte rupestre se han orientado siempre en tres direcciones: (1) topografía del soporte físico, (2) revisión y análisis de las paredes y (3) documentación gráfica y escrita de las figuras localizadas. Las modernas técnicas geomáticas basadas en la captura de nubes de puntos 3D + imágenes digitales multiespectrales permiten virtualizar el Arte Paleolítico Parietal y dan respuesta a los requerimientos tradicionales pero además facilitan su análisis interpretativo de modo georreferenciado y contextual, su reproducción y animación, la difusión de resultados a través de Internet, etc.

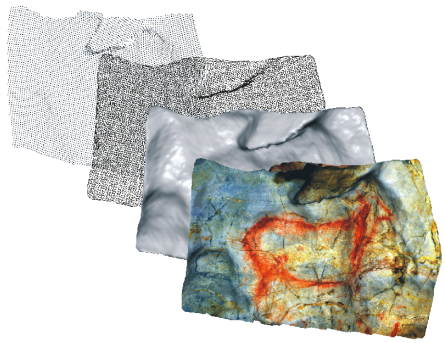


Figura 3: Flujo de trabajo utilizado en la captura y modelización 3D de Arte Parietal.

Gracias a la tecnología digital, el rostro se separa de la pared sin distanciarse, se dirige hacia la oscuridad y se aleja para ver "de cerca"... La mirada se ubica por fin en un punto impropio, en el lugar donde las ortoimágenes se depositan sobre mallas triangulares, en un nuevo firmamento... Se trata de información métrica rigurosamente obtenida a la que asociamos fotogramas

de alta calidad; escenas iluminadas e iluminables, reversibles, proyectables, cuasi táctiles, semi-olorosas...; tal vez arte sobre arte.

CUEVAS OBJETO DE ESTUDIO

Para la realización de este trabajo se han elegido dos cuevas Asturianas, con diferentes tipos de arte rupestre (grabados y pinturas).



Figura 4: Mapa de situación de las cuevas.

Cueva de La Lluera
(Coordenadas: 43.33467,- 5.93395)

La cueva o abrigo de La Lluera se encuentra en San Juan de Priorio (Oviedo). Los niveles de ocupación humana, corresponden al solutrense (21000 a 16500 BP) y se relacionan también con la pesca del salmón.

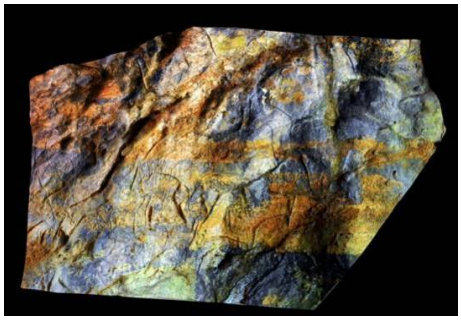


Figura 5: Vista 3D de un caballo y un uro en la Gran Hornacina de La Lluera.

Lavado por las crecidas del Río Nalón y la interna escorrentía superficial. El arte rupestre del abrigo se limita exclusivamente a grabados. Los animales representados son mayoritariamente uros, ciervas y caballos. Completan el repertorio formal algunas cabras y un posible mamut.

Cueva de El Pindal
(Coordenadas: 43.39763,- 4.53272)

Próxima al mar, la cueva de El Pindal se encuentra en el extremo oriental del Principado de Asturias, cerca de la localidad de Pimiango. Húmeda y fría, está constituida por una galería de 360 metros de longitud a través de la cual el agua discurre estacionalmente. El arte rupestre de la cueva lo constituyen grabados y pinturas, entre las que destacan, por su infrecuente presencia en las cuevas franco-cantábricas y por la dificultad de su adscripción taxonómica, un mamut y un pez. Su antigüedad se cifra entre 14500 y 12000 años BP.

A 240 metros de la entrada de la cueva se encuentra el llamado Panel Principal: la mayor concentración de representaciones artísticas de la cueva que se extiende a lo largo de 20 metros.



Figura 6: Detalle de la zona central del Panel Principal; tal vez un uro.

La figura más significativa estéticamente de este panel es una cierva pintada y acomodada en la pared; una bofetada roja hecha con trazo firme y seguro que conmueve al espectador y le invita a acercarse, a tocar, a confirmar nuestra temporal asistencia al lugar...

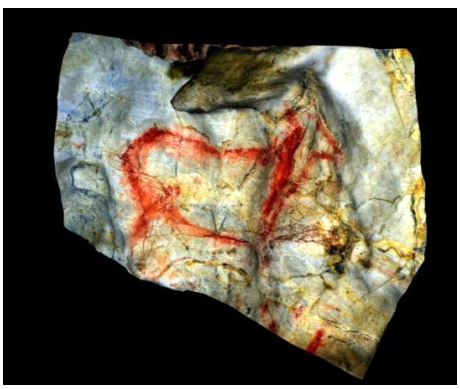


Figura 7: Cierva 3D.

Más adelante un pez, tal vez un salmón, finamente grabado y superpuesto a tres manchas, llama la atención tanto por su rareza en el arte paleolítico cantábrico como por la manifiesta solvencia de la mano que traza su contorno.

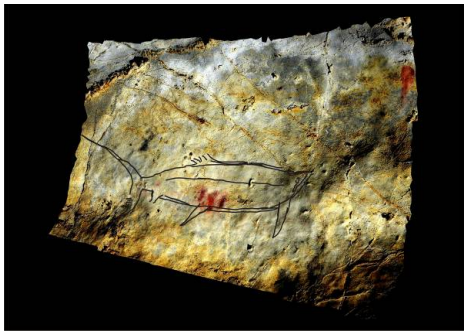


Figura 8: Modelado 3D del pez y retintado.

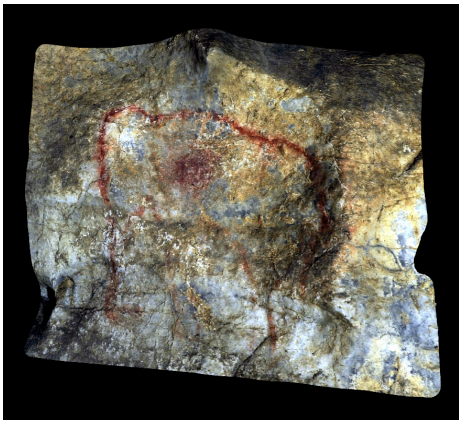


Figura 9: Mamut 3D de El Pindal.

En la parte más profunda de la cueva, se encuentra un mamut, la figura más conocida de El Pindal y el logotipo identitario de esta cavidad.

TRABAJOS DE DOCUMENTACIÓN

Los trabajos de documentación comprenden la iluminación, el fotografiado y escaneado 3D de varias figuras de arte rupestre, que se localizan en las cuevas anteriormente descritas. Para ello se ha empleado una estación total Trimble VX Spatial Station, que permite combinar técnicas topográficas de escaneado 3D (medición automatizada de ángulos y distancias mediante distanciometría láser) + tradicionales y un equipo fotográfico profesional Nikon D-700.

El procesado de los datos adquiridos en ambas cuevas fue realizado con el software Trimble RealWorks, que posibilita registrar, visualizar, explorar y manejar datos de nubes de puntos capturados con un sensor de Trimble Spatial Imaging. Se emplearon las potentes herramientas de modelado y edición de mallas que incorpora este software, para generar el modelo tridimensional, al que se adosaron ortofotografías digitales de alta resolución - previamente tratadas- que texturizan el modelo 3D.

CONCLUSIONES

Con este trabajo, apenas esbozado, pretendemos acercarnos - de un modo diferente - a los dibujos y símbolos que nuestros antepasados realizaron como medio de transmisión de conocimiento.

La tecnología geomática nos permite rendirnos a la magia del grafismo primigenio, de su trazado críptico, superpuesto o evidente; observarlo y hacerlo observable en su tridimensionalidad, en su oscuridad, en la certeza de su identidad...

Nos gustaría sentir y hacer sentir a través de las líneas, colores y volúmenes de estos bienes heredados (PATRIMONIUM) el enigmático y contradictorio fluido que llamamos VIDA. Una vida que se debate hoy entre la ignorancia y la presunción, entre la provocación y el miedo pero sobre todo ante el progresivo anquilosamiento de un ancestral instinto.

" Documentar es proteger y compartir."

BIBLIOGRAFÍA

GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego, 2009. *3D digital surveying and modelling of cave geometry: Application to paleolithic rock art*. Sensors, 9(2), pp. 1108-1127.

GONZALEZ-AGUILERA, Diego, 2009. *Recording and modeling paleolithic caves through laser scanning*. International Conference on Advanced Geographic Information Systems and Web Services 2009, pp. 19-26.

GONZALEZ-AGUILERA, Diego, 2010. *New tools for rock art modelling: Automated sensor integration in Pindal Cave*. Journal of Archaeological Science, 38(1), pp. 120-128.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a TRIMBLE España, su colaboración con la cesión de la estación total Trimble VX y el software REALWORKS, para la realización de este trabajo.

Procesado de las imágenes de alta resolución del PNT

J. Tejeiro, J. Peces , S. Luaces y J.A. Martínez

Servicio de Teledetección, Instituto Geográfico Nacional. C/ Gral Ibáñez de Ibero n 3 28003 Madrid (Madrid, España). Correo electrónico: jatejeiro@fomento.es

RESUMEN

Descripción de la metodología empleada en el tratamiento de la cobertura de imágenes de alta resolución del Plan Nacional de Teledetección, que está formada por imágenes Spot5, pancromáticas supermode y multiespectrales simultáneas en el tiempo y con un nivel de preprocesado 1 A.

Palabras clave: Corrección geométrica y radiométrica, Spot 5, PNT

ABSTRACT

Description of the methodology used in the treatment of covering high-resolution images of the National Remote Sensing Program, which consists of images Spot5, Supermode panchromatic and multispectral simultaneous in time and processed with a 1 A Level.

Keywords: *Radiometric and geometric correction, Spot5, PNT*

INTRODUCCIÓN

El Plan Nacional de Teledetección, proporciona una cobertura anual con imágenes Spot 5, se adquieren simultáneamente una imagen multiespectral y una pancromática "supermode" con 2.5 metros de resolución espacial, se reciben con un nivel de procesado 1 A. Este nivel de procesado no es suficiente para la mayoría de usuarios.

ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS Y NECESIDADES DE USUARIOS

Para determinar la metodología, hay que estudiar las necesidades de los usuarios de estas imágenes. Se han determinado cuatro tipos de usuarios de las imágenes de satélite.

Un primer usuario, avanzado, este usuario generalmente quiere la imagen lo menos alterada posible, para obtener reflectividades, y a partir de ahí realizar tratamientos avanzados como extracción de variables continuas y parámetros biofísicos. Para este tipo de usuarios el producto que podría resultar interesante sería la imagen corregida geométricamente.

Hay un segundo tipo de usuarios, que utilizan las imágenes para fotointerpretar. Para este tipo de usuarios es importante disponer de las diferentes combinaciones de bandas que se puedan obtener a partir de la imagen de satélite.

El tercer tipo de usuario es aquel que utiliza las imágenes para la actualización cartográfica. Este tipo de usuario precisa de mosaicos extensos con las imágenes mas recientes.

El último usuario es aquel que quiere poner la imagen en visores cartográficos, en este caso además de proporcionar el mosaico, este deberá tener un aspecto homogéneo y visualmente aceptable.

METODOLOGÍA

Corrección geométrica

Se hará un ajuste en bloque, este bloque se guardará para incorporar en él las imágenes de los años sucesivos, es decir se trata de un bloque incremental, cada vez que llega una imagen se añade al bloque aprovechando los puntos dados en años anteriores.

Los resultados se ajustarán a las especificaciones técnicas del documento http://www.ign.es/PNT/pdf/especificaciones-tecnicas-pnt-altar-spot5-2010.pdf.

Fusión

El propósito de la fusión de imágenes es el de obtener una única imagen multiespectral de alta resolución espacial, que mantenga la información radiométrica y espectral de la multiespectral de partida y a la que se haya incorporado el detalle espacial de la pancromática.

La Universidad Pública de Navarra ha desarrollado un nuevo algoritmo denominado FAST SRF, que tiene en cuenta las curvas de sensibilidad espectral de los sensores HRG de SPOT 5.

Para evaluar la calidad de las fusiones se utiliza el índice ERGASespectral para estimar la calidad espectral global de la imagen fusionada. Este índice tiene en cuenta la media y la desviación estándar de la imagen diferencia entre la multiespectral de partida y la fusionada. Cuanto menor es el valor de esta índice, menor es la diferencia radiométrica entre las imágenes multiespectral de partida y la fusionada y por tanto, mayor la calidad espectral de esta última. Además la calidad espacial global se estima, como en el caso anterior, a través del índice ERGASespacial. Cuanto menor sea el valor de este índice, menor es la diferencia de información espacial entre la imagen fusionada y la pancromática y por lo tanto mayor es la calidad espacial de la primera.

	AW	AWm	AWLP	AWPC	FAST-SRF
ERGASespectral	2.989	2.295	2.257	2.253	2.245
ERGASespacial	3.676	3.860	3.862	3.951	3.411
ERGASGLOBAL	3.332	3.078	3.06	3.102	2.828
Coste Computacional	228	888	262	316	56

Tabla 1: Comparativa de los diferentes métodos de fusiones. AW (Wavelet Aditivo), AWm (Wavelet Aditivo con "match" de histogramas), AWLP (Wavelet aditivo empleando la transformación IHS rápida), AWPC (Wavelet Aditivo utilizando empleando el método de componentes principales).

En la anterior tabla (tabla 1) se muestran los valores del índice ERGAS espectral y ERGAS espacial obtenidos al comparar cada imagen fusionada con la multiespectral y con la pancromática respectivamente (González-Audícana et al, 2005). Además, se incluye el coste computacional (número de operaciones por píxel) de cada método.

La conclusión es que el FAST SRF es el que tiene mejor relación calidad / coste computacional. Dado el gran volumen de información a procesar, este es el algoritmo utilizado para realizar las fusiones.

Equilibrado radiométrico

Debido a los cambios en las condiciones de toma (altura y acimut del sol, ángulo de incidencia, condiciones atmosféricas...) así como la calibración del sensor y los cambios en el terreno (humedad, vegetación, topografía...), las imágenes difieren mucho unas de otras (figura 2).

Hay dos enfoques para afrontar este problema *(Guillermo Villa, 1993)*:

1) *Corrección física o "determinista"*: intentar conocer todas las circunstancias de la toma de la imagen y modelarlo.

2) *Corrección "empírica"*: aplicar una transformación a cada imagen que iguale los valores digitales de las distintas imágenes para esas zonas comunes.

Si lo que buscamos no es una corrección completa o "calibración absoluta" de las imágenes, conformándonos con una calibración o corrección "relativa" que elimine las diferencias entre unas imágenes y otras debidas a todas las causas explicadas anteriormente, podemos acudir a un método empírico de corrección.

- Sean las estadísticas en el área de control:
  (μ_1, σ_1) para la imagen 1
  (μ_2, σ_2) para la imagen 2

Si llamamos x_1 a los valores radiométricos en la imagen 1, y x_2 a los de la imagen 2, la transformación a aplicar será de la forma:

$$x_1 = a \cdot x_2 + b \qquad (1)$$

La constante multiplicativa **a** se suele llamar Ganancia, y la constante aditiva **b** se suele llamar Bias u Offset.

$$a = \sigma_1 / \sigma_2 \qquad (2)$$
$$b = \mu_1 - (a \cdot \mu_2) \qquad (3)$$

Este proceso equilibraría una imagen con respecto a otra . En el caso que nos ocupa tenemos que equilibrar más de doscientas imágenes (figura 1).

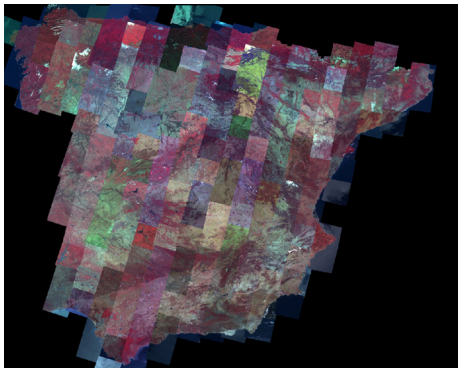


Figura 1: Mosaico de las imágenes Spot 5 de la Península, en la combinación RGB = 321, sin equilibrar.

El método que proponemos es utilizar una única imagen de referencia a la que ajustaremos todas las demás (figura 2).

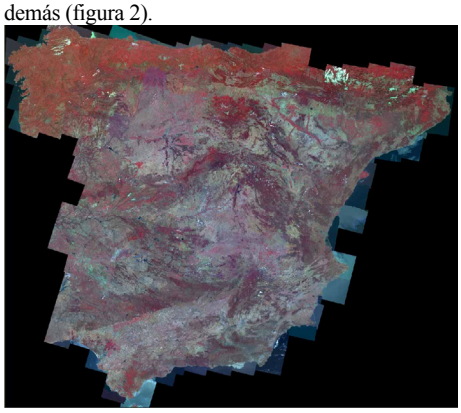


Figura 2: Mosaico de las imágenes Spot 5 de la Península, en la combinación RGB = 321, equilibradas.

Generación de combinaciones de bandas

Para nuestro caso el satélite Spot 5 disponemos del verde, rojo, infrarrojo cercano, e infrarrojo medio. En función de que banda asignemos a cada cañón de color tendremos diferentes combinaciones de bandas (tabla 2)

	Azul	Verde	Rojo	NIR	SWIR
Bandas Landsat	1	2	3	4	5
Bandas Spot 5		1	2	3	4

	Cañones	Rojo	Verde	Azul
Falso color clásico	Landsat	4	3	2
	Spot 5	3	2	1
Falso color Corine	Landsat	4	5	3
	Spot 5	3	4	2
Color natural	Landsat	3	2	1
	Spot 5	2	1	azul*
Pseudoolor Natural	Landsat	5	4	3
	Spot 5	4	3	2

Tabla 2: Cuadro con las combinaciones de bandas obtenidas a partir de la imagen Spot5, relacionadas con las imágenes Landsat.

Para obtener el color natural hay dos opciones, generación de una banda azul sintética, o si el propósito es simplemente obtener una visualización en color natural, como es el caso, utilizar algoritmos de generación de imágenes en color natural (tabla 3).

ROJO	VERDE	AZUL
Banda Roja	Banda verde modificada (5*Verde+NIR+SWIR)/7	Banda Verde

Tabla 3: Algoritmo utilizado para visualización en color natural.

Otra combinación utilizada es el pseudocolor natural SIOSE que combina al 50 % el color natural y el RGB = 432. Esta combinación de bandas tiene la ventaja de que en ella intervienen las cuatro bandas del Spot, conserva un aspecto visual parecido al color natural, pero los colores de la vegetación están más vivos con lo que se facilita la fotointerpretación (figura 3).

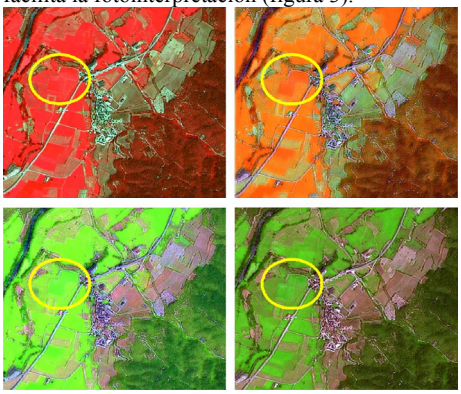


Figura 3: Detalle de una zona, en las diferentes combinaciones de bandas. *De arriba a abajo y de izquierda a derecha:* **a)** RGB= 321; **b)** RGB=342; **c)** RGB=432; y **d)** Pseudocolor natural Siose.

Mosaicado

Para la obtención de un mosaico donde se disimulen las zonas de transición de una imagen a otra se deben generar las líneas de corte óptimas para cada caso. Estas líneas deben evitar zonas con nubes y a su vez tener en cuenta las fechas de las imágenes.

Además del ajuste radiométrico y geométrico mencionado en apartados anteriores, para que la línea de corte no suponga una línea brusca de discontinuidad entre escenas, se hará un paso gradual en el proceso de unión. A esto se le llama Feathering y consiste en una transición gradual en la línea de corte. Esta línea no divide la

aportación de cada una de las escenas entre 0% y el 100%, si no que la aportación a ambos lados de la línea de corte es muy pequeña en la escena que tiende a desaparecer y muy elevada en la otra. Es decir, esta aportación va variando progresivamente hasta pasar a la aportación definitiva de cada escena.

Finalmente se generará una imagen continua de toda la Península, Ceuta y Melilla, a partir de las escenas individuales ajustadas, en sistema ETRS89 UTM (huso 30 extendido). Para Canarias, se generará un mosaico independiente con las mismas características pero en REGCAN 95.

Realce

El realce se aplica para producir un mejor aspecto visual, mediante una expansión lineal del contraste, y una gamma. Vamos a aplicar el realce de imágenes sobre dos productos distintos, primero sobre las combinaciones de bandas, de cada imagen sin equilibrar. Esto se hace así porque el equilibrado es útil para mosaicar pero contamina el aspecto original de la imagen, por lo que para fotointerpretar es mejor utilizar la imagen sin equilibrar y a ser posible realzada.

También vamos a realzar los mosaicos, en este caso determinamos un único realce para cada combinación de bandas y lo aplicamos a todos los mosaicos (figura 4).

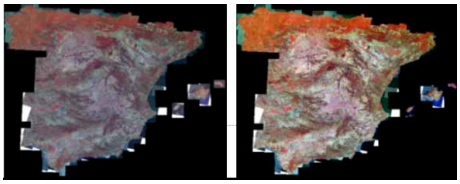


Figura 4: Realce del mosaico de la Península y Baleares en combinación RGB = 321. De izquierda a derecha. **a)** Mosaico sin realzar; **b)** Mosaico realzado.

Para los mosaicos hay otra alternativa interesante, el realce adaptativo, determina realces distintos para cada elemento de una cuadrícula en el terreno.

Se ha hecho una prueba con un mosaico a baja resolución, con un tamaño de pixel de 100 metros, en el se ha utilizado una cuadrícula de 100 kilómetros de lado. Determinaremos el realce para cada uno de los cuadrados, de forma que tendremos un factor multiplicativo y otro aditivo para cada una de las bandas. Esto se puede expresar por medio de dos imágenes RGB una con los factores multiplicativos y otra con los aditivos, después se aplica una transición suave de los coeficientes de la transformación lineal para evitar diferencias radiométricas en el resultado final.

CONCLUSIONES

Se ha explicado brevemente la metodología seguida en el procesado de las imágenes de alta resolución del PNT.

Para la corrección geométrica se ha optado por un ajuste en bloque incremental, permitiendo la reutilización de los puntos de control dados en años anteriores. Para la fusión se ha optado por el método Fast SRF, debido a su buena relación calidad / coste computacional. Para el equilibrado se ha optado por un método empírico, ya que no buscamos una calibración absoluta si no una corrección relativa, además se han expuesto las diferentes combinaciones de bandas que se suministrarán a los usuarios y los tipos de realces que se le van a aplicar, un realce distinto para cada imagen y combinación de banda. Además de otro realce que se le aplicará a los mosaicos, uno para cada combinación de banda. Debido a la variedad de paisaje de España este realce puede saturar determinadas zonas, para evitar este efecto se utilizará el realce adaptativo.

BIBLIOGRAFÍA

GONZÁLEZ-AUDÍCANA, M., OTAZU, X., FORS, O.Y ALVAREZ-MOZOS, J., 2005. *Introduction of Sensor Spectral Response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods*. vol. 43, no10, pp. 2376-2385.

GUILLERMO VILLA ALCÁZAR, MIGUEL ÁNGEL FERNÁNDEZ MONTOSO 1993. *Ajuste Radiométrico Conjunto de Varias Imágenes de Satélite Para la Realización de Mosaicos de Ortoimágenes*. V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Las Palmas.

TEJEIRO, J.A., 2010. *Procedimiento Operativo Estándar. Plan Nacional de Teledetección. Procesado Básico Alta Resolución*. IGN. Madrid.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a María González-Audícana, y a Guillermo Villa la colaboración prestada.

Producción de Ortofotos Históricas para la generación de bases de datos temáticas. Cartografía de usos y coberturas del suelo (REDIAM)

J.J. Vales[2], I.R. Carpintero[2], L. Granado[2], E. Méndez[2], G. Montoya[2], I. Pino[2], R. Prieto[2], F. Giménez de Azcarate[2], F. Cáceres[1] y J. M. Moreira[1]

[1] DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO SOSTENIBLE E INFORMACIÓN AMBIENTAL. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Avda. Manuel Siurot, 50, 41071. Sevilla (España). Telf: 955003429, Fax. 955003795. Correo electrónico: {josem.moreira, francisco.caceres}@juntadeandalucia.es

[2] DEPARTAMENTO DE COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN. Agencia de Medio Ambiente y Agua, Johan Gutenberg, 1 (Isla de la Cartuja), 41092 Sevilla (España). Telf: 955044529, Fax. 955625140. Correo electrónico: {fgimenezdeazcarate, jvales, emendez, gmontoya, icarpintero, ipino, lgranado, rprieto}@agenciademediambienteyagua.es

RESUMEN

Con objeto de dotar de información multitemporal a las cartografías temáticas en diferentes ámbitos competenciales de la CMA y en especial la cartografía de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo, es necesario partir de la información histórica disponible y concretamente de los vuelos fotogramétricos históricos a partir de los cuales generar las Bases de Referencia Territoriales Históricas. Para ello, desde la Rediam se ha llevado a cabo la Ortorectificación de vuelos con cobertura completa regional: Vuelo americano de 1956; Vuelo Interministerial de 1977-78 (comúnmente denominado IRYDA) y Vuelo General de 1984-85. El artículo describe el proceso y metodología desarrollada para la obtención de Bases de referencia a partir de la ortorectificación de varios vuelos de todo el ámbito regional, cuyo desarrollo tiene ciertas variaciones respecto al proceso fotogramétrico clásico debido a que se trata de documentación histórica.

Palabras Clave: Vuelo Fotogramétrico, Ortofotografía, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), Aerotriangulación.

ABSTRACT

With the aim of giving multi-temporal information to the thematic cartography produced by the Regional Ministry of Environment of Andalusia (Spain), especially the land use and vegetation cover cartography, the use of historical photogrammetric flights has been considered to generate historical reference maps. REDIAM has carried out the ortho-rectification of the whole regional photogrammetric flights: the American flight (1956), the Inter-ministerial or IRYDA flight (1977-78) and the General Flight of Spain (1984-85). This paper describes the process and the methodology developed to obtain reference maps from the ortho-rectification of different flights covering the whole region of Andalusia (Spain). The process is different than the classic photogrammetric process due to the use of historical references.

Keywords: *Photogrammetric flight, Orthoimage, Digital Elevation Model (DEM), Reference Mapping, Aerotriangulation.*

INTRODUCCIÓN

La CMA tiene un gran interés en la formación y actualización de bases de datos geográficas fiables y consistentes, para dar soporte al desarrollo de sus competencias en materia de medio ambiente. Entre éstas, destacan las Bases de Datos de Cartografía de Usos y Coberturas del Suelo que se iniciaron a escala 1:25.000 en 1999 y se han venido actualizando con una periodicidad de 4 años (2003, 2007,…) a partir de imágenes de Ortoimágenes de satélite y Ortofotografías aéreas.

Para llevar a cabo un análisis mutitemporal del territorio en un período de tiempo más amplio y dotar de información histórica de detalle a estas BDG, es necesario partir de vuelos fotogramétricos históricos que se han realizado en diferentes años y con diferentes objetos sobre el territorio nacional, y concretamente los que lo cubren totalmente (Ver Tabla 1). En base a disponibilidad y cobertura regional, la CMA ha llevado a

cabo la Ortorectificación de los vuelos que marcan hitos o son de mayor interés desde el punto de vista medioambiental.

Estos procesos generan una serie de productos (Ortofografías, MDE, Fotogramas Orientados,…) que conforman las Bases de Referencia Histórica complementando a las Bases de Referencia actuales de la Rediam.

Los primeros trabajos se iniciaron en 2004 sobre el vuelo americano de 1956 b/n 1:33.000 (Serie B). Posteriormente, en 2008 se ha continuado con el Vuelo Interministerial de 1977-78 b/n a escala 1:18.000 (comúnmente denominado IRYDA) y con el Vuelo General de España de 1984-85, b/n a escala 1:30.000. Actualmente se dispone de la Cartografía de Usos y Coberturas Vegetales de 1956 y se está produciendo la correspondiente a los otros dos vuelos históricos en base a las Ortofotografías y Modelos Digitales obtenidos.

VUELOS DE INTERÉS AMBIENTAL

AÑO	VUELOS	ORGNANISMO	ESCALA	PELIC.
1945-1946	Americano. Serie A	AMS	44.000	B/N
1956-1957	Americano. Serie B	AMS-CECAF	33.000	B/N
1967-1968	Nacional. Serie C.	MFOM (IGN).	33.000	B/N
1977-1983	IRYDA	MAPA-MFOM-MDEF-MEH	18.000	B/N
1982-1992	Territorial	Junta de Andalucía (COPT)	25.000	B/N
1984-1985	Nacional. Serie D	MFOM (IGN).	30.000	B/N
1989-1990	Vuelo Costas	D.G. Costas	5.000	Color
1987-1990		MAPA (INDO) - CATASTRO	18.000	B/N
1991-1996	Territorial	Junta de Andalucía.	20.000	B/N
1992-2005	Vuelo Quinquenal. Serie 40.000	CECAF	40.000	B/N
1995-1996	Territorial	Junta de Andalucía (COPT)	60.000	Color
1996-2000	General	MFOM (IGN).	40.000	B/N
1997-1998	Olystat	MAPA	40.000	B/N
1998-1999	Territorial	Junta de Andalucía (COPT-CAP-CMA)	60.000	Color
1999-2003	Vuelo Quinquenal. Serie 40.000.	MFOM (IGN).	40.000	B/N
2001-2002	Andalucía	Junta de Andalucía (COPT-CAP-CMA)	20.000	B/N
2004-2007	Vuelos recientes	Junta de Andalucía (COPT-CAP-CMA)- MFOM (IGN)	NP	Color
2008-2009	Vuelos recientes	Junta de Andalucía (CVOT)-MFOM (IGN)	NP	Color
2010-2011	Vuelos actuales	Junta de Andalucía (CVOT)-MFOM (IGN)	NP	Color
2005-2015	Vuelo Quinquenal. Serie 40.000	CECAF	40.000	B/N

Tabla 1: Vuelos Fotogramétricos Históricos y actuales sobre ámbito regional de Andalucía. (Cian: Vuelos de interés; Amarillo Vuelo de referencia (2001-02); Blanco: Otros).

Ante la disponibilidad, estado y cobertura, la CMA en su interés en los vuelos anteriores a 1997-98, para realizar una evaluación del estado del territorio tanto desde el punto de vista de los cambios como de la conservación de los usos del suelo, selecciona 3 vuelos de interés ambiental. Algunos aspectos para elección de estos vuelos**:**

1956-57, Vuelo americano (Serie B): Además del detalle del territorio proporcionado por este (relacionado directamente con su escala de realización, 1:33.000) frente al obtenido con el vuelo de la Serie A (1945-46) existen otros aspectos relevantes vinculados a la fecha de obtención. Tiene una gran importancia urbanística, ya que coincide con la aprobación en 1956 de la primera Ley del Suelo estatal española, es por ello que las administraciones públicas han considerado legal aquellas edificaciones que aparecen en estas fotografías, sin considerar otros elementos como las licencias y autorizaciones (1956-2007, Medio Siglo de Cambios en Andalucía).

1977-78, Vuelo Interministerial (IRYDA). Resulta de un gran interés por la calidad de conservación, cobertura territorial pero sobre todo por el detalle que ofrece del territorio debido a la escala con la que fue realizado (1:18.000) comparable con el vuelo b/n de 2001-02. Constituye el punto intermedio entre 1956 y otros más actuales que han sido ortorectificados (Olystat 1997-98, y Territorial de Andalucía 1988-89). Sin olvidar la aportación que realizaría a Ley de Espacios Naturales Protegidos de reciente creación (1975), este vuelo precedió a la época constitucional española, marcando un hito importante referenciar los grandes cambios socioeconómicos que marcaron el territorio nacional pero más concretamente la región andaluza en los años posteriores. Entre otros, en relación a las actuaciones forestales, estas imágenes suponen un antes y un después en relación a las actuaciones de repoblaciones forestales.

1984-85, Vuelo General de España. Aunque en Andalucía se disponía de otro vuelo de la misma época (Territorial de Andalucía), este vuelo proporciona un detalle del territorio mucho mayor (escala 1:30.000). Este tiene una relevancia nacional ya que aporta una visión del territorio previa a la incorporación de España en la Unión Europea (1986) y a los cambios que la Política Agraria Común (PAC) provocaría en el territorio nacional pero muy especialmente en Andalucía. Además este vuelo precedió la implantación del Plan Forestal de Andalucía (1989). Mencionar que en 1984 se crea la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (AMA) que daría lugar a la CMA en 1996. Por otro lado, en esta época coincidiendo con la aparición de los SIG en Andalucía, se crearía el Sistema de Información Ambiental (SinamabA) que precedió a la REDIAM

COLABORACIONES INSTITUCIONALES.

El desarrollo de estos trabajos ha sido posible en base a una serie de colaboraciones institucionales entre la CMA y otros organismos:

CECAF (Abril de 2006). El CECAF (MDEF) aporta los fotogramas (7243 que cubren Andalucía) para su posterior escaneado por parte de la CMA.

CNIG (Octubre de 2008). El CNIG (MFOM) proporciona a la CMA las colecciones de fotogramas escaneados tanto 1977-78 como de 1984-85 (disponibles con 20%p) de trabajos realizados previamente. Por otro lado, el CNIG responsable de la custodia del vuelo de 1984, prestará la colección completa de negativos del vuelo 1984-85 para completar la colección de fotogramas escaneados de dicho vuelo (es decir con 60%p) y algunos fotogramas del vuelo 1977-78 que custodia.

MMAMRyM. Mediante esta colaboración, el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (responsable de la custodia de la mayor parte del vuelo de 1977-78), prestará la colección completa de negativos de este vuelo para completar igualmente la colección de fotogramas escaneados (60% de recubrimiento).

METODOLOGÍA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

La metodología seguida es similar a la seguida para vuelos con cámaras fotogramétricas analógicas (ya en desuso). Comprende las fases: Recopilación de información del vuelo (VF); escaneado de fotogramas (ES); definición de bloques de trabajo; obtención de puntos de apoyo de segundo orden (AC); Aerotriangulación (AT); actualización hacia atrás del MDE (EL); Ortorectificación, ajuste radiométrico (homogeneización) y mosaicado (OF). La principal diferencia respecto al proceso clásico de un vuelo actual son las limitaciones en cuanto a disponibilidad de posición para los CDP y la obtención de puntos de apoyo, imposibilitando en muchos casos la obtención de puntos sobre las fotografías históricas.

Datos de Partida

Disponer de productos previos aporta la posibilidad de reutilización en los procesos de Ortorectificación ya sean hacia adelante (sobre vuelos actuales) o hacia atrás (sobre vuelos históricos). Esto redunda en calidad del proceso y consistencia geométrica interna y externa. Se ha hecho uso de: Red de Puntos de Apoyo (RPA) de la Rediam; el MDE de mayor calidad y antigüedad (2001-02); y de los certificados de calibración disponibles de los vuelos históricos.

Recopilación y Escaneado (ES)

En base a las relaciones institucionales establecidas por la CMA para la obtención de los vuelos fotogramétricos de interés, se han llevado a cabo procesos de recopilación tanto de documentación en formato analógico (fotogramas, gráficos de vuelo, certificados de calibración disponibles,...) como en digital (fotogramas disponibles, Bases de Datos de centros de proyección,...). Ha sido necesario realizar unos controles de calidad previos a los procesos de producción para tener controlada tanto la documentación, como sus limitaciones (cobertura territorial, disponibilidad,...). (Ver Tabla 2).

ORG.	VUELO	ESCALA	Nº FOTOS	RESOL. ESCAN (µm)	ESCANEADO	Foto GSD (m)	Orto GSD (m)
Junta And.	2001-02	20.000	27.000	15	Realizado en el Proyecto	0,30	0,5
CECAF	1956-57	33.000	7.243	21	Realizado en el Proyecto	0,69	1
MMAMRyM	1977-78	18.000	13.650	25	50% CNIG (Cobertura al 20%p)	0,45	0,5
			13.650	25	Realizado en el Proyecto		
			27.300	15	Opción desechada	0,27	0,5
MFOM	1984-85	30.000	4.500	25	50% CNIG (Cobertura al 20%p)	0,75	1
			4.600	25	Realizado en el Proyecto		
			9.000	15	Opción desechada	0,45	0,5

Tabla 2: Características básicas: VF y ES.

Apoyo Topográfico de Campo (AC) y Aerotriangulación (AT)

La mayor parte de los puntos de la RPA (con coords XYZ en campo= Apoyo de 1er Orden) resultaban identificables. Por ello se ha recurrido a la utilización de puntos con obtención directa de XYZ sobre pares estereoscópicos (Apoyo 2º Orden) para 1977-78 y 1984-85. Para la Orientación del Vuelo de 1956-57 se recurrió incluso a la obtención de puntos sobre la Ortofotografía (XY) e interpolación sobre el MDE (Z), ambos productos correspondientes al Vuelo de 2001-02. (Ver Tabla 3).

VUELO	COORDS.	FUENTE DE INFORMACION	PUNTOS DE APOYO	Nº BLOQ AT	TAMAÑO BLOQUES AT	PRECISION BLOQUES AT
2001-02	X, Y, Z	GPS...	Control	76	Hojas 100 2x 2 Hojas 50 ó variaciones	GSD Vuelo
	X, Y, Z	GPS...	Check			
	X, Y, Z (*)	Vuelo 2001-02	Paso y Enlace			
1956-57	X, Y	Orto 2001-02	Control	41	Irregular	NO
	Z	MDE 2001-02	Control			
	X, Y, Z (*)	Vuelo 1956	Paso y Enlace			
1977-78	X, Y	Vuelo 2001-02	Control (Esqu Bloqu)	25	Aproximad 3x3 Hojas 50 ó variaciones	GSD Vuelo
	Z	Vuelo 2001-02	Control (Interior Bloqu)			
	X, Y, Z	RPA	Check (Interior Bloq)			
	Z	Vuelo 2001-02 (Cálculo)	Paso y Enlace			
	X, Y, Z (*)	Vuelo 1977-78	Paso y Enlace			
1984-85	X, Y, Z	Vuelo 2001-02; Olystat 1998; Vértices Geod; RPA	Control	14	Aproximad 5x5 Hojas 50 ó variaciones	2xGSD Vuelo
	X, Y, Z	Vuelo 2001-02; Olystat 1998; Vértices Geod; RPA	Check			
	X, Y, Z (*)	Vuelo 1984-85	Paso y Enlace			
	(*)	Calculadas				

Tabla 3: Características básicas: AC y AT.

MDE del terreno (EL)

El escaneado de las colecciones completas de fotogramas (fundamentalmente en los vuelos de 1977-78 y 1984-85) ha posibilitado un cálculo de aerotriangulaciones más riguroso y clásico. Este hecho ha posibilitado la edición interactiva sobre el MDE de partida. Este hecho es imposible con recubrimiento de fotogramas del 20%. Además

contar con un MDE adaptado al terreno mejora la calidad geométrica de las Ortofotografías. Se ha utilizado el MDE del vuelo de 2001-02 como producto de partida para realizar su actualización "hacia atrás" hasta las fechas de los vuelos (Villa, G. 2008). (Ver Tabla 4).

VUELO	OBTENCION DE MDE	MALLA MDE (m)	MDE RMSE (Z)	ORTOFOTO GSD (m)	ORTOFOTO RMSE (X; Y)	MDE RMSE (Z) Puntos de AT
2001-02	Vuelo 2001-02 Correlación + Breaklines + Edición	10	2	0,5	1	1
1956-57	MDE de 2001-02 (Sin edición)	10	NP	1	NP	
1977-78	MDE de 2001-02 (Edición = Actualización hacia atrás)	10	2	0,5	1	1
1984-85	MDE de 2001-02 (Edición = Actualización hacia atrás)	10	2	1	2	1

Tabla 4: Características básicas EL y OF.

Generación de Ortofografías (OF)

Además de la Ortorectificación de los fotogramas se han llevado a cabo ajustes radiométricos y mosaicado de fotogramas para obtener productos geométrica y radiométricamente continuos en todo el territorio. (Ver Tabla 4).

RESULTADOS Y DIFUSIÓN

Todos los productos obtenidos en los 3 proyectos de Ortorectificación se integran en el Catálogo de Información Ambiental de la REDIAM y se ponen a disposición de los usuarios mediante las vías más adecuadas (accesibles a través del Canal de la Rediam): Servicios OGC (WMS), Visor-Descargas de Imágenes del Territorio, ediciones en DVD,… (Ley 27/2006 de acceso…) . (Ver Figura 1).



Figura 1: Ejemplo de evolución del territorio.

CONCLUSIONES

Para la obtención de cartografía temática con rigor geométrico son necesarios procesos de Ortorectificación de los vuelos. Es fundamental disponer de la totalidad de fotogramas (recubrimiento 60%) para hacer más ágiles y robustos los procesos de AT, además es imprescindible para la edición del MDE (actualización hacia atrás) y por tanto mejorar la calidad de la Ortofotografía. Es fundamental la reutilización de productos disponibles (puntos de apoyo, MDE,…) para que los productos obtenidos tengan una coherencia geométrica interna y externa y el ahorro de costes en la producción.

La metodología utilizada es válida para otros vuelos y zonas del territorio. Los vuelos utilizados de referencia (apoyo) deben ser similar o mayor escala que los que se pretende ortorectificar y homogéneos sobre todo el territorio. A nivel nacional se dispone de estos vuelos (PNOA) orientados (y sus MDE, Ortos correspondientes). Las Ortofotografías obtenidas responden perfectamente a las necesidades de fotointerpretación y producción de Cartografía de Usos del Suelo y Coberturas Vegetales. Las diferencias de MDE proporcionan cambios bruscos de uso del suelo (embalses, infraestructuras,…).

BIBLIOGRAFÍA

AROZARENA VILLAR, A. (2009) *El PNOT en España como sistema básico de información del Medio Ambiente*. CONAMA´0.

Catálogo de Información Ambiental. Rediam. *http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/rediam/*

Estrategia Forestal Española y Plan Forestal de España. MMAMRyM. Área de Medio Ambiente. *http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/montes_politica_forestal/estrategia_monte/*

HERMOSILLA CÁRDENAS, F.J. (2010). *PNOA 25-50 cm. Estado actual*. Asamblea PNOA. Toledo, 4 Marzo 2010.

LEY 27/2006 de 18 Julio, sobre derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de Medio Ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE). BOE nº 171 de 19 Julio 2006).

REAL DECRETO 1071/2007, de 27 Julio, por el que se regula el Sistema Geodésico de Referencia Oficial en España. BOE nº 207 de 20/08/2007, pp35986-35989.

VILLA, G. *Aspectos Técnicos y Económicos del PNOA Histórico*. Jornada Técnica PNOA (7 mayo 2008).

AGRADECIMIENTOS

A las empresas productoras por su participación: Stereocarto S.L. (1956-47), Omega Cartografía Digital. S.L (1977-78), Venturo XXI (1984-85).

Evaluación de las clasificaciones obtenidas a partir de imágenes de teledetección sometidas a compresión con pérdida

A. Zabala[1] y X. Pons[1]

[1] DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA. Universitat Autònoma de Barcelona, Campus de la UAB, 08193, Cerdanyola del Vallès (Barcelona, España). Correo electrónico: alaitz.zabala@uab.cat

RESUMEN

El objetivo principal de este artículo es mostrar cuantitativamente el efecto de diversas técnicas de compresión con pérdida en la cartografía obtenida mediante imágenes de teledetección, teniendo en cuenta diferentes tipos de imágenes, escenarios geográficos, opciones de compresión y métodos de evaluación. Entre las contribuciones principales se encuentran que el efecto de la compresión con pérdida depende de la metodología usada para obtener la cartografía, de los estándares de compresión utilizados y de la fragmentación del área de estudio. Las zonas más fragmentadas no se pueden comprimir tanto como las menos fragmentadas, especialmente si es usan los estándares menos eficientes. JPEG2000 obtiene mejores resultados que JPEG clásico, especialmente si se usa JPEG2000 3D. Por otra parte, se concluye que los resultados de calidad pueden variar según el método de evaluación utilizado, y por ello esta elección es de suma importancia.

Palabras clave: Clasificación, Segmentación, compresión con pérdida, JPEG, JPEG 2000.

ABSTRACT

The main aim of this paper is to quantitatively show the effects of several lossy compression techniques on the cartography resulting from remote sensing data, taking into account different image types, geographical scenarios, compression options and evaluations methods. Among the main contributions of the paper, we found that the effect of compression depends on the methodology used to obtain the cartography, on the compression standard employed and on the fragmentation of the study area. More fragmented areas cannot be compressed as much as less fragmented areas, especially if less efficient standards are used. JPEG 2000 obtains better results than the classic JPEG, especially if 3D JPEG 2000 is used. On the other hand, the paper concludes that different quality results can be obtained using several evaluations methods, thus the election of an evaluation method is of prime importance.

Keywords: *Classification, Segmentation, Lossy compression, JPEG, JPEG 2000.*

INTRODUCCIÓN

Las imágenes de teledetección (TD) se usan para muchas aplicaciones, incluyendo generación y análisis de mapas de usos del suelo, gestión de emergencias, modelización climática y gestión agrícola y silvícola. Constantemente, el volumen de datos crece, implicando un enorme potencial de aplicación pero también un importante problema de almacenamiento. Por este motivo, hay una creciente necesidad de formatos de compresión que permitan reducir el volumen de datos almacenado sin reducir la calidad de las imágenes y sus aplicaciones.

El paradigma de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) promueve la creación de servicios web, a menudo siguiendo los estándares del Open Geospatial Consortium. Estos servicios requieren estrategias de compresión para poder transferir imágenes de manera repetitiva a entornos con limitado ancho de banda (por ejemplo en situaciones de emergencia en que dispositivos móviles con poco ancho de banda son la única opción posible). En el contexto de las IDE es inevitable el uso de métodos estándar de compresión, en aras de la interoperabilidad.

En el campo de la TD ha habido pocos estudios cuantitativos del efecto de la compresión en la clasificación. Las investigaciones previas se centran en modificaciones de los estándares de compresión para mejorarlos (Qian *et al.*, 2005; Penna *et al.*, 2007; Du y Fowler, 2007; Carvajal *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2008); sin embargo pocos de estos estudios ahondan en el efecto en la clasificación de la compresión (Qian *et al.*, 2005; Penna *et al.*, 2007; Carvajal *et al.*, 2008; Choi *et*

al., 2008; Zabala y Pons, 2010). La relevancia de estos estudios también se manifiesta en el uso actual de compresión con pérdida a bordo de algunas plataformas (p. ej., Yu *et al.*, 2009).

El primer objetivo de este trabajo es mostrar cuantitativamente el efecto de las técnicas de compresión en la cartografía temática resultante de imágenes de teledetección, teniendo en cuenta diversos tipos de imágenes, áreas geográficas y opciones de compresión. Además, se comparan diversos métodos de evaluación para mostrar la importancia de la correcta elección de éstos métodos. El trabajo resume resultados de otros trabajos más específicos dando una referencia valiosa de los efectos de la compresión con pérdida en diversos escenarios de TD.

METODOLOGÍA

Compresión

Los estándares de compresión estudiados son JPEG y JPEG2000 para medir el efecto de la compresión en los resultados de la clasificación. Para la compresión se han utilizado las aplicaciones JPEGIMG (MiraMon), Kakadu, y BOÍ. La compresión JPEG2000 se puede realizar aprovechando las novedades del estándar (*i.e.* compresión multibanda, decorrelación en la 3ª dimensión) o en una aproximación comparable con JPEG (J2Km y J2K respectivamente).

La razón de compresión (CR) se calcula como la razón entre el tamaño del fichero original y del fichero comprimido, y es expresada como, por ejemplo, 10:1 para un fichero que comprimido ocupa una décima parte del original.

Generación de cartografía

Se han estudiado diversos escenarios para cubrir métodos de clasificación píxel a píxel y de segmentación.

a) Clasificación forestal píxel a píxel

Se han seleccionado dos zonas forestales en Cataluña: Garrotxa-Ripollès y Maresme-Vallès, la primera menos fragmentada que la segunda. Ambas han sido analizadas con cuatro imágenes Landsat-7 (ETM+) y 5 (TM) entre 2002 y 2003, seleccionadas para aprovechar la variación intraanual de la vegetación. Para mejorar la clasificación, se ha utilizado variables climáticas, NDVI y pendiente topográfico.

El área se ha enmascarado para clasificar sólo las zonas forestales con un método híbrido (detalles en Serra *et al.*, 2009) que combina un clasificador no supervisado y uno supervisado.

b) Clasificación píxel a píxel de cultivos

Se han estudiado dos áreas de cultivos en Cataluña: Segrià y Pla d'Urgell, la primera menos fragmentada. Ambas han sido analizadas con cinco imágenes Landsat-5 (TM) distribuidas a lo largo de 2004. Como en el caso anterior, las imágenes han sido enmascaradas y clasificadas con un clasificador híbrido.

c) Clasificación por segmentos en zona urbana

En este escenario se han usado cuatro ortofotos color y una imagen Quickbird (QB) de 4 bandas (infrarrojo color) para estudiar el efecto de la compresión en clasificaciones basadas en objetos. Tres de las ortofotos están situadas en Cataluña (Sant Cugat, Vallvidrera y Olot) y la otra en Navarra (Zizur Mayor). La imagen QB es la habitual Boulder Standard, que cubre la zona oeste de Boulder, Colorado (USA). Todas las imágenes cubren áreas con paisaje urbano poco denso. Se ha realizado una segmentación multiresolución y una clasificación borrosa definida por el usuario (Definiens profesional 5).

Evaluación de las clasificaciones

La evaluación de las clasificaciones se ha calculado generando las matrices de confusión a partir de información verdad terreno.

Para estudios sobre efectos de compresión (así como para la mayoría de estudios de dinámica de usos del suelo) es muy importante ser capaz de evaluar la clasificación con la mayor fiabilidad posible. La mejor opción es utilizar una verdad terreno absoluta (por ejemplo a partir de una fotointerpretación), aproximación no muy usada (de hecho, si realmente existe un mapa de verdad terreno completo, ¿por qué se desearía la clasificación?) pero que permite evaluar la adecuación del método de clasificación para augmentar la confianza de usarlo en otras zonas de características similares. La segunda opción es el uso de áreas de test independientes, de amplia utilización (*e.g.*, Qian *et al.*, 2005) ya que usa información independiente no utilizada en la clasificación, y con un coste de tiempo asumible.

Finalmente, la tercera opción es usar la clasificación original (sobre las imágenes no comprimidas) como verdad terreno (*e.g.*, Choi *et al.*, 2008). Esta solución tiene la ventaja de una gran área de comparación (toda la clasificación), que a la vez produce menos problemas, especialmente con las categorías que cubren menos área. Sin embargo, el principal inconveniente es que no se considera que la clasificación original puede tener ciertos errores y, por tanto, es imposible evaluar los posibles efectos positivos de la compresión en algunos casos (*e.g.* en Qian *et al.*, 1997). Finalmente, al comparar tres métodos de evaluación se pueden obtener ciertas recomendaciones sobre como se deberían evaluar las clasificaciones.

RESULTADOS

Esta sección evalúa los efectos de la compresión en las aplicaciones de las imágenes, define el óptimo de compresión en cada caso y compara diversos métodos de evaluación.

La Figura 1 muestra el acierto global calculado usando áreas de test independientes de las clasificaciones forestales píxel a píxel, en relación a la CR. A bajas razones de compresión la compresión no tiene efectos negativos en la clasificación. Sin embargo, el acierto disminuye notablemente si la compresión óptima se excede. El punto de inflexión se encuentra a diferentes CR según la fragmentación de la imagen y el método de compresión. Así, en las zonas menos fragmentadas JPEG y JPEG2000 pueden ser usados a CR 10:1 y 20:1, mientras que en zonas más fragmentadas no se debería usar JPEG, y JPEG2000 debe limitarse a CR 3.33:1 o 5:1.

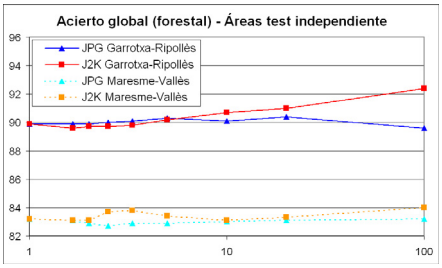


Figura 1: Acierto global calculado usando áreas de test independientes, sobre una clasificación píxel a píxel de zonas forestales.

La Figura 2 muestra el acierto global de las clasificaciones de zonas de cultivos, en relación a la razón de compresión. El acierto se calcula usando como verdad terreno las áreas de test independientes (superior) o la clasificación sobre imágenes si compresión (inferior). En las zonas menos fragmentadas se puede usar una compresión de hasta 20:1 (JPEG) o 100:1 (J2Km). Si la zona es más fragmentada, la compresión óptima es 10:1 en todos los casos.

En relación a las diferencias entre ambos métodos de evaluación, es interesante notar que los resultados de las áreas de test son más variables con la razón de compresión que los basados en la clasificación original. Esto es probablemente debido al área total cubierta por los polígonos de test, que cubren sólo una pequeña parte del área total y, por ello, arrojan resultados menos estables. Además, en algunos casos los resultados de las áreas de test independientes son superiores a los obtenidos por las imágenes originales, debido al menor efecto de sal y pimienta en las imágenes comprimidas.

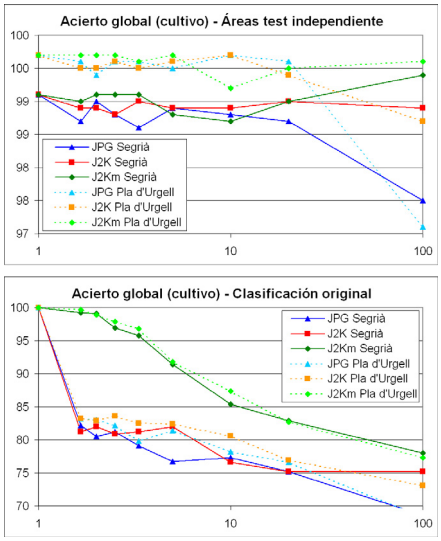


Figura 2: Acierto global calculado usando áreas de test independientes (superior) y la clasificación original (inferior) sobre una clasificación píxel a píxel de zonas de cultivos.

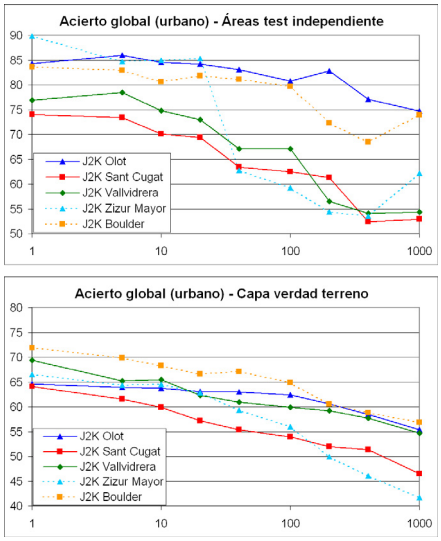


Figura 3: Acierto global calculado usando áreas de test independientes (superior) y verdad terreno absoluta (inferior) sobre una clasificación por segmentos en una zona urbana.

La Figura 3 muestra el cierto global de las clasificaciones basadas en segmentos sobre zonas urbanas, en relación a la CR. El acierto se calcula usando como verdad terreno las áreas de test independientes (superior) o la fotointerpretación del 25% del área (inferior). Todas las imágenes originales obtienen aciertos similares (*e.g.*,

69.40%), pero en las zonas más fragmentadas el descenso de acierto en el primer nivel de compresión es mayor. Para las zonas menos fragmentadas se puede comprimir hasta CR 20:1.

Aunque apuntan cualitativamente a las mismas conclusiones, los resultados obtenidos por áreas de test independiente son claramente más optimistas que los obtenidos al usar una capa de verdad terreno. Asumiendo que la capa de verdad terreno es mas representativa, se ilustra la importancia de la selección de las áreas de test, y se apunta el riesgo de no dar con áreas de test realmente representativas. En otras palabras, subestimar o sobreestimar el acierto y, por lo tanto, obtener resultados inestables es un riesgo elevado cuando se evalúa el efecto de la compresión usando áreas de test independientes.

CONCLUSIONES

Los efectos de la compresión dependen del método de cartografiado así como de la compresión aplicada. Si el objetivo es una clasificación píxel a píxel, la compresión óptima depende del tipo de paisaje y su fragmentación. La compresión JPEG2000 óptima varía desde 3.33 o 5:1 (zonas forestales fragmentadas) hasta 100:1 (zonas agrícolas menos fragmentadas). JPEG2000 obtiene mejores resultados que JPEG, especialmente si se aplica compresión 3D. Si la clasificación se realiza sobre segmentos los resultados muestran que hasta compresiones 20:1 la clasificación obtenida es similar a la original.

Por otro lado, la investigación muestra que los resultados de calidad obtenidos varían según el método de evaluación usado. Los resultados obtenidos mediante una capa verdad terreno absoluta son los más sólidos y explican mejor los cambios introducidos por la compresión. La dificultad de disponer de esta cartografía lleva a los científicos a usar otras aproximaciones, y, entre ellas, el uso de áreas de test independiente es el método más común, aunque nuestros resultados muestran que pueden existir discrepancias cuantitativas importantes. Usar la clasificación original como verdad terreno no permite mostrar los beneficios existentes en algunos casos tras la compresión. Si se desea estimar los efectos de la compresión rigurosamente, la selección de las áreas de test debe ser muy cuidadosa.

BIBLIOGRAFÍA

CARVAJAL, G.; B. PENNA, E. MAGLI, 2008: *Unified Lossy and Near-Lossless Hyperspectral Image Compression Based on JPEG 2000*, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. S, 5, 593-597.

CHOI, E.; S. LEE, C. LEE, 2008: *Effects of Compression on the Classification of Hyperspectral Images*. In: Mastorakis *et al.* (eds.), Mathematics and Computers in Science and Engineering, Heraklion, 541-546.

DU, Q.; J.E. FOWLER, 2007: *Hyperspectral Image Compression Using JPEG2000 and Principal Component Analysis*, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 4, 201-205.

PENNA, B; T. TILLO, E. MAGLI, G. OLMO, 2007: *Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 45, 1408-1421.

QIAN, S.E.; A.B. HOLLINGER, D. WILLIAMS, D. MANAK, 1997: *3D data compression system based on vector quantization for reducing the data rate of hyperspectral imagery*. Appl. Photonic Technol. 2, 2, 641–654.

QIAN, S.E.; A. HOLLINGER, M. BERGERON, I. CUNNINGHAM, C. NADEAU, G. JOLLY, H. ZWICK, 2005: *Multidisciplinary user acceptability study of hyperspectral data compressed using an on-board near lossless vector quantization algorithm*. Int. J. Remote Sens, 26, 2163-2195.

SERRA, P., G. MORÉ, X. PONS, 2009: *Thematic accuracy consequences in cadasterland-cover enrichment from a pixel and from a polygon perspective*. Photogramm. Eng. Remote Sens., 75(12), 1441-1449.

YU, G.; T. VLADIMIROVA, M. SWEETING, 2009: *Image compression systems on board satellites*, Acta Astronaut., 64, 988-1005.

ZABALA, A.; X. PONS, 2010: *Effects of lossy compression on remote sensing image classification of forest areas*, Int. J. Appl. Earth Obs., 13, 43–51.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MICINN (TIN2009-14426-C02-02), Generalitat de Catalunya (SGR2009-1511) y Comisión Europea (FP7-ENV-2010-1-265178 y FP7-SPACE-2009-1-242390) Incluye material DigitalGlobe® (© [2006] *All rights reserved*). Xavier Pons es beneficiario de un ICREA Acadèmia Excellence in Research grant (2011-2015).

INCENDIOS FORESTALES

Cartografiado de modelos de combustibles a partir de datos ASTER en La Orotava (Tenerife)

A. Alonso-Benito[1], L. A. Arroyo[2], M. Arbelo[1], P. Hernández-Leal[1] y A. González-Calvo[1]

[1] Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Departamento de Física F. E. E. S. Universidad de La Laguna. Av. Astrofísico Francisco Sánchez, s/n. 38206 San Cristóbal de La Laguna. Tel: 922318248, Fax: 922318228. Correo electrónico: aaloben@ull.es

[2] Centro de Investigación del Fuego (CIFU). Fundación General del Medio Ambiente de Castilla-La Mancha, Edificio ICAM de la UCLM (Campus Fábrica de Armas), 45071 Toledo (España).

RESUMEN

Los gestores forestales de la Administración necesitan diferentes herramientas de gestión para la lucha contra incendios forestales. Una de estas herramientas son los modelos de propagación de incendios, como FARSITE, FlamMap o BehavePlus, entre otros, que requieren mapas de combustible como parámetro de entrada. En el presente trabajo se comparan cuatro métodos de clasificación (tres métodos estadísticos basados en píxeles y un método de contexto basado en objetos) para la clasificación de los modelos de combustible NFDRS (National Fire Danger Rating System) a partir de una imagen ASTER del municipio de La Orotava (Isla de Tenerife) adquirida en marzo de 2003. Las bandas del visible e infrarrojo, la primera componente principal del visible, el modelo digital del terreno y cuatro índices de vegetación (índice de vegetación normalizado, índice de vegetación ajustado al suelo, índice modificado de vegetación ajustado al suelo e índice de vegetación optimizado para ASTER) fueron usados para aplicar tres algoritmos de clasificación por píxeles (máxima verosimilitud, red neuronal y máquina de soporte vectorial) y un algoritmo de clasificación por objetos (OBIA). La precisión de los cuatro mapas obtenidos se evaluó frente a los datos de campo recogidos en el III Inventario Forestal Nacional (realizado para esta zona a finales del año 2002). Los algoritmos de clasificación por píxeles alcanzaron niveles de fiabilidad total entre 77,15 y 83,16%, siendo el clasificador de soporte de máquina vectorial el que mejores resultados produjo. Con la clasificación OBIA se alcanzó una fiabilidad total de 95,48%. Este incremento en la precisión del mapa de combustibles es debido a la capacidad del OBIA para incorporar información de contexto al análisis, que complementa a la información espectral de partida, y permite así discriminar mejor entre aquellos modelos de combustibles con un patrón espectral parecido.

Palabras clave: ASTER, Tenerife, máxima probabilidad, soporte de máquina vectorial, red neuronal, análisis en base a objetos, modelos de combustible.

ABSTRACT

Forest managers need different tools to manage firefighting in real time and to generate fire risk maps. Among these tools, there are fire models, such as FARSITE, FlamMap or BehavePlus, that require fuel maps as inputs. In this study, we have applied three pixel-based algorithms (maximum likelihood, neural network and support vector machine) and an object-based image analysis (OBIA) to classify NFDRS (National Fire Danger Rating System) fuel types from an ASTER image from March 3, 2003 in a representative area of Tenerife Island (Canary Islands, Spain). VNIR and SWIR bands (resampled to 15m), the first principal component of the VNIR bands, a digital elevation model and four vegetation indices (normalized difference vegetation index, vegetation index adjusted for soil adjusted vegetation index modified the soil and vegetation index optimized for ASTER) were applied to the selected classification algorithms in order to map fuel types. The accuracies of the obtained maps were evaluated by comparison against field data collected for the III National Forest Inventory. The pixel-based classifications reached overall accuracies between 77.15 and 83.16%, with the support vector machine being the best classifier. The OBIA achieved an overall accuracy of 95.48%. This increase in the OBIA-derived fuel map accuracy is due to its ability to incorporate relevant information to the analysis, which complements the spectral information and allows better discrimination between fuel types with similar spectral behavior.

Keywords: *ASTER, fuel type mapping, Object-Based Image Analysis, Maximum Likelihood, Neural Network, Support Vector Machine, Tenerife Island.*

INTRODUCCIÓN

Los modelos de combustible constituyen un importante dato de entrada en los programas de simulación de incendios (Keane *et al*., 1998). Muchos autores, incluidos Falkowski *et al*. (2005), Riaño *et al*. (2002) o Arroyo *et al*. (2006) entre otros, han cartografiado diferentes modelos de combustibles, usando distintos sensores y algoritmos de clasificación, de forma que los resultados de fiabilidad total obtenidos varían en torno al 30%.

En España, se han adoptado los modelos de combustible BEHAVE (Rothermel, 1983), que fueron adaptados a la vegetación peninsular. La isla de Tenerife dispone de una adaptación propia de los modelos BEHAVE, que incluye 27 modelos de combustible, pero para los que no existe cartografía.

En el presente trabajo, se ha estudiado la idoneidad del sensor ASTER en el cartografiado de modelos de combustible para una zona de estudio de la Isla de Tenerife. Además, se ha comparado la capacidad de tres algoritmos de clasificación por pixel y un sistema de clasificación por objetos para producir mapas de modelos de combustible a partir de imágenes ASTER.

DATOS Y METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio es el municipio de La Orotava localizado en la zona norte de la Isla de Tenerife (Figura 1) ubicada entre los 28º 23'N y 16º 31'W, con una extensión de 212 km^2 y un rango altitudinal desde 0 a 3.718 metros sobre el nivel del mar.

Domina el pinar canario (*Pinus canariensis* C. Sum. Ex DC. in Buch), bien en formaciones puras o mixtas con pino Monterrey (*Pinus radiata* D. Don), fayal-brezal (*Erica arbórea* L. y *Myrica faya* Ait.), laurisilva (*Laurus azorica* (Seub.) Franco, *Persea indica* (L.) Spreng o *Ilex canariensis* Poir.), entre otros.

El área de estudio se puede dividir en tres zonas altitudinales: agrícola, forestal y alta montaña. En la zona agrícola destaca la influencia de la actividad humana. En la zona forestal, en gran parte protegida, se sitúan principalmente las formaciones forestales. Esta zona alcanza los 2.000 metros sobre el nivel del mar. Por último, en la zona de alta montaña, incluida en el Parque Nacional del Teide, la vegetación es rastrera y está dominada por especies adaptadas al clima y al suelo volcánico (*Viola cheiranthifolia* Humb. & Bonpl.).

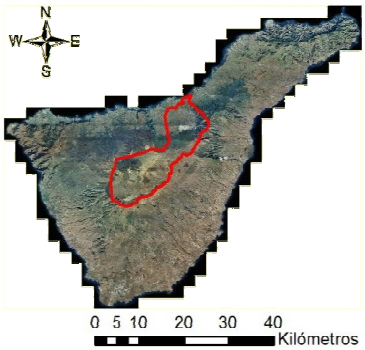


Figura 1: Ortofoto de la isla de Tenerife (GRAFCAN). La zona de estudio (el término municipal de La Orotava) se indica en rojo.

Datos de satélite

Se ha usado una imagen ASTER Level 1B adquirida el 3 de marzo de 2003. Se obtuvieron los valores de reflectancia. Las bandas del SWIR se re-escalaron a 15 m mediante convolución cúbica, para formar una única imagen con 9 bandas (VNIR+SWIR), la cual se georeferenció y ortorectificó a la proyección UTM WGS 84 zona 28N. Se realizó corrección topográfica mediante el método corrección-c, usando un modelo digital del terreno (MDT) obtenido a partir de la cartografía 1:5.000 disponible de la zona.

Se estimó la primera componente principal de las bandas del VNIR y los siguientes índices de vegetación: índice de vegetación diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación modificado con ajuste por efecto del suelo (MSAVI), índice mejorado de vegetación adaptado a ASTER (EVI2) e índice de vegetación con ajuste por efecto del suelo (SAVI).

Datos de campo

Los datos de campo provienen del III Inventario Forestal Nacional, realizado en el segundo semestre de 2002. En cada parcela inventariada se tomó el modelo de combustible según el sistema BEHAVE. Estos datos se cruzaron con el Mapa de Vegetación de Canarias, el Mapa Forestal de España y el Mapa de Usos del Suelo de Canarias, con el fin de obtener los modelos de combustibles según NFDRS (National Fire Danger Rating System) (Scoot &

Burgan, 2005).

RESULTADOS

Se han analizado tres clasificaciones supervisadas por píxeles: máxima probabilidad (ML), red neuronal (NN) y máquina de soporte vectorial (SVM). Para minimizar el efecto "sal y pimienta", los resultados de los clasificadores por píxeles se sometieron a un filtro de paso alto en ventanas de 5x5 píxeles y un filtro de suavizado. Por otro lado, se aplicó un sistema de clasificación por objetos (OBIA).

Se obtuvieron cuatro mapas de combustibles, uno para cada clasificador, con 14 modelos de combustible. En los mapas obtenidos mediante clasificadores por pixel se aprecia el efecto "sal y pimienta", incluso tras la aplicación de filtros. Ese efecto no es detectable en el mapa obtenido mediante OBIA.

La Tabla 1 muestra el grado de acierto obtenido con los distintos clasificadores. Mediante OBIA, se obtuvo un acierto del 95,47%, un 12% por encima de lo obtenido mediante el uso de clasificadores por píxeles.

Entre los resultados obtenidos en las clasificaciones por pixel, no se observan grandes diferencias. Sólo se detectó un 6% de diferencia en precisión global entre el mejor (SVM) y el peor (ML) clasificador por píxeles. Por otro lado, el OBIA mostró una mejora de más del 12% en precisión global respecto al SVM (Figura 2).

Analizando las zonas altitudinales del municipio, la zona forestal ha mostrado los peores resultados de fiabilidad en los algoritmos por pixel. Esto es debido a que muchos modelos de combustible presentan una respuesta espectral muy semejante, lo cual dificulta su clasificación. Esta circunstancia no se da en el OBIA, ya que éste permite añadir información contextual a la clasificación.

		NN	OBIA	ML	SVM
Resultados Globales	Exactitud global	82,59%	95,47%	77,15%	83,16%
	Coeficiente kappa	0,7536	0,9365	0,6824	0,7633
Exactitud del usuario	Zona Teide	88,96%	94,86%	87,60%	89,31%
	Zona Forestal	61,95%	97,92%	47,85%	63,22%
	Zona Agrícola	82,14%	95,52%	73,97%	82,94%
Fiabilidad del productor	Zona Teide	88,87%	94,92%	86,90%	89,02%
	Zona Forestal	63,93%	97,88%	54,07%	65,60%
	Zona Agrícola	79,14%	95,28%	64,19%	80,09%

Tabla 1: Exactitud global y valores del coeficiente kappa, para los clasificadores usados. Para cada zona del municipio de La Orotava, se dan los valores de exactitud y fiabilidad obtenidos con cada algoritmo de clasificación.

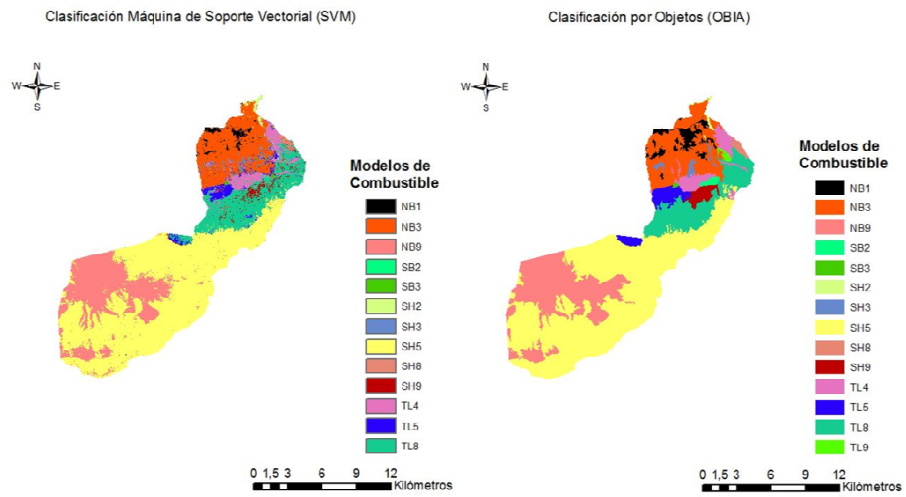


Figura 2: Mapa de combustibles con SVM en análisis por píxeles y OBIA en análisis por objetos. Nomenclatura de los modelos de combustible tomada de Scoot & Burgan (2005).

CONCLUSIÓN

Se ha analizado la validez de las imágenes ASTER para el cartografiado de modelos de combustible, mediante cuatro algoritmos distintos. La clasificación por objetos mostró los mejores resultados en exactitud y fiabilidad. Considerar la información contextual permite solventar, en parte, el error asociado a la respuesta espectral parecida de algunos modelos de combustible.

BIBLIOGRAFÍA

ARROYO, L.A., HEALEY, S.P., COHEN, W.B., COCERO, D. & MANZANERA, J.A., 2006. *Using Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in a Mediterranean region*. J. Geophys. Res. 111:G04S04.

FALKOWSKI, M., GESSLER, P., MORGAN, P., HUDAK, A. & SMITH, A. 2005. *Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modeling*. Forest Ecology and Management (2005) 217:129-146.

KEANE, ROBERT E., GARNER, JANICE L., SCHMIDT, KIRSTEN M., LONG, DONALD G., MENAKIS, JAMES P. & FINNEY, MARK A. 1998. *Development of input data layers for the FARSITE fire growth model for the Selway-Bitterroot Wilderness Complex, USA*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-3. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. *66 pp*.

RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J., PALACIOS-ORUETA, A. y BASTARRIKA, A. 2002. *Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems*. Canadian Journal of Forest Research 32:1301-1315.

ROTHERMEL, R. C. 1983. *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. *161 pp*.

SCOTT, JOE H. & BURGAN, ROBERT E. 2005. *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. *72 pp*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es financiado por el proyecto PCT-MAC 2007-2013 SATELMAC co-financiado con fondos FEDER de la Unión Europea y el proyecto CGL2010-22189-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Modelización del riesgo de incendio mediante SIG y series temporales de imágenes Landsat

C. Cabo, P. García y A. Colubi

INDUROT. Universidad de Oviedo. Edificio de Investigación, Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Tel: 985458117, Fax: 985458110.
E-mail: carloscabogomez@hotmail.com

RESUMEN

Se presentan las bases para la ordenación de las zonas de alto riesgo de incendios forestales en Asturias. Estas bases constituyen un modelo estructural, válido mientras no se produzcan cambios significativos en el terreno, que servirá de base para futuros modelos dinámicos. El modelo se genera a partir de un concepto compuesto que une *peligrosidad*, entendida como afinidad del territorio a sufrir un incendio en base a las características del entorno y a la recurrencia de incendios en las últimas 2 décadas, y *valoración*, que establece la posible incidencia y consecuencias de un incendio sobre la superficie afectada.

Los submodelos que componen el resultado final se han desarrollado tomando como principales datos de partida: "(1)" una actualización de la CTAPA (Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias) "(2)" un modelo digital de elevaciones generado a partir de la cartografía 1:5000 del Principado y "(3)" la cartografía de incendios forestales elaborada a partir de la clasificación de imágenes Landsat de los últimos 20 años.

Para el cálculo de la *peligrosidad* en cada zona se combinan los resultados del análisis de la recurrencia de incendios con los modelos de combustibilidad e inflamabilidad y los derivados del modelo digital de elevaciones que permiten determinar la exposición de cada punto al fuego. La valoración del territorio se determina en función de tres aspectos fundamentales: (1) La valoración natural del territorio, (2) La valoración económica de las posibles afecciones y (3) La valoración del peligro de la erosión post-incendio. Finalmente, sobre una malla que cubre todo el territorio asturiano, se genera el modelo de riesgo de incendio a partir de la conjunción de los submodelos creados.

Palabras clave: Modelización, Riesgo, Peligrosidad, Imágenes Landsat

ABSTRACT

Some bases for the spatial planning of the forest fires risk zones in Asturias are presented. Such bases form an structural model, valid while no significant change of the land happens, to develop future dynamic models. The model is generated from a complex concept gathering hazard (in the sense of tendency to be damaged by a forest fire), recurrence in the last 2 decades, and a valuation that allows us to establish the impact and consequences of a forest fire over the considered area.

The submodels used to produce the output have been developed taking into account as main sources: (1) an update version of the CTAPA (Enviromental Thematic Cartography of the Principality of Asturias) (2) A Digital Elevation Model generated from the cartography 1:5000 of the Principality and (3) The cartography of forest fires developed from the classification of Landsat images for the last 20 years.

In order to compute the hazard for each area, results from the analysis of recurrence are combined with combustibility and inflammability models and with those derived from the Digital Elevation Model allowing us to determine the fire exposure at each point. The valuation of the land is determined according to 3 main features: (1) the natural valuation of the land, (2) the economic valuation of the potential damage and (3) the valuation of the post-fire erosion risk. Finally, a forest fire risk model is produced from the aggregation of the considered submodels over a grid covering Asturias.

Keywords: *remote sensing ,risk, hazard, Landsat images.*

INTRODUCCIÓN

Aunque el fuego puede ser un fenómeno natural que, en ambientes inalterados por el hombre, podría ser admitido como un modelador del paisaje; en España y particularmente en Asturias, aparece originado por causas no naturales en la mayor parte de sus ocurrencias. Esto implica graves alteraciones del medio que derivan en importantes pérdidas, no sólo en cuanto a los elementos naturales, sino también en pérdidas económicas de recursos y propiedades (Marquínez y Menéndez, 2003).

Los incendios forestales constituyen uno de los principales problemas que afectan al medio forestal español y particularmente al asturiano. Es por esta razón que se plantea el análisis y delimitación de las zonas de alto riesgo de incendios en Asturias. A la hora de abordar este estudio y definición, se parte de un concepto compuesto de riesgo, como combinación de la probabilidad de ocurrencia de un suceso (incendio forestal) y las consecuencias que acarrearía en el caso de producirse. Por tanto se define el riesgo de incendios sobre el territorio a partir de la cuantificación de la peligrosidad (que se refiere a la afinidad de un territorio a sufrir un incendio) y de la vulnerabilidad (que establece la posible incidencia de un incendio sobre la superficie afectada).

Este proyecto surge con el fin de concretar mediante un índice de riesgo estático lo establecido por el artículo 62 de la Ley del Principado 3/2004, de Montes y Ordenación forestal, en lo referente a las zonas de alto riesgo de incendio en Asturias: *"Aquellas áreas en las que la frecuencia o virulencia de los incendios forestales y la importancia de los valores amenazados hagan necesarias medidas especiales de protección contra los incendios, podrán ser declaradas zonas de alto riesgo de incendio o de protección preferente."* y establecer la correspondiente analogía cartográfica.

PRINCIPALES DATOS DE PARTIDA

Cartografía de vegetación

En el marco de este estudio y con el fin de contar con datos actualizados sobre la cubierta vegetal, se ha realizado una actualización de la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (CTAPA) (Principado de Asturias-Indurot, 1989 – 2001).

La CTAPA original se estructura en hojas 1:25000, en las que aparecen localizadas y descritas una serie de unidades que responden a un criterio mixto fitosociológico-fisionómico, que refleja la complejidad del paisaje vegetal en el ámbito asturiano. El principal objetivo del proceso de actualización consiste en la identificación y delimitación de los cambios de cierta entidad producidos en la cubierta vegetal desde la fecha de elaboración de la hoja de la cartografía correspondiente.

Imágenes LANDSAT

Tomando como referencia estudios anteriores llevados a cabo por el INDUROT, se han utilizado 24 imágenes de los sensores Landsat-TM y ETM+, obtenidas en un periodo de 20 años y seleccionadas de tal forma que la cobertura nubosa fuese mínima y que fuese posible contar con, al menos, una imagen por año estudiado. A partir de estos datos y siguiendo la metodología ya desarrollada (Recondo et al., 2002), se han elaborado clasificaciones supervisadas de los incendios que aparecen en las imágenes diferencia, obtenidas año a año en este periodo.

Modelo digital del terreno.

Generado sobre una malla ráster de 50x50 m a partir de la información altimétrica contenida en Mapa Topográfico 1:5000 del Principado de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias).

METODOLOGÍA

Esquema general de los procesos



Figura 1: Esquema general del modelo de riesgo

Los modelos generados para el cálculo (figura 1) de este índice estático de riesgo de incendio se basan en la conjunción de (1) la peligrosidad, entendida como afinidad del territorio a sufrir un incendio en base a las características del entorno y a la ocurrencia de incendios en la zona y (2) la valoración de las posibles pérdidas que un incendio forestal acarrearía en cada punto en función del valor natural, edáfico y comercial

Modelo de Peligrosidad

La peligrosidad asociada a cada punto del estudio se estima combinando su susceptibilidad a los incendios con la recurrencia de éstos en las últimas 2 décadas.

La **susceptibilidad** mide el grado de peligro que se desprende directamente de los factores más relevantes para la combustión y propagación del fuego. La cuantificación de la susceptibilidad se inicia con el cálculo de la inflamabilidad y combustibilidad de cada punto a partir de las características de la cubierta vegetal obtenidas por reclasificación de la CTAPA y se completa con la estimación de la probabilidad de llegada del fuego proveniente de su entorno a partir de sus características topográficas (Marquínez *et al*., 2003). Los modelos de susceptibilidad se generan a partir de numerosos submodelos en los que se unen las características del manto vegetal con la situación espacial de cada punto respecto a su entorno, además de las posibles barreras como carreteras, masas de agua, roquedos o núcleos de población.

La **recurrencia** de incendios es estudiada a partir de las clasificaciones supervisadas de las imágenes de cambio obtenidas a partir de 24 capturas de los sensores TM y ETM+ de los últimos 20 años. Asumiendo que a partir de cierto grado de reiteración de incendios, es posible descartar las causas naturales, las zonas con una mayor recurrencia se asocian a los factores de carácter sociocultural que inciden directamente en la intencionalidad y a otros aspectos unidos a la ocurrencia de incendios por negligencia.

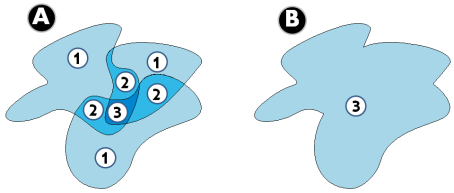


Figura 2: Delimitación de la recurrencia

Se asigna la recurrencia correspondiente a cada punto del territorio teniendo en cuenta que, los tres incendios representados en la figura 2 (A), tienen una zona común (3), y todos ellos han evolucionado, o se han propagado, desde o hasta ella. Cada uno de estos incendios podría haberse extendido a lo largo de toda la superficie, en el caso de que los factores dinámicos que influyen en la evolución del fuego (climatología, regeneración de la cubierta vegetal, etc.) lo hubiesen permitido. Por ello, al área que resulta de la unión de los tres incendios cartografiados (B) se le asigna una recurrencia 3.

Modelos de Valoración de Pérdidas

El valor que se asigna a las zonas quemadas se basa principalmente en (1) El valor natural en función de la capacidad para soportar ciclos biológicos naturales y para aportar biodiversidad al sistema (2) El valor comercial de la principal productividad biológica y (3) El valor del suelo como soporte de las actividades biológicas y comerciales.

El **valor natural** que podría verse alterado por un incendio se obtiene integrando el valor natural intrínseco y la vulnerabilidad (Marquínez y Menéndez, 2003) frente al fuego de las unidades consideradas. Ambas valoraciones se calculan para cada punto a partir del reflejo cartográfico de su pertenencia a zonificaciones de protección o de cubierta vegetal.

El **valor comercial** se calcula a partir de las pérdidas económicas ocasionadas por el incendio. Las pérdidas por incendios se obtienen con la cuantificación de los daños ocasionados. Se entiende por daño la pérdida de las rentas comerciales relacionadas con la masa forestal, siendo estas la diferencia entre el valor existente antes y después del incendio (Martínez, 1999).

La **valoración de pérdida edáfica** mide la susceptibilidad a la erosión del suelo. La modelización de este fenómeno depende de numerosos factores geológicos, de relieve y de cubierta vegetal. En consecuencia, el modelo se ha generado a partir de las unidades litológicas y de vegetación y de derivados del modelo digital de elevaciones (Álvarez y Marquínez, 2007).

Cálculo del Índice de Riesgo

Tal y como muestra el esquema general de la figura 1, a partir de la conjunción del modelo de peligrosidad con cada uno de los modelos de valoración de pérdidas se obtienen los 3 submodelos de riesgo: (1) Riesgo de pérdidas en el valor natural, (2) Riesgo de pérdidas en el valor edáfico y (3) Riesgo de pérdidas en el valor comercial.

La integración de los tres tipos de riesgo en uno sólo se ha realizado utilizando un criterio conservador consistente en la asignación del valor más alto de los 3 submodelos para cada punto (figura 3). Es habitual que las pérdidas ocasionadas por un incendio, en un punto determinado, sobre los valores comerciales, naturales o edáficos sean totalmente dispares. Es decir, un incendio sobre determinadas plantaciones ocasionaría grandes pérdidas económicas, si bien,

las pérdidas de valores naturales serían, en muchos casos, de escasa entidad. Asimismo, un incendio en un brezal no ocasionaría grandes pérdidas de valor económico, aunque probablemente acarrearía la pérdida de gran parte del suelo existente.

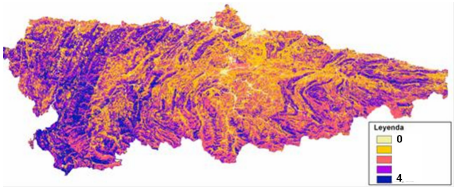


Figura 3: Modelo de riesgo de incendios: 0 Sin riesgo; 1Bajo; 2Medio; 3Alto; 4 Muy alto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Asturias es una región húmeda y templada en la que la vegetación crece de manera abundante, originando altos niveles de combustible. En las zonas silíceas del occidente de la región la vegetación climácica (bosques) ha sido desplazada por la actividad humana y se ha sustituido por un matorral de brezos y leguminosas (carqueixa y tojos) altamente inflamables. Esta situación se repite en algunas sierras litorales del oriente. En estos territorios la peligrosidad es alta, aumentando aún más cuando las laderas son sur y de alta pendiente. Sin embargo, en la zona central, con menor relieve y unidades vegetales con menor combustibilidad, hay menor peligro de incendio.

En cuanto a la vulnerabilidad del territorio; los valores edáficos, naturales y comerciales se distribuyen de manera diferente en la región. Los tipos de suelos existentes en la región hacen que las mayores perdidas por erosión sean esperables en el occidente de Asturias, donde los suelos son silíceos, mientras que hacia el centro y oriente la estabilidad de los suelos es mayor; lógicamente, para un mismo tipo de suelo la susceptibilidad a la erosión aumenta al aumentar la pendiente. De acuerdo con estos criterios, la susceptibilidad a la erosión es máxima en las zonas montañosas del suroccidente de Asturias y en el centro y oriente de la región la distribución es más variable. Dentro de esta distribución destacan algunas zonas en las que se ha considerado que las pérdidas potenciales de suelos son inexistentes, estas son algunas zonas llanas como las rasas costeras, zonas llanas del centro de Asturias y las llanuras aluviales, y áreas con escaso suelo.

Desde el punto de vista comercial, el principal recurso forestal de la región es la explotación maderera, esto hace que las mayores pérdidas potenciales ocasionadas por el fuego se concentren en las zonas boscosas del sur de la región y en las plantaciones, principalmente en zonas litorales.

El valor natural de Asturias es alto y, aunque se encuentra distribuido en pequeñas zonas por toda Asturias, las principales concentraciones de valores se sitúan en el eje de la cordillera y en los relieves menores como las sierras transversales de occidente o las sierras del Sueve o Cuera, donde se encuentran mejor conservado el medio natural y el número de especies catalogadas, animales y vegetales, es mayor.

La conjunción de la valoración del territorio y peligrosidad produce un mapa de riesgo (Fig. 3) en el que figuran destacados (con un mayor porcentaje de su territorio en riesgo muy alto) los territorios occidentales especialmente en los municipios de Ibias, Allande y Degaña. En el extremo oriental y en la cordillera central hay importantes zonas de riesgo muy alto-alto aunque sin alcanzar los niveles del occidente.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, M.A., MARQUÍNEZ, J. (Eds.), 2007. *Impacto de los incendios forestales en Asturias. Análisis de los últimos 30 años.* Consejería de Justicia, Seguridad Pública y Relaciones Exteriores del Principado de Asturias y Bomberos de Asturias, INDUROT-Universidad de Oviedo. KRK Ediciones. 201pp. Oviedo (España).

MARQUÍNEZ, J.; MENÉNDEZ, R., 2003. *Riesgos Naturales en Asturias*. Consejería de Infraestructuras y Política Territorial del Principado de Asturias. INDUROT-Universidad de Oviedo. KRK Ediciones, 133 pp. Oviedo (España)

MARTÍNEZ, E., 1999. *Manual de Valoración de Montes y Aprovechamientos Forestales*. Ed. Mundi-Prensa, 158 pp. Madrid (España).

RECONDO C., WOZNIAK, E.; PÉREZ-MORANDEIRA, C. S., 2002. *Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el periodo 1991-2001 a partir de imágenes Landsat-TM.* Revista de la Asociación Española de Teledetección, 47 - 55.

Propuesta de una metodología para la estimación de emisiones de incendios forestales mediante sensores atmosféricos

A. Calle, J.L. Casanova y P. Salvador

LATUV. Universidad de Valladolid. Edificio I+D, Paseo de Belén, s/n, 47011-Valladolid.
e-mail: abel@latuv.uva.es

RESUMEN

El CO es un importante gas traza proveniente de las emisiones de incendios forestales. Contribuye de forma importante al ciclo del carbono y su conocimiento es de gran interés en estudios de cambio global. En este trabajo se presenta una metodología para determinar el porcentaje de CO, que excede al contenido de fondo, proveniente de los incendios en regiones españolas y épocas afectadas por los incendios.

Palabras clave: Emisiones, CO, incendios forestales

ABSTRACT

The CO is an important trace gas coming from the forest fires emissions. It plays an important role in the carbon cycle and its knowledge is a key factor in the global change topic. In this work, a methodology, in order to estimate the exceeded percentage over the background value, is presented. The results belong to the most affected regions and periods, in Spain.

Keywords: *Emissions, CO, forest fires*

INTRODUCCIÓN

El monóxido de carbono (CO) es un gas traza presente en la atmósfera como principal producto de las actividades antropogénicas. A pesar de no tratarse de un gas de efecto invernadero tiene una gran importancia por ser un eslabón fundamental en la cadena el ciclo del carbono y, que sin ser directamente un precursor del CO_2 que sí presenta un fuerte carácter de efecto invernadero, tiene una gran influencia en las cantidades de radicales OH y del ozono (O_3) presentes en la atmósfera. Dentro de las actividades antropogénicas ligadas a la liberación del CO se encuentran dos grandes grupos definidos, en primer lugar, por las emisiones contaminantes de ciudades, tráfico rodado y otras actividades de carácter industrial y, en segundo lugar, por las emisiones de incendios y quema de biomasa a nivel planetario; quema incompleta, o poco eficiente, de madera, biomasa y combustibles fósiles. Frecuentemente las estimaciones de CO provenientes de incendios han sido realizadas a mediante métodos indirectos consistentes en estimar el contenido de CO a partir de la estimación previa de la biomasa quemada, dato que puede ser obtenido mediante satélite a través de la cartografía de las áreas afectadas por el fuego. Este procedimiento fue propuesto por Seiler & Crutzen (1980), y los principales errores provienen de la incertidumbre en los coeficientes y, por supuesto, en la estimación del área quemada y el tipo de combustible involucrado. El otro procedimiento es la medida directa del CO en la atmósfera mediante el uso de sensores espaciales. SCIAMACHY (*SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY*) a bordo del satélite europeo ENVISAT ha sido analizado para deterinar diferentes gases traza (Buchwitz *et al.,* 2004) y MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*), a bordo del satélite Terra, cuyos datos han sido procesados por el NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), que han revelado la dinámica estacional del CO a nivel planetario. En el presente trabajo, hemos realizado un análisis a escala sinóptica de los niveles de CO sobre la Península Ibérica centrándonos en la época de ocurrencia de incendios en España.

EL SENSOR MOPITT

En la actualidad, el sensor más adecuado para realizar medidas directas de CO es el MOPITT que está instalado en la plataforma Terra. Se trata de un radiómetro de correlación (Pan *et al*., 1998), que puede estimar perfiles verticales atmosféricos de CO por medio de la radiancia térmica recibida en la región espectral de 4.7

μm. La columna total de CO es obtenida usando las bandas espectrales de 2.4 y 2.3 μm, por medio de la radiancia solar que llega de la superficie en esas longitudes de onda. La resolución espacial de las medidas MOPITT es de 22kmx22km en el punto nadir, con un ancho de barrido de 640 km, lo que se traduce en un período de 3 días para realizar una cobertura completa.

METODOLOGIA

La heterogénea distribución de los datos ha exigido la aplicación de técnicas de interpolación espacial. Dado que la localización de los datos MOPITT *Level 2* estaba proyectada en coordenadas geográficas longitud-latitud, se han proyectado los ficheros diarios a una proyección cuadrangular para la determinación de distancias euclídeas. El análisis estacional ha sido realizado mediante la aplicación de la transformada de Fourier, que exige series continuas de datos. Los ficheros *Level 2* disponibles, para la serie de años 2005-08, ascendieron al 96%, 97%, 99% y 96% respectivamente. Por otra parte, la restricción de la resolución espacial de MOPITT y su tiempo de cobertura causa la inexistencia temporal de datos en cada zona de análisis. Por ello se han realizado interpolaciones temporales de datos. A partir de la aplicación de la transformada de Fourier han sido seleccionados los armónicos con mayor energía espectral. Antes de establecer correlaciones con los datos de incendios fue necesario encontrar una curva de evolución del contenido de CO para los cuatro años de la serie 2005-08. Este análisis constituye una aproximación sinóptica al comportamiento del CO en la península Ibérica. Tras la aplicación de la FFT (*Fast Fourier Transform*) a los datos se analizó la energía espectral de los 1460 armónicos de la serie para extraer grupos que luego proporcionarán la transformada inversa. Así, se eligieron dos grupos para este caso, conteniendo los armónicos: [1-10] y [1450-1459], respectivamente. Finalmente, la curva de referencia encontrada fue la Eq. (1).

$$CO_S(k) = \sum_{\substack{n=[1-10]\\ n=[1450-1459]}} F_{real}(n)\cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) - \sum_{\substack{n=[1-10]\\ n=[1450-1459]}} F_{imag}(n)\sin\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) \quad (1)$$

donde CO_S es el valor de la columna total de CO para esta curva sinóptica, k representa el díacontador de la serie (k=1 es el 1 enero de 2005 y k = 1460 es el 31 diciembre de 2008), N el número total e datos, n es el ordinal del armónico empleado y $F_{real}(n)$ y $F_{imag}(n)$ son los dos coeficientes del armónico n, determinados a través de la FFT.

RESULTADOS

La principal característica es el marcado carácter anual de los valores de CO (máxima energía espectral del armónico de período 1 año), de forma que se alcanzan los valores máximos con la entrada de la primavera y los valores mínimos con el final del verano. Mientras que existe cierta flexibilidad con los máximos, de forma que hemos encontrado su localización entre principios de Febrero y mediados de Mayo, lo que parece más ajustado es la localización de los mínimos, siempre entre el 20 de julio y el 15 de septiembre. Otra característica es el elevado valor de la energía espectral del armónico de período 2 años. Finalmente, destacar que, en promedio la concentración de CO en primavera es 30-40% más alta que a finales del verano.

El laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid dispone de un receptor MODIS que ha estado operativo, de forma continua, durante los 4 años que componen la serie de análisis 2005-2008. El software de detección de incendios oficial del equipo MODIS (Giglio *et al*., 2003) ha estado operativo, sobre España, para proporcionar el producto MOD14 de hot-spots y nos ha proporcionado la base de datos utilizada en este estudio. Los incendios que se producen en España se encuentran, de forma mayoritaria, concentrados en tres comunidades autónomas: Galicia, situada en el noroeste, Castilla y León, situada en el centro y tercio norte y Andalucía, situada al sur. La figura 1 muestra el gráfico de barras de los incendios detectados por MODIS, procedentes del producto MOD14, para el conjunto de toda España y cada una de las Comunidades autónomas mencionadas, en cada uno de los años que componen la serie de análisis. Por lo que respecta a las épocas afectadas por los incendios cabe destacar, de forma absolutamente mayoritaria el verano, fundamentalmente entre los meses de Julio y Septiembre, si bien es cierto que existen algunos fuegos distribuidos en épocas de primavera en la regiones de Galicia y Castilla y León, aunque en estos casos se trata de pequeños incendios no representativos para el presente análisis.

Para establecer un análisis del impacto de las emisiones de los incendios es necesario constatar dos aspectos precisos:
1) Debemos ser capaces de constatar que existe un exceso de los niveles de CO en una época

determinada. Esto, que parece una obviedad, no es sencillo de establecer, puesto que la única información de que disponemos son los datos reales, y no lo hipotéticos sin la presencia de incendios; por lo tanto, debemos buscar el nivel de comparación adecuado.

2) Si existe un "exceso" en los niveles de CO, determinar si es atribuible a la ocurrencia de incendios. Este aspecto es más fácil de resolver, que el anterior, mediante una comparación temporal de los datos.

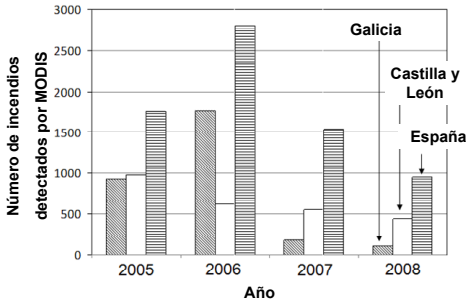


Figura 1: Número de incendios detectados por MODIS proporcionados en el producto MOD14, para el período 2005-2008, para cada región

Para determinar la curva de referencia para cada uno de los años que componen la serie de datos, hemos tomado la curva sinóptica peninsular definida por la ecuación (1); sin embargo, los valores presentan variación latitudinal por lo que dicha curva debería ser ajustada para cada región de estudio, de forma que adquiera representatividad. También hemos determinado, mediante transformada de Fourier, los armónicos de la serie de datos de cada año y cada región. Así, la curva que establece el nivel de referencia se determina mediante transformada inversa de Fourier y mediante el uso del grupo de armónicos que extrae el comportamiento general de los datos. Una vez realizado el ajuste entre ambas curvas, hemos superpuesto la transformada inversa de Fourier usando más grupos de armónicos, para extraer comportamientos puntuales.

La figura 2 muestra todas las curvas involucradas en el proceso descrito, además de la situación temporal que ocupan los incendios. La figura corresponde al caso real de la región de Castilla y León, año 2005. La curva anual de la región aparece etiquetada como "Curva anual suavizada" y ha sido reproducida mediante los grupos de armónicos: [1-3] y [360-364]; la curva de referencia sinóptica peninsular ha sido ajustada en la época de primavera, mediante la anterior, y aparece mencionada como "curva sinóptica ajustada", ecuación (1); finalmente la curva que reproduce las variaciones locales de columna total de CO aparece mencionada como "curva anual", y ha sido construida con los grupos de armónicos [1-25] y [350-364]. Los incendios acumulados en dicha región para cada día del año se muestran en un diagrama de barras en la figura 2 y aparecen escalados en el eje secundario de ordenadas. A la vista de la figura 2 hay una clara coincidencia entre los niveles altos de CO, en la época del verano que se apartan del comportamiento sinóptico esperado, con la ocurrencia de los incendios en la región analizada. Esos niveles altos están perfectamente marcados en las dos curvas de la región, aunque la curva $CO_{R,Y}$ no está suavizada y, por ello, reproduce variaciones locales a corto plazo.

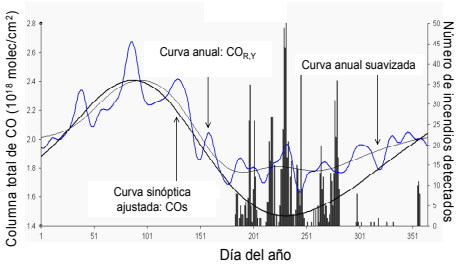


Figura 2: Representación de las curvas anuales de CO: curva sinóptica ajustada (S), curva anual suavizada, que reproduce el comportamiento de los datos para la región (R) de Castilla y León y el año (Y) 2005.

Una vez delimitados los incrementos de CO y constatada su coincidencia con la ocurrencia de incendios, hemos procedido a cuantificar dichos incrementos. Dado que buscamos poner de manifiesto la diferencia acumulada entre las curvas CO_S y $CO_{R,Y}$, la magnitud de cuantificación que hemos adoptado es el área gráfico encerrado por dichas curvas; es decir:

$$A_{R,Y} = \int_{\text{fire period}} \left[CO_{R,Y}(t) - CO_S(t) \right] dt \qquad (2)$$

donde $A_{R,Y}$ es el área de CO entre las curvas, para la región R y el año Y, en unidades de moléculas•día/cm^2; es decir, columna total de CO multiplicada por día. El estudio ha sido realizado, de acuerdo a figura 2, para las regiones y años con mayor ocurrencia de incendios; así se ha seleccionado R="Galicia", años 2005, 2006; R="Castilla y León", años 2005, 2006, 2007 y 2008; R="Andalucía", año 2007. Para todas las

regiones y años, se ha encontrado un área positiva ($A_{R,Y}>0$. R,Y) lo cual ya es resultado suficientemente concluyente para afirmar que en las épocas de incendios de cada región los valores de columna total de CO son mayores que los esperados de acuerdo a la evolución sinóptica.

Todos los valores de las áreas han sido significativos, salvo el caso de Andalucía 2007, en que el área ha sido prácticamente nulo; ello es achacable a dos factores: el primero la distribución geométrica de la región, y su magnitud (notar que no se han tenido en cuenta las localizaciones de los incendios sino el total en la región) y que, como se deprende de la figura 1, es la región menos afectada por los incendios. En cuanto a las otras dos regiones más importantes, Galicia y Castilla&León, se ha establecido una correlación lineal entre el área $CO_{R,Y}$ y número total de incendios detectados. Para ello hemos extraído sólo los intervalos de días en los que se han producido incendios consecutivamente, y hemos creado los puntos de regresión con el número de incendios (N_f) y el área para cada uno de dichos intervalos.

Los resultados más significativos han aparecido para Galicia-2005 donde $A_{R,Y}$ vs. N_f mostró un R^2=0.84; Castilla&León-2005 con R^2=0.75; Castilla&León con R2=0.41; En el caso de Galicia-2006 no se pudo establecer una correlación porque todos los incendios se produjeron en un solo intervalo, pero se constató un valor $A_{R,Y}$ positivo de valor $2.5 \cdot 10^{18}$ moléculas•día/cm2 alto valor. Estos resultados, junto con la ocurrencia más frecuente de incendios establecen una relación directa entre los valores de CO inesperadamente altos, en la época veraniega, y la ocurrencia de incendios. Estos resultados se resumen en la tabla 1, en la que se ha añadido como última columna el porcentaje de área excedente debido a la ocurrencia de incendios; es decir, la magnitud E(%) expresada en la ecuación (3):

$$E(\%) = \left[\frac{\int_{\text{fire period}} CO_{R,Y}(t)\,dt}{\int_{\text{fire period}} CO_S(t)\,dt} - 1 \right] \times 100 \qquad (3)$$

CONCLUSIÓN

A la vista de los resultados, la conclusión más relevante es que precisamente los casos de porcentaje de área excedente más elevados son los que presentan mayor coeficiente de determinación en la relación con el número de incendios ocurridos.

R, Y	Regresión $A_{R,Y}$ vs N_f R^2	Intervalo de $A_{R,Y}$ (10^{18} mol·day/cm^2)	Porcentaje Excedido E(%)
Galicia, 2005	0.84	[0.2-1.7]	2-8
Galicia, 2006	---	2.5	9
Castilla& León, 2005	0.75	[2.0-5.8]	13-15
Castilla& León, 2006	---	[0.8-2.9]	3-16%
Castilla& León, 2007	0.41	[0.5-1.7]	3-4

Tabla 1: Resultados de $A_{R,Y}$, R^2 y E(%) para las regiones más afectadas por incendios en España. Incluso en los casos en que R^2 no fue significativo, $A_{R,Y}>0$.

BIBLIOGRAFÍA

BUCHWITZ, M., DE BEEK, R., BRAMSTEDT, K., NO¨EL, S., BOVENSMANN, H., AND BURROWS, J. P. (2004). *Global carbon monoxide as retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS*, Atmospheric Chemistry and Physics, 4, 1945–1960, 2004.

GIGLIO, L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C.O.& KAUFMAN, Y.J. (2003). *An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS.* Remote Sensing of Environment, 87:273-282

PAN, L., GILLE, J. C., EDWARDS, D. P., BAILEY, P. L., & RODGERS, C. D. (1998). *Retrieval of tropospheric carbon monoxide for the MOPITT experiment*. Journal of Geophysical Research, 103, 32277–32290.

SEILER, W., & CRUTZEN, P. J. (1980). *Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning*. Climate Change, 2, 207– 247.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto CGL2004-00173 financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y fondos europeos FEDER. El soporte de datos *level-2 MOPITT data set* proviene del *Atmospheric Science Data Center of Langley ASDC User Services, NASA*.

Análisis global de áreas quemadas a partir de datos de la Agencia Espacial Europea: Proyecto Fire_CCI

E. Chuvieco, P. Oliva, T. Calado, M. Padilla, C.R. Cardozo, S. Hantson y D. Corti

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares (Madrid, España). Correo electrónico: emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

Se presentan en este trabajo el proyecto fire_cci, que forma parte de la Iniciativa para el Cambio Climático (CCI) de la Agencia Espacial Europea (ESA). Se pretende desarrollar metodologías para cartografiar áreas quemadas a escala global de forma precisa y consistente utilizando las imágenes disponibles desde 1995 hasta 2009 de los sensores (A)ATSR, VEGETATION y MERIS. La intención del programa es mejorar la contribución europea al sistema global de observaciones climáticas (GCOS), facilitando la interacción entre expertos en observación de la tierra y modeladores del clima y la vegetación a escala planetaria.

Palabras clave: área quemada, cambio climático, VEGETATION, MERIS, ATSR.

ABSTRACT

This paper presents the Fire CCI project, which is part of the Climate Change Initiative (CCI) of the European Space Agency (ESA). This project aims to develop methodologies for mapping accurately and consistently burned areas at global scale. The input data will be images acquired by European sensors (ATSR, VEGETATION y MERIS) from 1995 to 2009. The project tries to improve the European contribution to the Global Climate Observing System (GCOS) programme, by facilitating the interaction between Earth Observation and Climate, Atmospheric and Vegetation modellers.

Keywords: *burned area, climate change,* VEGETATION, MERIS, ATSR.

INTRODUCCIÓN

La información obtenida por sensores de teledetección resulta clave para mejorar nuestro conocimiento del sistema climático, gracias a proporcionar datos consistentes, en el espacio y en el tiempo. Por estas razones, los satélites de observación de la Tierra se consideran un aliado imprescindible para el sistema de observación global del clima (Global Climate Observing System (GCOS), 2009). En este contexto la Agencia Espacial Europea (ESA) ha lanzado la Iniciativa para el Cambio Climático (CCI), que pretende mejorar la aportación europea al GCOS. El programa está orientado a generar metodologías para obtener variables de interés climático a partir de datos de teledetección, principalmente de sensores europeos. Incluye variables referidas a la atmósfera, el océano y los territorios emergidos.

Una de las variables que se han seleccionado en la primera fase del programa es la cartografía de áreas quemadas. El proyecto se denomina fire_cci y tiene por objetivo desarrollar metodologías para cartografiar áreas quemadas a escala global de forma precisa y consistente utilizando las imágenes disponibles desde 1995 hasta 2009 de los sensores (A)ATSR, VEGETATION y MERIS.

El proyecto responde a una convocatoria competitiva de la ESA (*Invitation to Tender*) que fue ganada por un consorcio internacional liderado por nuestro departamento. En el grupo de trabajo participan los siguientes equipos con las funciones que se describen:

- Universidad de Alcalá (coordinación general), Validación. Desarrollo de algoritmos de área quemada para MERIS (con asesoría técnica del CIFOR del INIA, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias).
- GAF AG (Alemania), coordinación administrativa del proyecto. Validación.
- GMV (España), ingeniería del sistema, generación del prototipo y productos globales.
- DLR (Alemania), preprocesado de las imágenes, correcciones geométricas, atmosféricas y máscaras.
-ISA (Instituto Superior de Agronomia, Portu-

gal), algoritmos de área quemada para ATSR y VEGETATION.
- University of Leicester (Reino Unido), algoritmos para fusión de imágenes, validación.
- L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) del Centre National de la Recherche Scientifique (Francia), empleo de productos de área quemada en modelos de vegetación a escala regional.
- JÜLICH - Forschungszentrum Jülich GmbH (Alemania), empleo de productos de área quemada en emisiones atmosféricas.
- LSCE - Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (Francia), empleo de productos de área quemada en modelos de vegetación a escala global.

Una nota característica del programa ESA CCI es su orientación netamente climática, por lo que, además de las 10 variables temáticas que se van a generar (entre las que figura el área quemada), existe un proyecto paralelo que aglutina a los usuarios finales de esos productos. Se denomina Climate Modelling User Group (CMUG) y está integrado por el Hadley Center, el Max Planck, Meteofrance y el Centro Europeo de Predicciones meteorológicas (ECMWF). En cada consorcio existen también usuarios específicos de los productos generados. En nuestro caso, hay tres grupos con estas características.

OBJETIVOS DEL PROYECTO Y ÁREAS DE ESTUDIO

El proyecto fire_cci pretende desarrollar un producto de área quemada que se ajuste a las necesidades de la comunidad científica y que permita reforzar la cooperación entre las comunidades de observación de la tierra, climatología y modelización. También, se pondrá especial atención en la evaluación de la calidad del producto generado, tanto en su fiabilidad espacial, como en su consistencia temporal. En este sentido, pretende realizar un seguimiento minucioso de los errores en todas las fases del procesado, de cara a facilitar el uso posterior del producto por parte de los usuarios finales. Por otro lado, no está enfocado únicamente al desarrollo de nuevos algoritmos de área quemada sino también pretender comparar los resultados con otros productos globales disponibles.

El producto de área quemada generado por este proyecto será utilizado por los modeladores de la atmósfera y vegetación a escala regional y global. La existencia de una base de datos de área quemada, larga y consistente, es muy importante para estas comunidades porque: i) las emisiones de los fuegos tienen un impacto importante en las emisiones de carbono a la atmósfera y actualmente no están establecidas en los informes del IPCC; ii) el fuego es uno de los mayores perturbadores de la vegetación, por lo cual la sucesión de especies depende mucho de las áreas quemadas; iii) la evaluación de desastres naturales necesita valores de área quemada muy precisos para validar modelos de riesgo de incendio; iv) el fuego es uno de los factores más influyentes en la deforestación en los países tropicales. Por estas razones, el producto debe ofrecer unos estándares de calidad consistentes y estar a disposición de los usuarios de manera accesible y gratuita.

El proyecto fire_cci se basa principalmente en sensores europeos, más en concreto los denominados (A)ATSR, y MERIS, a bordo del ERS y el Envisat, y del VEGETATION, a bordo del SPOT-4 y 5, si bien también se emplearán imágenes de otros sensores como información auxiliar (puntos de calor MODIS) o para validar (Landsat-TM/ETM+). Se procesará una serie temporal completa para el periodo más largo que esté disponible cruzando los distintos sensores (1995 a 2009). Para el desarrollo y validación de los algoritmos, se han seleccionado 10 áreas de estudio de 500×500 km^2 (Figura 1). Además de procesar estas zonas, se realizarán una serie de coberturas globales para 5 años (1999, 2000, 2002, 2003 y 2005) para demonstrar que la cadena de procesamiento es semi-operacional.

Las áreas de estudio fueron seleccionadas con el fin de mostrar la consistencia en la cadena de procesamiento para la serie temporal objetivo, así como la calibración cruzada entre sensores. El tamaño de estas áreas estimamos que es suficiente para demostrar como los algoritmos funcionan en diferentes ecosistemas, incluso en áreas/años en que hubiera pocos fuegos, de manera que se puedan estimar adecuadamente tanto los errores de omisión como los de comisión.

FASES EN LA REALIZACIÓN

El proyecto tiene una duración de 3 años y se desarrollará en tres fases. En la primera, se realizará un análisis de los requerimientos científicos y la especificación del producto, una propuesta de los algoritmos más adecuados para los sensores considerados, así como un ejercicio de inter-comparación entre ellos, que dará lugar a la selección del algoritmo más adecuado. En la segunda fase, se desarrollará el prototipo del sistema y comenzará la producción de la cartografía de áreas quemadas para coberturas globa-

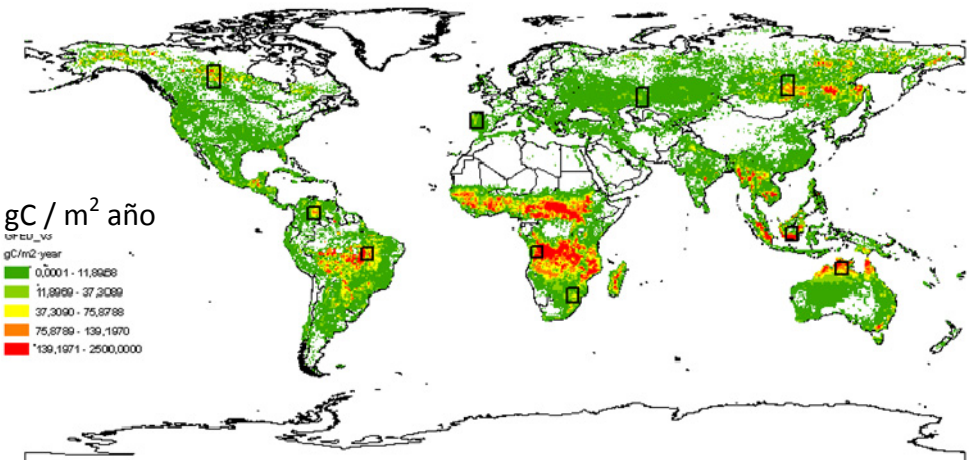


Figura 1: Distribución de las áreas de estudio considerando las emisiones calculadas por la base de datos GFED (van der Werf et al., 2010)

les. En la tercera, nos centraremos en la validación del producto final y se ensayará el interés de ese producto para la mejora de distintos modelos de dinámica atmosférica y de la vegetación. Asimismo, se compararán los resultados obtenidos con otros productos globales de área quemada ya disponibles, como es el caso del MCD45 realizado a partir de datos MODIS (Roy et al., 2005), el L3JRC, basado en datos SPOT-VEGETATION (Tansey et al., 2008) y el GLOBCARBON, donde se combinan VGT y ATSR (Plummer et al., 2006).

VALIDACIÓN

Esta es una de las tareas centrales de nuestra actividad en el proyecto, en la que también colabora la empresa alemana GAF. El objetivo de esta fase es obtener el grado de precisión obtenida por el producto final, comparando los resultados con datos de referencia.

Para validar cualquier producto de teledetección es clave que la información de referencia sea fiable. Puesto que no es posible recolectar perímetros quemados en el terreno para una escala global, la validación se ha basado en imágenes de mayor resolución (Landsat TM o ETM+, principalmente). Esta es la estrategia más común en los ejercicios de validación de área quemada que se han realizado hasta el momento (Roy y Boschetti, 2009) y acuerda con los protocolos de validación propuestos por el grupo de trabajo CEOS LPVS (Boschetti et al., 2009: http://lpvs.gsfc.nasa.gov).

Se ha pretendido que la validación considerara dos aspectos que se consideran claves en el programa, por un lado la exactitud propiamente dicha, y por otro la consistencia temporal en la detección.

Para la validación espacial se ha seleccionado el año 2005 por ser un año representativo de la variabilidad espacial en cuanto a incidencia de incendios y, por lo tanto, puede ofrecer una estimación de los potenciales errores del producto. La precisión del producto se medirá para diferentes ecosistemas, cobertura de vegetación y áreas climáticas. El producto global será validado con 100 áreas de validación (fig. 2), cada una de las cuales cubrirá el área completa de una imagen Landsat-TM (aproximadamente 34.000 km^2). Para la selección de las zonas de validación, realizamos un muestreo estratificado por ecosistema y condiciones de fuego.

La validación temporal intenta medir la consistencia temporal y se basa en realizar la validación en una serie de imágenes Landsat-TM (una por área de estudio) para todo el periodo temporal de 1995-2009. La validación mostrará la estabilidad temporal del producto de área quemada y el grado de influencia de las características de la época de fuego (Boschetti et al., 2010). Para ello, las áreas de validación deben tener una gran diversidad en lo que respecta a las condiciones de fuego, incluso la severidad y tamaño del fuego, tipo de vegetación y características climatológicas de la época del año.

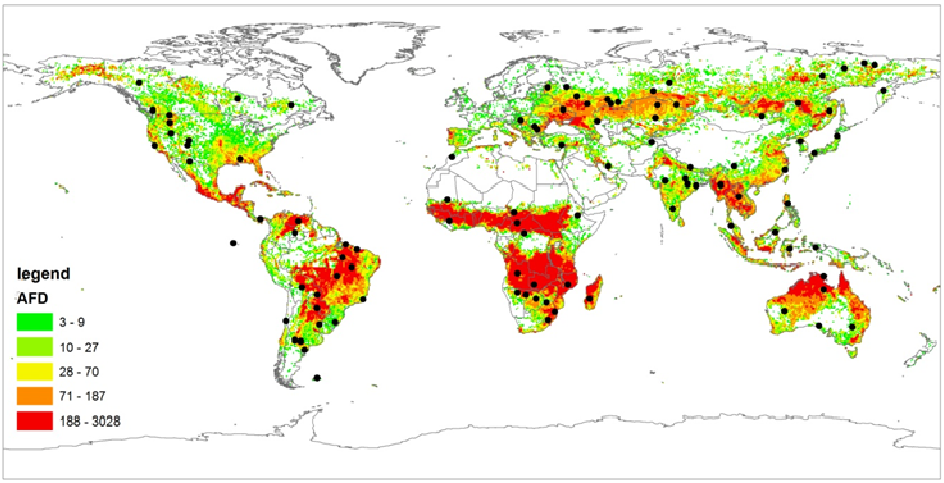


Figura 2: Sitios de validación para el producto global de áreas quemadas. Se ha incluido de fondo la densidad promedio de puntos de calor (AFD, en puntos x 10^{-5}) tomada de la base de datos de MODIS

ACCESIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN

Toda la información, informes y resultados elaborados y obtenidos a lo largo de la duración del proyecto fire_cci estarán disponibles en la página web del proyecto (http://www.esa-fire-cci.org/). Todos los documentos y productos podrán descargarse después de registrarse por medio de un cuestionario básico a fin de conocer el fin al que se destina el producto.

BIBLIOGRAFÍA

BOSCHETTI, L., D. P. ROY y C. O. JUSTICE. 2009. *International Global Burned Area Satellite Product Validation Protocol. Part I – production and standardization of validation reference data.* http://lpvs.gsfc.nasa.gov/.

BOSCHETTI, L., D. P. ROY, C. O. JUSTICE y L. GIGLIO. 2010. *Global assessment of the temporal reporting accuracy and precision of the MODIS burned area product*. International Journal of Wildland Fire, 19, 705-709.

GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (GCOS) 2009. *Guidelines for the generation of satellite-based datasets and products meeting GCOS requirements*. World Meteorological Organization, Geneva.

PLUMMER, S., O. ARINO, M. SIMON y W. STEFFEN. 2006. *Establishing an earth observation product service for the terrestrial carbon community: The GLOBCARBON Initiative.* Mitigation and adaptation strategies for Global Change, 11, 97-111.

ROY, D., Y. JIN, P. LEWIS y C. JUSTICE. 2005. *Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data*. Remote Sensing of Environment, 97, 137-162.

ROY, D. P. y L. BOSCHETTI. 2009. *Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC and GlobCarbon Burned-Area Products*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47, DOI 10.1109/TGRS.2008.2009000.

TANSEY, K., J. M. GRÉGOIRE, P. DEFOURNY, R. LEIGH, J. F. PEKEL, E. VAN BOGAERT y E. BARTHOLOMÉ. 2008. *A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution.* Geophysical Research Letters, 35, 6.

VAN DER WERF, G. R., J. T. RANDERSON, L. GIGLIO, G. COLLATZ, M. MU, P. S. KASIBHATLA, D. C. MORTON, R. S. DEFRIES, Y. JIN y T. T. VAN LEEUWEN. 2010. *Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009)*. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 16153-16230.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto fire_cci forma parte del programa de cambio climático de la Agencia Espacial Europea (contrato Nº 4000101779/10/I-NB).

Integración de información espacial para la cartografía del riesgo de incendio: Proyecto Fireglobe

E. Chuvieco[1], I. Aguado[1], S. Jurdao,[1] L. Pettinari[1], J. Salas[1], J. de la Riva[2], P. Ibarra[2], M. Rodrígues[2], M. Echeverría[2], D. Azqueta[3], M.V. Román[3], A. Bastarrika[4], S. Martínez[5], C. Recondo[6], E. Zapico[6] , F. J. Martínez-Vega[7] y S. Martín[8],

[1]Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares (Madrid). Correo electrónico: emilio.chuvieco@uah.es
[2]Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza (Zaragoza).
[3]Departamento de Fundamentos de Análisis Económico, Universidad de Alcalá (Madrid).
[4]Departamento de Ingeniería Topográfica, Universidad del País Vasco (Vitoria)
[5]Departamento de Botánica, Universidad de Santiago (Lugo)
[6]INDUROT. Universidad de Oviedo, Mieres (Oviedo)
[7]Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
[8]Departamento de Economía y Gestión Forestal. ETSI Montes, UPM (Madrid)

RESUMEN

Se presentan en este trabajo las principales conclusiones del proyecto Fireglobe, que se ha centrado en determinar condiciones de riesgo de incendios para todo el territorio español peninsular, utilizando datos de teledetección y análisis espacial en un sistema de información geográfica. Las variables consideradas han sido: factores de ignición de origen humano y de rayos, humedad de los combustibles vivos y muertos, probabilidad de propagación, impactos ecológicos previsibles e impactos socio-económicos, así como condiciones de paisaje. La integración se ha llevado a cabo utilizando varios métodos para convertir las escalas originales de cada variable en escalas comunes de probabilidad de ocurrencia o propagación. Se han aplicado también análisis de sensibilidad para verificar la importancia de cada factor de riesgo considerado. La evaluación de los índices se está realizando con los puntos de calor de MODIS y las estadísticas de ocurrencia para 2010.

Palabras clave: Riesgo de incendio forestal. Sistemas de Información Geográfica. Humedad del combustible. Factores humanos. Integración. Validación.

ABSTRACT

This paper presents the Fireglobe project, which aims to develop methods for mapping fire danger conditions for the whole Spanish peninsular territory. The system is based on remotely sensed data and Geographic Information systems, and makes extensive use of spatial information. The fire risk factors taken into account have been: ignition causes (both human and lightning), fuel moisture content (both dead and live fuels), fire behaviour potential, ecological and socio-economic vulnerability and landscape conditions. The integration of these input variables has been based on physical models and expert knowledge. Sensitivity analysis has been performed to identify the main factors in the different integration steps. Assessment of fire risk conditions is based on hot-spots derived from the MODIS sensor as well as from national fire statistics.

Keywords: *Fire risk, Geographic information systems. Fuel moisture content ,human factors, lightning, integration, assessment .*

INTRODUCCIÓN

El clima mediterráneo ha estado vinculado tradicionalmente a la presencia de incendios forestales, al coincidir las condiciones de máxima temperatura con la mínima precipitación. La vegetación de nuestro entorno ha convivido con el fuego por milenios, por lo que no resulta un factor extraño a nuestro medio. Sin embargo, los recientes cambios en las actividades socio-económicas y en los patrones climáticos, afectan notablemente al régimen histórico de incendios, implicando daños potenciales mucho mayores de los que cabría esperar tradicionalmente. Por otro lado, la creciente presencia de poblamientos en las áreas próximas a los bosques, incrementa el

riesgo de daños personales y materiales de los incendios, lo que lleva a los servicios forestales a invertir notables sumas de dinero en medios de extinción y alerta temprana. Si bien es cierto que en nuestro país en los últimos años está bajando la superficie total quemada , siguen aumentando el número de incendios, lo que supone un acicate para seguir mejorando los mecanismos de prevención. Además, parecen aumentar las probabilidades de tener una temporada especialmente dramática, similar a la que han sufrido diversos países en los últimos años, como consecuencia de olas de calor extremas (Portugal, 2003 y 2005; Grecia, 2007; Australia, 2009; Rusia, 2010), lo que refuerza la necesidad de mejorar nuestros sistemas de alerta y prevención.

OBJETIVOS

En este marco se planteó el proyecto Fireglobe, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref CGL2008-01083). El proyecto pretendía desarrollar metodologías para cartografiar el riesgo de incendio forestal para el conjunto del territorio peninsular español. Se apoya en desarrollos previos realizados en el marco de los proyectos Firerisk y Firemap Chuvieco et al., 2010. En el proyecto participa un equipo multidisciplinar de las Universidades de Alcalá, Zaragoza, Oviedo, Santiago, País Vasco, Politécnica de Madrid y del CSIC.

Este artículo mostrará sucintamente los resultados actuales del proyecto y los desarrollos metodológicos alcanzados.

ESQUEMA METODOLÓGICO

El proyecto Fireglobe intenta recoger los factores más destacados del riesgo de incendio, tanto referidos a la probabilidad de que el fuego se inicie o propague, como al daño potencial que puede provocar (Fig. 1). En este sentido, y siguiendo la terminología de otros desastres naturales, se considera que el riesgo es un producto de la probabilidad de que se produzca el evento y de la vulnerabilidad ante el mismo. El primero depende principalmente de las condiciones del entorno, mientras el segundo de la capacidad de respuesta al evento. En nuestro caso, la probabilidad de que se inicie un fuego está relacionada con dos elementos:

- Agente causal: que suministra calor al combustible para la ignición. Se han considerado los factores humanos y los rayos.
- Estado hídrico de los combustibles, que les permite arder o no.

Una vez que se inicia un fuego, comienza a afectar al entorno si las condiciones de propagación son adecuadas. Para ello es preciso que tenga oxígeno y combustible. El primero se controla principalmente a través del viento y la pendiente, mientras el segundo se relaciona con la abundancia de la vegetación disponible para arder, su continuidad horizontal y vertical y su estado hídrico.

En lo que se refiere a la vulnerabilidad, se han considerado potencialmente afectables por un fuego los aspectos socio-económicos y paisajísticos, integrados en función de la capacidad del ecosistema para regenerar la situación previa al incendio. En términos de valoración, se han considerado viviendas y servicios ecosistémicos,

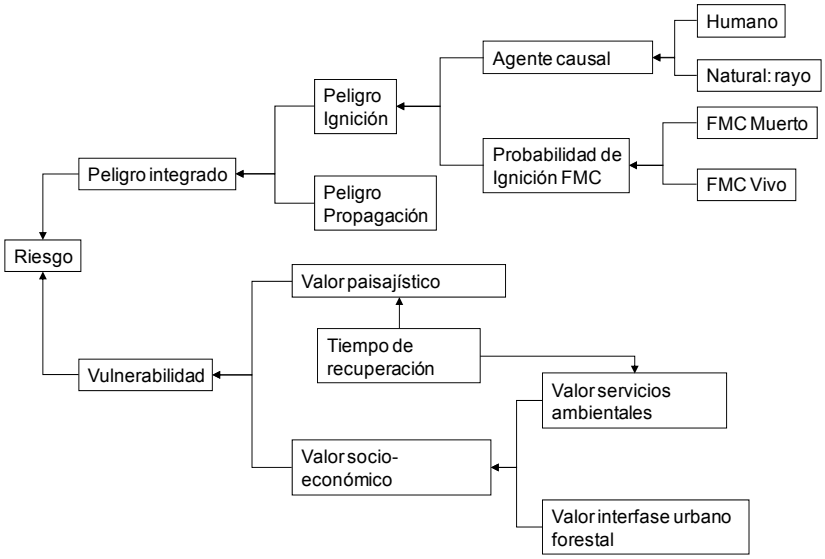


Figura 1: Esquema conceptual del índice de riesgo desarrollado en Fireglobe

por un lado, y calidad y fragilidad del paisaje por otro.

Las variables consideradas en el proyecto se cartografían para el conjunto del territorio peninsular español, a una resolución espacial de 1 km^2. Diariamente se actualiza el estado hídrico (FMC) del combustible muerto, cada 8 días el FMC vivo, mientras que el resto se consideran variables estáticas.

GENERACIÓN DE LAS VARIABLES

Las variables de entrada para el modelo de riesgo se generaron aplicando las metodologías más apropiadas a los fines del proyecto. Considerando la limitación de espacio de esta comunicación, las presentaremos de manera resumida:

Factor de ignición humana

Se ha generado a partir de análisis estadístico de la ocurrencia histórica y de la consideración de una amplia cantidad de variables explicativas, seleccionadas a partir de la experiencia previa en modelos regionales y nacionales Martínez et al., 2009; Vilar et al., 2008. En este proyecto, además de los modelos basados en regresión logística convencional, se ha ensayado también con técnicas de regresión geográficamente ponderada Koutsias et al., 2010.

Factor de ignición por rayos

Se ha elaborado a partir de la ocurrencia histórica registrada por la Dirección General de Medio Natural, y una base de datos de tormentas proporcionada por la Agencia Nacional de Meteorología y la empresa Meteológica. A partir de esas variables, se ha ajustado un modelo logístico que tiene en cuenta la humedad del combustible fino, la elevación, el tipo de cubierta y el tipo de clima (Vilar et al., 2010).

Humedad del combustible muerto

A partir de muestreos de campo, se ajustó un modelo estadístico entre la humedad de los combustibles finos (pasto y hojarasca) y algunos códigos meteorológicos de humedad comúnmente utilizados en la gestión de incendios, en concreto el código 10h del sistema estadounidense y el FFMC del sistema canadiense. Puesto que ambos proporcionaban similar calidad, se optó por el primero, pues no requiere disponer de información de vientos. Para el cálculo diario se parte de los pronósticos de temperatura y humedad relativa realizados por la empresa Meteológica diariamente a las 6 h para las 12 h del mismo día Aguado et al., 2007.

Humedad del combustible vivo

Para este proyecto, hemos avanzado sobre desarrollos previos que basaban la estimación del FMC en modelos de inversión de imágenes MODIS para pastizal y matorral mediterráneo Chuvieco et al., 2009; Yebra y Chuvieco, 2009; Yebra et al., 2008. Se ha extendido la simulación a arbolado mediterráneo, así como a vegetación atlántica, que tiene una dinámica temporal bastante contrastada con las especies mediterráneas.

Propagación

El potencial de propagación se ha estimado a partir del modelo Behave Rothermel, 1983, considerando condiciones climáticas promedio a partir de una serie temporal proporcionada por Meteológica. La pendiente del terreno se extrajo del modelo digital de elevaciones 1:200.000 del Instituto Geográfico Nacional. El mapa de combustibles procede de la reclasificación del mapa forestal nacional y del mapa de cobertura Corine land cover, que realizó la Dirección General de Biodiversidad.

Valor socio-económico

Se han considerado en el análisis económico de las pérdidas potenciales de un incendio el valor de las viviendas y de algunos servicios ambientales, sobre los que existe información más fiable. El valor inmobiliario potencialmente quemable se ha calculado a partir de los precios medios por municipio, usando los más cercanos cuando no estaban disponibles, y considerando la presencia de viviendas en áreas de interfase urbano-forestal. Estas zonas se definen como áreas urbanas con significativa presencia de arbolado o matorral en los alrededores. En cuanto a los servicios ambientales, se ha considerado la producción de alimentos y materias primas (madera, leña, corcho, piñones y pasto), la provisión de servicios recreativos (incluyendo la caza y la pesca) y la regulación climática a nivel global (por el papel que juegan los bosques como depósitos de carbono).

Valor ecológico

El valor del paisaje se ha calculado a partir del valor intrínseco y de las figuras de protección. Para el primer aspecto se han utilizado varios criterios: rareza-diversidad, visibilidad, fragilidad, proximidad a la situación climax y fragmentación. Tanto para los valores de paisaje, como para los servicios ambientales, se ha calculado un periodo de pérdida acumulado, en función del número de años que el paisaje tardará

en recuperar sus condiciones pre-incendio. Este escenario se ha calculado en función de las estrategias reproductoras de las especies vegetales (rebrote o germinación), del potencial de erosión del suelo, y de la disponibilidad hídrica, asumiendo un escenario de comportamiento del fuego extremo.

INTEGRACIÓN y VALIDACIÓN

La integración de las distintas variables de riesgo se está realizando a través de modelos estadísticos y físicos, en algunos casos, y como ponderación cualitativa en otros, dependiendo del tipo de variable. Para la ignición se consideran escenarios probabilísticos, mientras que en la propagación se consideran modelos físicos del comportamiento del fuego, y en vulnerabilidad ponderaciones cualitativas.

Se está abordando un análisis de sensibilidad basado en técnicas EFAST Saltelli et al., 2008, que permite determinar qué factores tienen mayor importancia en cada paso de la integración y abordar escenarios alternativos.

En cuanto a la validación, estamos recopilando las estadísticas de los servicios regionales para el verano de 2010, cuando estuvo activo el conjunto del sistema, así como reprocesando hacia otros años la información para relacionarla con estadísticas históricas. También se están comparando los resultados con los puntos de calor detectados por el sensor MODIS.

ACCESIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN

Las distintas variables y los índices integrados de riesgo se ofrecieron experimentalmente durante el verano de 2010 a diversos servicios de prevención y lucha contra incendios. Todos los índices se introdujeron en un servidor cartográfico diseñado sobre tecnología de código abierto. En la página web del proyecto se recoge la información más actualizada sobre el mismo y el acceso a esta información cartográfica (www.fireglobe.es). Se pretende que el sistema sea compatible con las infraestructuras de datos espaciales (IDE) estándar.

BIBLIOGRAFÍA

AGUADO, I., E. CHUVIECO, R. BOREN y H. NIETO. 2007. *Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment*. International Journal of Wildland Fire, 16, 390-397.

CHUVIECO, E., I. AGUADO, M. YEBRA, H. NIETO, J. SALAS, P. MARTÍN, L. VILAR, J. MARTÍNEZ, S. MARTÍN, P. IBARRA, J. DE LA RIVA, J. BAEZA, F. RODRÍGUEZ, J. R. MOLINA, M. A. HERRERA y R. ZAMORA. 2010. *Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies*. Ecological Modelling, 221, 46-58.

CHUVIECO, E., J. WAGTENDOK, D. RIAÑO, M. YEBRA y S. USTIN. 2009. *Estimation of fuel conditions for fire danger assessment*. E. CHUVIECO, editor. Earth observation of wildland fires in Mediterranean ecosystems. Springer Berlin Heidelberg, pag. 83-96

KOUTSIAS, N., J. MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ y B. ALLGÖWER. 2010. *Do Factors Causing Wildfires Vary in Space? Evidence from Geographically Weighted Regression*. GIScience & Remote Sensing, 47, 221-240.

MARTÍNEZ, J., C. VEGA-GARCÍA y E. CHUVIECO. 2009. H*uman-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain*. Journal of Environmental Management, 90, 1241-1252.

ROTHERMEL, R. C. 1983. *How to predict the spread and intensity of forest and range fires.* USDA, Forest Service, GTR INT-143, Ogden, UT.

SALTELLI, A., K. CHAN y E. M. SCOTT 2008. *Sensitivity analysis*. John Wiley & Sons, Chichester (England).

VILAR, L., M. P. MARTIN ISABEL y F. J. MARTÍNEZ VEGA. 2008. *Empleo de técnicas de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendio forestal a escala regional*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 47, 5-29.

YEBRA, M. y E. CHUVIECO. 2009. *Linking ecological information and radiative transfer models to estimate fuel moisture content in the Mediterranean region of Spain: Solving the ill-posed inverse problem*. Remote Sensing of Environment 113, 2403-2441.

YEBRA, M., E. CHUVIECO y D. RIAÑO. 2008. *Estimation of live Fuel Moisture Content from MODIS images for fire risk assessment.* Agricultural and Forest Meteorology, 148, 523-536.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto se ha financiado por el Ministerio e Innovación (Plan Nacional de I+D+I; Referencia: CGL2008-01083).

Incendios forestales y transferencia de carbono biomasa-suelo en áreas montañosas de clima atlántico

S. Fernández-Menéndez, C. Santín, C. Cabo, R.A. Menéndez y M.A. Álvarez

INDUROT. Universidad de Oviedo. Edificio de Investigación, Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: smdez@indurot.uniovi.es

RESUMEN

El presente trabajo pretende estimar el efecto de los incendios forestales en el stock de carbono orgánico en suelos ácidos de montaña bajo clima Atlántico (Asturias, España). Para ello se cuantifica el carbono orgánico en el horizonte A de los suelos de dos cuencas hidrográficas muy similares pero con diferente ocurrencia de incendios. Del cruce del mapa de vegetación con la cartografía de estados erosivos se obtienen cinco unidades vegetación-sustrato. El stock de carbono orgánico edáfico se estima para cada una de estas unidades y se calculan los siguientes índices de vegetación: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), fAPAR (*Absorbed Photosintetically Active Radiation*) y LAI (*Leaf Area Index*).

Palabras clave: stock de carbono edáfico, teledetección, incendios forestales, SIG.

ABSTRACT

In order to assess the effects of forest fires on the organic carbon budget in acid soils under Atlantic climate conditions, the oxidizable carbon accumulated in the A horizon of the soil was measured in two river basins affected by different frequency of forest fires. Five canopy types resulting of the combination of soil erosion status and vegetation units were defined. Soil organic carbon was quantified in each canopy and vegetation indexes: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), fAPAR (Absorbed Photosintetically Active Radiation) and LAI (Leaf Area Index) were calculated.

Keywords: *soil organic carbon (SOC), remote sensing, forest fires, GIS.*

INTRODUCCIÓN

En los incendios forestales el carbono orgánico acumulado en la vegetación se transfiere al suelo como necromasa pirogénica y/o cenizas o se libera a la atmósfera como CO_2. La cantidad de carbono que pasa de la vegetación al suelo depende de varios factores como intensidad del fuego, tipo de suelo y cantidad de carbono acumulado en la biomasa, que depende a su vez de la producción primaria neta del ecosistema (PPN).

La biomasa y los suelos de los ecosistemas forestales acumulan alrededor de unos 1240 Pg de carbono (Dixon et al., 1994). Los bosques boreales y templados del Hemisferio Norte son importantes sumideros de carbono y una estimación precisa del stock de carbono en los mismos así como de los flujos netos entre las diferentes partes del ecosistema son fundamentales para ayudarnos a entender el llamado "sumidero perdido" (*missing sink*).

La PPN es un factor clave en el ciclo del carbono y se define como la cantidad neta de carbono que es fijada en la biomasa por unidad de espacio y tiempo. Este parámetro es base a la hora de calcular la acumulación de carbono almacenado en el ecosistema, sin embargo, a una escala espacial grande la estimación directa de la PPN no es posible por lo que la teledetección se presenta como una valiosa herramienta para su cálculo (Ricotta et al., 1999). Un método para estimar la PPN a partir de imágenes de satélite es el "*maximum-value composite procedure*" (MVC), el cual se basa en la tasa normalizada entre la radiación en el infrarrojo cercano y la reflectancia en el rojo visible (*Normalized Difference Vegetation Index,* NDVI). Trabajos previos han mostrado que el NDVI presenta una importante relación con otros índices de vegetación como la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (*Absorbed Photosintetically Active Radiation,* fAPAR) o el índice de superficie foliar (*Leaf Area Index,* LAI) (Cihlar et al., 1991).

El presente trabajo se centra en el efecto de los incendios forestales en el stock de carbono orgánico edáfico en suelos ácidos de la Cordillera Cantábrica (Asturias, España). Para ello se estudian dos cuencas hidrográficas muy próximas y similares pero con diferente afección de incendios: 1.- Muniellos (268 ha, poco afectada por incendios forestales, el último incendio en la cuenca estudiada ocurrió con anterioridad al año 1996) 2- Combo (122 ha, muy afectada por incendios forestales; el último incendio cartografiado en la cuenca ocurrió en el año 2008). En ellas se calcula el stock de carbono orgánico en el horizonte A de los suelos y también se determina la PPN de la vegetación mediante los índices anteriormente descritos (NDVI, fAPAR y LAI).

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Fig. 1) se localiza en la Cordillera Cantábrica (Asturias, NO de España). El sustrato geológico es muy homogéneo y consiste en una secuencia de areniscas, cuarcitas y pizarras del Ordovícico. Gran parte del territorio, aproximadamente la mitad, está cubierto por depósitos de clastos sobre los que se desarrollan suelos muy pedregosos.

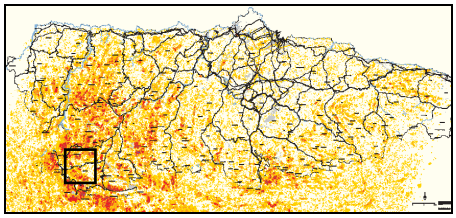


Figura 1: Situación de la zona de estudio sobre el mapa de recurrencia de incendios (según Recondo et al., 2002)

El principal uso del suelo en este sector de la Cordillera Cantábrica ha sido tradicionalmente la ganadería extensiva, lo que ha dado lugar a la quema repetitiva de grandes extensiones del territorio, causando una importante degradación tanto de la vegetación como de los suelos (Fernández et al, 2005). Actualmente, una parte importante del área de estudio no presenta una cubierta vegetal continua e incluso en algunas zonas el suelo ha desaparecido por la elevada erosión post-incendio, dejando al descubierto la roca madre. Sólo en la Reserva de la Biosfera de Muniellos se conservan bosques primigenios ya que esta zona no ha sido afectada prácticamente por incendios forestales.

METODOLOGÍA USADA

Cálculo de los Stocks de Carbono

En las dos cuencas hidrográficas se realizó una cartografía de estados erosivos, diferenciando principalmente entre: roquedos, canchales, suelos con horizontes A pedregosos y discontinuos y suelos con horizontes A continuos. Además las diferentes clases de vegetación (bosques, matorrales, pastizales y vegetación casmofítica) se han obtenido a escala 1:10.000 a partir de la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias. Del cruce de estos dos mapas se han obtenido un total de cinco unidades sustrato-vegetación (Fig. 2): (C) Canchales y/o afloramientos rocosos y derrubios de ladera con vegetación; (BP) Bosque sobre horizonte A discontinuo y pedregoso; (B) Bosque sobre horizonte A continuo; (M) Matorral sobre horizonte A continuo: y (MP) Matorral sobre horizonte A discontinuo y pedregoso.

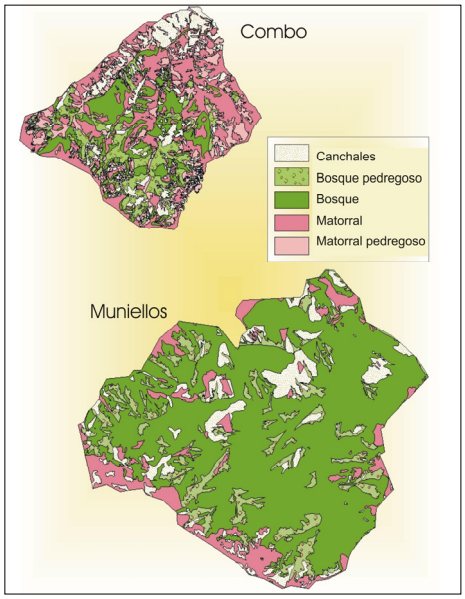


Figura 2: Unidades sustrato-vegetación obtenidas del cruce del mapa de estados erosivos y el de vegetación.

En cada unidad se muestreó el horizonte A de diez perfiles edáficos, analizándose la densidad, la potencia del suelo, la textura, el carbono orgánico oxidable, el nitrógeno total (%) y el porcentaje de materia orgánica. Con estos datos se estima el stock de carbono oxidable (Mg ha^{-1}) en cada unidad para las dos cuencas a estudio.

Corrección de la imagen

Se ha usado una imagen Quick Bird del área estudiada sobre la que se ha realizado la corrección atmosférica, se ha georreferenciado y ha sido corregida topográficamente. Todo este proceso se abordó con los programas PCI y ERMapper 6.2.

El cálculo del exceso atmosférico en el ND de cada banda se basó en dos hipótesis: que este exceso puede ser medido aproximadamente en áreas de muy baja reflectividad, como zonas de agua, de las que el sensor detectaría una radiancia baja y constante en ausencia de atmósfera (hipótesis generalmente aceptada). La segunda hipótesis fue considerar que todas las zonas de agua clara y profunda tienen una radiancia similar.

Para la corrección geométrica y la georreferenciación se necesitaron unos 40 puntos de control en la zona. El relieve hace necesario incluir la altitud, con el MDE (modelo digital de elevaciones), en los polinomios de ajuste de este proceso. Para ello se ha empleado el programa PCI.

La corrección topográfica se realiza en zonas de relieve para mejorar las posteriores clasificaciones realizadas sobre las imágenes. El efecto de que las zonas mejor orientadas al sol muestran un ND más alto que las peor orientadas (dentro de la misma cubierta) se compensa multiplicando las primeras por un factor $\tau < 1$ y las segundas por un $\tau > 1$. El efecto final es homogeneizar ambas zonas, es decir, "aplanar" la superficie. El cálculo de τ implica asumir un modelo para la radiancia detectada por el sensor, en este caso el modelo de Minnaert (con la constante k de Minnaert para cada banda), así como conocer las pendientes en cada píxel (MDE) y los datos solares.

Estimación de la Productividad Primaria Neta (PPN)

Para las unidades sustrato-vegetación definidas se han calculado tres índices de vegetación a partir de una imagen Quickbird, con una resolución espacial de 60-70 cm, tomada a inicios del mes de julio (2005), momento de mayor cobertura vegetal. Los índices calculados son: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y los modelos propuestos para bosque atlánticos por Mineny et al., (2000) fAPAR (*Absorbed Photosintetically Active Radiation*) índice espectral (fAPAR=1.62 x NDVI-0.036) que estima la radiación absorbida por la vegetación durante la fotosíntesis y LAI (*Leaf Area Index*) que es un índice espectral (LAI = SR- 4.4 / 3.16; SR= NIR/RED) que estima el área cubierta por el dosel vegetal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados reflejan que Combo, la cuenca que ha sufrido una gran frecuencia de incendios, presenta un mayor stock de carbono oxidable en sus suelos para las cinco unidades (BP: 21,8; B: 116,5; MP: 48,6; M: 263,7 Mg C ha^{-1}) que Muniellos, la cuenca no quemada (BP: 6,32; B: 42,5; M: 150,4 Mg C ha^{-1}). El stock de carbono orgánico edáfico estimado para la unidad de bosque sobre horizonte A continuo (B) en la cuenca quemada esta en concordancia con los valores medios para bosques templados (Prentice, 2001). No es así para esta misma unidad en la cuenca no quemada, que presenta valores muy inferiores. También las unidades de matorral en la cuenca quemada acumulan mayores cantidades de carbono orgánico edáfico (263,7 Mg C ha^{-1}) que las de la cuenca no quemada (150,4 Mg C ha^{-1}).

Por otra parte, los suelos bajo matorral en la cuenca quemada contienen los más altos valores de carbono edáfico (M: 263,7 Mg C/ha) mientras que en la misma cuenca quemada los suelos de matorral pedregoso presentan las menores concentraciones de carbono en suelo de matorral, (MP) con 48,6 Mg C/ ha. La unidad de matorral pedregoso proviene de la degradación de los brezales causada por incendios repetidos que provocan la combustión de la materia orgánica del suelo.

	Cuenca no quemada (Muniellos)	Cuenca quemada (Combo)
Unidades	*SOC Mg/ha*	*SOC Mg/ha*
B	42,5	89,74
BP	6,3	21,8
M	150,4	263,7
MP	x	48,6

Tabla 1: Stocks de carbono para en diferentes unidades sustrato-vegetación en las dos cuencas a estudio.
Nota: el stock de carbono en la unidad "Canchal" no se determina al ser prácticamente nulo.

Cuando analizamos los índices de vegetación en Combo, la cuenca quemada, estos parecen indicar una actividad fotosintética menor y menores porcentajes de cubierta vegetal (NDVI 0,551 ± 0,119; fAPAR 0,857 ± 0,193; LAI -0, 202 ±0,381), si se comparan con Muniellos (NDVI 0,627 ± 0,102; fAPAR 0,979 ± 0,165; LAI 0, 085 ± 0,582). Si además estos índices de vegetación se comparan, por unidades, entre las dos cuencas podemos observar que, para las unidades de bosque, los mayores valores se registran en la cuenca no quemada (Ej.: fAPAR = 0.92 para BP en Combo y = 0.98 para BP en Muniellos mientras que en la unidad B es igual a 0.93 en Combo y 1.01 en Muniellos). Las especies arbóreas en estos bosques son las mismas para las dos cuencas (principalmente *Quercus pirenaica)* pero la densidad de la vegetación es menor en la cuenca quemada. Resultados similares se obtuvieron para los otros dos índices de vegetación calculados (NDVI y LAI). El índice LAI muestra resultados negativos para las unidades de bosque en la cuenca quemada, lo que indica una baja cobertura foliar y, por tanto, una interferencia de la radiación del suelo con la señal tomada por el satélite.

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos parecen indicar que los incendios forestales transfieren carbono orgánico de la vegetación a los suelos, encontrándose stocks de carbono hasta tres veces mayores en los suelos de la cuenca afectada por incendios. La transferencia de carbono biomasa-suelo puede aumentar la cantidad de carbono susceptible a ser eliminado de los suelos por procesos erosivos de lavado y reptación, como pone en evidencia la existencia de la unidad MP (matorral pedregoso), unidad altamente degradada, sólo en los suelos de la cuenca quemada.

Por otra parte, en relación a los índices de vegetación, estos muestran que las unidades en la cuenca quemada tienen una menor actividad fotosintética y, por tanto, una menor capacidad de fijación de carbono atmosférico.

BIBLIOGRAFÍA

CIHLAR, J., ST-LAURENT, L., DYER, J.A., 1991. *Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables*. Remote Sensing of Environment**,** 35: 2-3, 279-298.

DIXON, R.K., BROWN, S., HOUGHTON, R.A., SOLOMON, A.M., TREXIER, M.C., WISNIEWSKI, J., 1994. *Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems.* Science 263, 185-190.

FERNÁNDEZ, S., MARQUÍNEZ, J., MENÉNDEZ DUARTE, R., 2005. *A susceptibility model for post wildfire soil erosion in a temperate oceanic mountain area of Spain*. Catena 61: 2-3, 256-272 .

MYNENI, R., RUNNING, S. W., GLASSY, J., & VOTOVA, P., 2000. User's Guide: fPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite. NASA MODIS Land Algorithm.

PRENTICE, O.C., 2001. *The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. Climate Change*: The Scienctific Basis IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 183-237.

RECONDO, C.; WOZNIAK, E.; PÉREZ-MORANDEIRA, C.S., 2002: *Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el período 1991-2001 a partir de imágenes Landsat-TM* , Revista de Teledetección 18, 47-65.

RICOTTA, C., AVENA, G., DE PALMA, A., 1999. *Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series: statistical equivalence of cumulative vegetation indices*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, 325-331.

Estimación de propiedades de los combustibles de copa mediante diferentes plataformas de datos LiDAR

Mariano García[1], David Riaño[2,3], Emilio Chuvieco[1] y John Gajardo[1]

[1]Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. C/ Colegios 2, Alcalá de Henares (Madrid, España). Tel: 918854482, Fax: 918854439. E-mail: mariano.garcia@uah.es;

[2]Institute of Economics and Geography, Spanish National Research Council (CSIC), Albasanz 26-28 28037 Madrid (Spain)

[3]Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), University of California, 250-N, The Barn, One Shields Avenue, Davis. CA 95616-8617, USA

RESUMEN

La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) ha mostrado su potencial para estimar importantes propiedades de los combustibles forestales gracias a su capacidad para proporcionar medidas precisas de la estructura de la vegetación, superando aquellas proporcionadas por sensores pasivos o RaDAR. Este trabajo muestra el potencial del uso de datos LiDAR tomados desde distintas plataformas (terrestre, aeroportada y satelital) para la estimación de características estructurales de los combustibles forestales que son de gran importancia para la gestión de los incendios forestales.

Palabras clave: LiDAR, incendios forestales, combustibles forestales.

ABSTRACT

Accurate spatially explicit information on forest fuels is critical to improve fire management. LiDAR (Light Detection and Ranging) technology has proven a great potential to estimate important forest fuel properties due to its capability to measure vegetation structure more accurately than optical sensors or RaDAR. This paper presents the potential of LiDAR data acquired from different platforms (ground-based, airborne and satellite) to estimate important forest fuels characteristics for forest fire management.

Keywords:*LiDAR, forest fire, forest fuels.*

INTRODUCCIÓN

Desde sus comienzos, la teledetección se ha mostrado como una alternativa sólida para cartografiar combustibles a distintas escalas espaciales gracias a la observación global, consistente y sistemática, así como en regiones del espectro no visible que los sensores remotos nos proporcionan de las características de la vegetación. Sin embargo también existen ciertas limitaciones como (Keane et al., 2006; Salas and Chuvieco, 1995):

- Los sensores ópticos no pueden detectar combustibles de superficie debido a la oclusión causada por las copas
- Los sensores pasivos no pueden discriminar tipos de combustibles que sólo se diferencian en su altura.

Estas limitaciones de los sensores ópticos pueden superarse mediante el empleo de datos LiDAR, debido a la capacidad de esta tecnología para proporcionar con gran precisión las coordenadas X,Y,Z de una densa nube de puntos que permiten describir detalladamente la superficie terrestre. Los sistemas LiDAR miden el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y su retorno tras reflejarse en la superficie que se observa, lo que permite determinar la distancia sensor-objeto. Esta información, unida a los datos proporcionados por el sistema GPS/IMU permite determinar las coordenadas (X, Y, Z) del punto donde se refleja el pulso láser.

La mayoría de los sistemas comerciales son sistemas discretos capaces de grabar varios retornos correspondientes a distintas superficies sobre las que incide el pulso emitido, lo que permite caracterizar con gran detalle la estructura vertical de la vegetación. Otros sistemas son capaces de registrar la señal de retorno de manera

continua, en pequeños intervalos de tiempo (1 ns) permitiendo generar una huella completa de la onda emitida y reflejada. Además de esta información, los sistemas LiDAR pueden registrar la intensidad de cada retorno, la cual representa la cantidad de energía correspondiente a cada retorno recibido.

Diversos estudios han mostrado la utilidad de los datos LiDAR para estimar características del dosel como por ejemplo, altura del dosel (Goodwin et al., 2006; Naesset, 1997), fracción de cabida cubierta (Morsdorf et al., 2006; García et al., 2010), así como la altura de base de copa (Riaño et al., 2003; Popescu y Zhao, 2008) o la densidad de combustible de copa (DCC) (Riaño et al., 2003; Erdody y Moskal, 2009).

A pesar del potencial de los datos LiDAR para caracterizar los combustibles forestales es necesario el desarrollo de una metodología adecuada en función de las características de los datos adquiridos. Este trabajo muestra distintos métodos desarrollados para caracterizar los combustibles forestales y que han sido adaptados a los datos proporcionados por cada tipo de sensor.

ESTIMACIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE DATOS LiDAR AEROPORTADOS

Este trabajo se desarrolló en el Parque Natural del Alto Tajo (España) y su objetivo fue estimar las fracciones de biomasa de distintas especies forestales (García et al., 2010). El procesamiento de los datos LiDAR implicó primero el filtrado de los mismos para separar retornos de suelo y retornos de vegetación. Posteriormente se normalizó la altura de los retornos con respecto al terreno, restando a la elevación de cada punto la correspondiente al terreno en esa posición. A continuación se derivaron una serie de variables relacionadas con la estructura de la vegetación, la distribución de biomasa y la fracción de cabida cubierta. Así, se derivaron la altura media, percentiles de altura (25, 50, 75, 90, 99), diferencia de percentiles (99-50, 99-25, 90-50 y 90-25), y el porcentaje de retornos del dosel con respecto al total de retornos.

También se exploró la utilidad de los datos de intensidad para estimar biomasa. La intensidad grabada por los sistemas LiDAR es función de la energía del láser, el ángulo de incidencia, la reflectividad del objeto, el área del mismo, la absorción atmosférica y la distancia sensor-objeto (Coren and Sterzai, 2006). Para poder comparar valores de intensidad entre regiones, vuelos, o incluso a lo largo de una misma línea de vuelo es necesario calibrar los valores de intensidad. Para ello se normalizaron los valores de intensidad con respecto a una distancia estándar, eliminando así el efecto de la variación en distancia sensor-objeto (García et al., 2010).

A partir de los datos de intensidad se derivaron también una serie de variables como percentiles de intensidad, fracción de cubierta, así como el porcentaje de intensidad acumulado en distintos percentiles de altura, las cuales consideran intrínsecamente la altura y pueden considerarse como una integración de los datos de altura e intensidad (García et al,. 2010). Una vez generadas las distintas variables se realizó un análisis de regresión lineal por pasos siendo la variable dependiente la biomasa calculada a partir de los datos de campo y como variables independientes las variables derivadas a partir de datos LiDAR. Se generaron modelos para los datos de altura, los datos de intensidad y combinando ambos. También se desarrollaron modelos específicos para cada especie (pino, sabina y encina). Los modelos se seleccionaron en función del coeficiente de determinación (R^2), el error medio absoluto (EMA), el error medio cuadrático (EMC) y los componentes sistemático y no sistemático del EMC.

En el caso del modelo general, los modelos que integraron valores de intensidad y altura ofrecieron los mejores resultados con valores de R^2>0,6. Los resultados mejoraron notablemente al desarrollar modelos específicos para cada especie, con valores de R^2 superiores a 0.7 en todos los casos. Para los modelos específicos los modelos de intensidad fueron los que ofrecieron mejores resultados, si bien las diferencias con los modelos basados en alturas fueron en algunos casos insignificantes.

CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES DE COPA MEDIANTE LiDAR TERRESTRE

Este trabajo se desarrolló en Delamere Forest, en el condado de Chesire (Inglaterra). En él se evaluó la capacidad de los sistemas LiDAR terrestre para estimar propiedades de los combustibles de copa (García et al. *2011*).

Los datos se tomaron en 8 parcelas con un radio de 10 m, empleando un sistema Riegl LMS-Z390i (http://www.riegl.com/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/1/),

registrando sólo el primer retorno. En estas parcelas se midió la altura de los árboles, la altura de la base de copa, el tamaño de las copas y, para 6 parcelas, también se tomaron fotografías hemisféricas para estimar la fracción de cubierta.

Para la estimación de la altura del dosel, una vez normalizadas las alturas de los retornos con respecto al terreno, se consideraron tres enfoques distintos considerando la distribución de alturas de los retornos del dosel, la distribución de alturas de los retornos correspondientes al 1% de los datos de mayor elevación y a partir de la generación de un modelo digital de dosel con una resolución de 0.5 m. A partir de estos datos se estimó la altura media, la mediana, el percentil 95 y el 99. Se consideró el percentil 99 en vez de la máxima altura para evitar posibles valores anómalos. Los dos últimos enfoques considerados pretenden eliminar el efecto de la oclusión de las partes altas del dosel ocasionada por las partes bajas del mismo debido a la localización del escáner (1,4 m sobre el terreno).

La altura estimada a partir del percentil 99 del modelo digital del dosel proporcionó los mejores resultados con un R^2 de 0,81, y un RMSE de 2,47 m.

La fracción de cabida cubierta (FCC), definida como la proyección vertical de las copas, se estimó como la proporción de píxeles ocupados con respecto al total de píxeles de una imagen binaria en la que el valor 1 indica que el píxel contiene al menos un retorno y el valor 0 indica que no contiene ningún retorno. Se probaron distintos tamaños de pixel para encontrar la resolución óptima y se estudió el efecto del ángulo cenital en intervalos de 5º.

Los resultados mostraron que la precisión en la estimación de FCC mejoraba al aumentar la resolución hasta llegar a 3cm (EMC= 15,81%) incrementándose de nuevo para resoluciones mayores. En cuanto al efecto del ángulo de observación, se observaron pequeñas diferencias (2% entre 10º-50º), obteniéndose las mayores diferencias para los ángulos menores de 5º. En este caso las diferencias pueden deberse a errores en el co-registro entre la fotografía hemisférica y el escáner, o como consecuencia de una inadecuada nivelación de uno de los sistemas.

Para estimar la altura de la base de copa y la distancia entre estratos combustibles se derivó el perfil vertical de la vegetación y se identificaron los distintos estratos en función de la fracción de cubierta en intervalos de 30 cm. Se tomó como base de copa la altura mínima del estrato superior. Así mismo, puesto que se identificaron distintos estratos, fue posible derivar la distancia entre el dosel y los combustibles de superficie. Esta variable es de gran importancia para estimar el riesgo de transición de un incendio de superficie a un incendio de copa.

Los valores de R^2 obtenidos para la base de copa y la distancia entre estratos fueron de 0,86 y 0,87 respectivamente, después de eliminar una parcela que presentaba numerosas ramas muertas en las partes bajas del dosel, que no fueron consideradas en campo pero sí fueron detectadas con los datos LiDAR. Al no disponer de datos de intensidad no fue posible separar las ramas muertas de las vivas.

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE COMBUSTIBLE DE COPA A PARTIR DE DATOS ICESat/GLAS

En este trabajo se evaluó la capacidad de los datos proporcionados por el LiDAR a bordo de satélite ICESat/GLAS para estimar la DCC en un área del Este de Texas, USA (García et al., en revisión). Los resultados se contrastaron con datos generados a partir de LiDAR aerportado previamente validados con datos de campo.

Los datos GLAS empleados corresponden a los productos 01 y 14. El primero contiene la información relativa a la huella en intervalos de 15cm, mientras que el segundo contiene un conjunto de parámetros derivados de la huella como localización, elevación, número de funciones gaussianas ajustadas a la huella, comienzo y final de la señal, entre otros.

Para estimar la DCC se adaptó el método empleado para su estimación a partir de datos de campo a los datos proporcionados por el sensor GLAS. Así, para cada huella se obtuvo la biomasa foliar (FB) a partir del índice de área foliar (IAF), obtenido a partir de datos GLAS, y del índice de área específico (IAE), y teniendo en cuenta la fracción de cubierta dentro de cada huella, obtenida también a partir de los datos GLAS. Posteriormente se distribuyó la FB a lo largo del dosel teniendo en cuenta la energía en cada intervalo, la cual es proporcional a la cantidad de material presente en el intervalo. A continuación se normalizó la energía del dosel para que su suma fuese 1. Finalmente se calculó una media móvil con una amplitud de 4.5 m y se asignó como valor de densidad de combustible de dosel el valor máximo.

Este método proporcionó un R^2 de 0,76 con un RMSE de 0,07 kg m^{-3}, lo que representa aproximadamente el 50% del valor medio para la zona de estudio. Estas diferencias pueden explicarse por el valor de IAE utilizado, el cual fue obtenido para otra zona distinta al área de estudio y por las ecuaciones empleadas para estimar la DCC a partir de los datos aeroportados. Estas ecuaciones mostraron una sobrestimación de 2,5 veces los valores obtenidos con el software CrownMass (Mutlu, 2010), el cual emplea el método a partir del cual se derivó el utilizado con los datos GLAS.

CONCLUSIONES

Los datos LiDAR presentan un gran potencial para caracterizar los combustibles forestales. Actualmente, estos datos pueden obtenerse desde distintas plataformas (terrestre, aerportada y satélite), pero es necesario desarrollar metodologías adaptadas a cada plataforma.

Las distintas plataformas empleadas representan también la posibilidad de utilizar los datos LiDAR a distintas escalas, desde una escala local (terrestre/aeroportado), hasta una escala global (ICESat/GLAS), por lo que la integración de los datos proporcionados por estos sensores entre sí y con otros sensores, ofrece una línea de investigación abierta.

BIBLIOGRAFÍA

COREN, F., Y STERZAI, P. (2006). *Radiometric correction in laser scanning.* International Journal of Remote Sensing, 27, 3097-3104

ERDODY, T.L., Y MOSKAL, L.M. (2009). *Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels*. Remote Sensing of Environment,114, 4, 725-737

GARCÍA, M., RIAÑO, D., CHUVIECO, E., Y DANSON, F.M. (2010). *Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in Spain using height and intensity LiDAR data*. Remote Sensing of Environment, 114, 816-830

GARCÍA, M., DANSON, F.M., RIAÑO, D., CHUVIECO, E., RAMIREZ, E., Y BANDUGULA, V. (2011). *Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,13, 636-645..

GARCÍA, M., POPESCU, S., RIAÑO, D., NEUENSCHWANDER, A., AGCA, M., ZHAO, K. Y CHUVIECO, E. (en revisión). *Characterization of canopy fuels using ICESat/GLAS data*. Remote Sensing of Environment

GOODWIN, N.R., COOPS, N.C., Y CULVENOR, D.S. (2006). *Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude*. Remote Sensing of Environment, 103, 140-152

KEANE, R.E., FRESCINO, T., REEVES, M.C., Y LONG, J.L. (2006). *Mapping wildland fuel across large regions for the LANDFIRE Prototype Project*. In M.G.F. Rollins, C.K. (Ed.), The LANDFIRE Prototype Project: nationally consistent and locally relevant geospatial data for wildland fire management. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-175. Fort Collins: U.S.D.A., Forest Service, rocky Mountain Research Station

MORSDORF, F., KOTZ, B., MEIER, E., ITTEN, K.I., Y ALLGOWER, B. (2006). *Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction.* Remote Sensing of Environment, 104, 50-61

MUTLU, M. (2010). *Estimating canopy fuel parameters with in-situ and remote sensing data*. PhD Dissertation, Texas A&M University

NAESSET, E. (1997). *Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52, 49-56

POPESCU, S.C., Y ZHAO, K. (2008). *A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees*. Remote Sensing of Environment, 112, 767-781

RIAÑO, D., MEIER, E., ALLGOWER, B., CHUVIECO, E., Y USTIN, S.L. (2003). *Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling.* Remote Sensing of Environment, 86, 177-186

SALAS, F.J., Y CHUVIECO, E. (1995). *Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles*. Revista de Teledetección, 5, 18-28

Análisis espacio-temporal de cartografía de área quemada en grandes incendios de bosques boreales en Canadá en el año 2000

J.R. García Lázaro[1], J.A. Moreno Ruiz[1], L. Núñez[2] y M. Arbelo[2]

[1] Dpto. Lenguajes y Computación. Universidad de Almería, 04120 La Cañada de San Urbano, (Almería, España). Correo electrónico: jrgarcia@ual.es

[2] Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Universidad de La Laguna. Avda. Astrof. Fco. Sánchez s/n. 38206 La Laguna (Tenerife, Canarias, España).

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron las posibilidades que ofrecen las imágenes AVHRR-LTDR v.3, con una resolución espacial de 0.05º, para la estimación de área quemada en grandes incendios (más de 5000 ha) mediante la utilización de técnicas de "*machine learning*". Se presentan los resultados de un análisis comparativo efectuado con productos de área quemada derivados de otros conjuntos de datos de satélite disponibles (MODIS, SPOT-VGT, AVHRR-LAC). El área de estudio considerada está localizada en la región oeste de Canadá, con una vegetación compuesta predominantemente por bosques boreales, donde se dispone de una base de datos detallada de todos los incendios forestales registrados por el Canadian Forest Service desde hace varias décadas, la cual será utilizada para la evaluación de la exactitud de los productos de área quemada obtenidos. El análisis espacio-temporal comparativo se limita al año 2000 por ser este el único año en el que se dispone simultáneamente de todos los conjuntos de datos considerados.

Palabras clave: área quemada, NOAA-AVHRR, MODIS, SPOT-VGT, LAC, LTDR.

ABSTRACT

The capabilities that offer AVHRR-LTDR v.3 imaging, with a spatial resolution of 0.05º, for estimating burned area in large fires (over 5000 ha) were assessed by "machine learning" techniques. The results of a conducted comparative analysis with some available burned area products derived of other satellite datasets (MODIS, SPOT-VGT, AVHRR-LAC) are presented. The study area is located in western Canada, where boreal forests constitute the predominant vegetation. Also, a detailed database is available and it includes all the forestry fires registered by the Canadian Forest Service since several decades ago. We used it to assess the accuracy of the different burned area products. The spatial-temporal comparison is limited to year 2000 because it is the only year where all the considered datasets are available simultaneously.

Keywords: *burned area, NOAA-AVHRR, MODIS, SPOT-VGT, LAC, LTDR*

INTRODUCCIÓN

Los incendios en biomasas forestales constituyen una de las principales contribuciones a la emisión de aerosoles y gases de efecto invernadero procedentes de la quema de biomasa, alterando el balance de carbono entre la tierra y la atmósfera, modificando el albedo de la tierra y causando cambios en el clima y en el balance de radiación. En la última década la perdida de la cubierta de bosque ha sido significativa en la biomasa boreal. Diferentes instituciones y centros de investigación han centrado sus esfuerzos en la cartografía y cuantificación de las áreas quemadas a escala global a partir de datos recogidos por sensores remotos a bordo de diferentes satélites.

Entre estas iniciativas cabe citar el proyecto GLOBSCAR de la Agencia Espacial Europea (ESA), para la producción de mapas mensuales de área quemada de 1km de resolución a partir de imágenes obtenidas por el sensor ATSR-2 a bordo del satélite ERS-2, y el algoritmo GBA2000 desarrollado por la Unidad de Monitorización de la Vegetación Global (GVM) del Joint Research Centre (JRC) junto con otros centros de investigación, para la generación de un mapa global de área quemada de 1 km de resolución, pero esta vez usando datos del sensor VEGETATION (VGT) a bordo del satélite SPOT-4. Ambas iniciativas están limitadas al año 2000, pero el producto GBA2000 ha evolucionado en un nuevo producto denominado L3JRC con una cubierta temporal más amplia.

Recientemente la NASA ha puesto a disposición de la comunidad científica el producto de área quemada a escala global MCD45A1, derivado a partir de datos del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua, con 500 m de resolución y una cubierta temporal que empieza a partir del año 2000.

Para una cubierta temporal más amplia hay que recurrir a los datos del sensor AVHRR a bordo de satélites de la serie NOAA, disponibles a partir del año 1981 en formatos HRPT y LAC (1 km de resolución) y GAC (4 km de resolución). A partir de estos datos se han generado diferentes series temporales de imágenes de baja resolución temporal a escala global, que se han utilizado en estudios del comportamiento inter-anual y temporal de la cubierta de tierra y en el desarrollo de parámetros que se utilizan en el modelado del clima. El conjunto de datos LTDR versión 3 fue lanzado en 2010 y es la más reciente de estas series temporales de baja resolución a escala global; ha sido derivado a partir de datos GAC e incluye mejoras en la corrección atmosférica y en los métodos de calibración, presentado una mayor coherencia radiométrica a lo largo de la serie.

A partir del conjunto LTDR se ha desarrollado una serie temporal de área quemada para la región de Canadá. Se ha construido un clasificador a nivel de píxel que integra un modelo basado en razonamiento con retículos difusos (para el establecimiento de umbrales multi-temporales en las bandas radiométricas e índices radiométricos derivados) con una red bayesiana (para establecer la probabilidad de que un píxel esté quemado); una etapa final de post-procesamiento considera condiciones de vecindad espacial a nivel de píxel la cual permite reducir en torno a un 10% la incertidumbre generada en la clasificación.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de dicha serie temporal con otros productos de área quemada (Tabla 1).

Id	Conjunto de datos y resolución	Algoritmo
LAC	AVHRR diarios 0.01° (~1 km)	Contextual multi-temporal/multi-umbral (Chuvieco et al., 2008)
LTDR	AVH09C1 diarios 0.05° (~5 km)	Clasificación con red bayesiana (Moreno-Ruiz et al.,2011)
MODIS	MCD45A1 diarios (~500 m)	Función de distribución de reflectancia bi-direccional (Roy et al., 2005)
VGT	GBA2000 mensual 0.01° (~1 km)	Modelo de regresión logística múltiple (Fraser y Li, 2002)

Tabla 1: Productos de área quemada con indicación de los conjuntos de datos de los que se derivan y la referencia del algoritmo utilizado.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la región de bosques boreales de Norte América, donde se ha seleccionado un conjunto de 9 áreas quemadas registradas por el Canadian Forest Service (CFS) en la National Fire Database (NFD), correspondientes todas ellas a fuegos mayores de 5000 ha que ocurrieron en la región oeste de Canadá durante el año 2000.

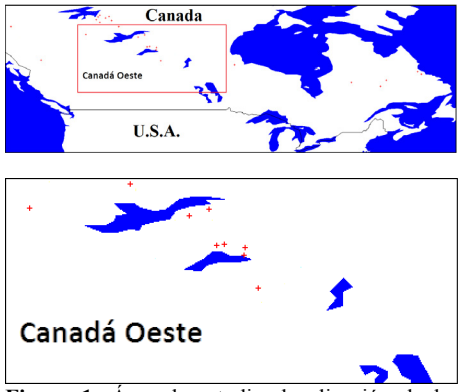


Figura 1: Área de estudio: localización de las áreas quemadas mayores de 5000 ha registradas durante el año 2000 en la región oeste de Canadá (62°16'N,-122°20'E) a (53°N,-96°30'E).

Latitud	Longitud	Tamaño (ha)
62.1015	-120.1923	5450
63.4666	-114.3833	6500
61.6500	-111.0463	7693
62.0831	-109.8891	20040
59.9687	-109.4375	16452
60.0666	-109.0000	9249
59.8490	-107.8333	19154
57.4740	-107.0521	39850
59.4323	-107.8646	43701

Tabla 2: Geo-referenciación del punto de inicio del fuego y extensión de las áreas quemadas seleccionadas, según la base de datos de referencia (NFD).

METODOLOGÍA Y VALIDACIÓN

Se seleccionaron 9 zonas de 50 km de lado que incluyen un área quemada de grandes dimensiones (mayor de 5000 ha) en su parte central. Se procedió inicialmente a eliminar manualmente de las mismas los píxeles quemados correspondientes a otros incendios. A partir de dicho conjunto de zonas de referencia se procedió a construir sendos conjuntos de zonas para los diferentes productos de área quemada, recortando las imágenes originales, dejando el área quemada aproximadamente en la parte central y eliminando los píxeles quemados que no corresponden a la misma. En este proceso se preservó la resolución espacial original de cada conjunto de datos. Para cada producto se estimó el área quemada correspondiente a cada zona, comparándose dichos valores con los de referencia.

Evaluación de la exactitud

Análisis espacial

Para comparar los diferentes productos en la región de estudio, con la Ecuación 1 se calculó el error relativo cometido en la estimación de área clasificada como quemada en cada zona de la muestra con respecto al área quemada de referencia:

$$ErrorRelativo_i = \frac{AreaClasificadaQuemada_i - AreaQuemada_i}{AreaQuemada_i} \quad (1)$$

De esta distribución de errores relativos, se calculó el valor medio ponderado (Ecuación 2) y su desviación estándar (Ecuación 3), utilizando como peso el porcentaje de área quemada de cada zona con respecto al total de todas las zonas:

$$\mu = \sum \frac{ErrorRelativo_i * AreaQuemada_i}{AreaQuemadaTotal} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(ErrorRelativo_i - \mu)^2 * AreaQuemada_i}{AreaQuemadaTotal}} \quad (3)$$

Análisis temporal

Para evaluar la exactitud temporal de los productos de área quemada, se construyó la distribución temporal de área quemada estimada en fuegos mayores de 5000 ha. Estos patrones temporales fueron comparados con los obtenidos a partir de los datos de referencia (CFSNFD). Se utilizó la fecha de inicio/detección del fuego en cada píxel identificado como quemado en cada conjunto de datos para construir el histograma temporal. Como las unidades temporales son diferentes en cada mapa temático (mensual en VGT, diario en CFSNFD, MODIS y LAC, y periodos de 10 días en LTDR), se construyeron distribuciones mensuales y de composiciones de 10 días para obtener el mayor nivel de detalle posible en cada caso.

RESULTADOS



Figura 2: Discrepancias espacio-temporales entre los productos de área quemada MODIS, VGT, LAC y LTDR (*de izquierda a derecha y de arriba a abajo*) para el área quemada con punto de ignición (62.08°N,-109.89°E). Se han añadido los contornos orientativos del área quemada (versión de polígonos de CFSNFD).

Errores relativos			
Imagen	Canadá-Oeste		
	μ	σ	Kappa
MODIS	-75.73	22.40	0.34
VGT	3.92	38.49	0.84
LAC	-34.04	28.14	0.76
LTDR	-35.48	28.54	0.75

Tabla 3: Media y desviación estándar de los errores relativos en las estimaciones de área quemada de los diferentes productos de área quemada, para fuegos mayores de 5000 ha en la región oeste de Canadá durante el año 2000. La última columna presenta el índice kappa derivado de la matriz de error como medida de fiabilidad.

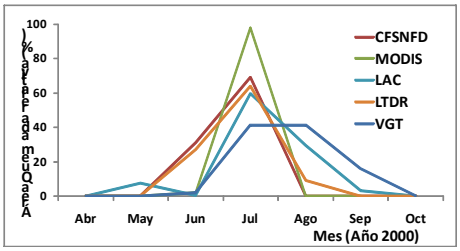


Figura 3: Distribución mensual de área quemada relativa (porcentaje del área quemada total) en fuegos mayores de 5000 ha registrados en la región oeste de Canadá durante el año 2000 (CFSNFD) y detectados por los diferentes productos de área quemada.

CONCLUSIONES

La comparativa entre los diferentes productos de área quemada muestra una sub-estimación del área quemada en todos los grandes incendios registrados para todos los productos considerados, excepto para VGT. El rango promedio del error relativo de la estimación está comprendido entre el 4% para el producto GBA2000 obtenido a partir de SPOT-VGT (pero con una mayor variabilidad) y más del 75% para el producto de áreas quemadas de MODIS, siendo éste muy similar para los productos derivados de LTDR y LAC, en torno a un 35%.

En lo que respecta a la exactitud temporal, el patrón mensual de las fechas de detección de las áreas quemadas obtenidas a partir de LTDR concuerda con el de las fechas de inicio de fuegos de referencia, mostrando el mejor comportamiento temporal frente a los otros productos de área quemada, que en general presentan un desfase entre 1 y 2 meses.

B IBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E., ENGLEFIELD, P., TRISHCHENKO, A., AND LUO, Y. (2008). *Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data*. Remote Sensing of Environment, 112(5), 2381-2396.

FRASER, R., AND LI, Z. (2002). *Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION*. Remote Sensing of Environment, 82(1), 95-110.

LITTLE, J. (2009). *Wildland Fire Information Systems Group. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta*. Personal communication: electronic mail, National Fire Database - Agency fire polygon data, 30 September 2009.

MORENO RUIZ, J.A., RIAÑO, D, A., ARBELO, M., FRENCH, N., USTIN, S. (2011). *Burned area mapping time series in Canada (1984-1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters*. Remote Sensing of Environment, ('en revisión').

ROY, D., JIN, Y., LEWIS, P., AND JUSTICE, C. (2005). *Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data*. Remote Sensing of Environment, 97(2), 137-162.

AGRADECIMIENTOS

A Emilio Chuvieco por la información del registro de área quemada generado a partir de datos LAC y a Mike Flannigan y John Little por el conjunto de datos con los perímetros de los fuegos para la región de Canadá. A las agencias y servicios para el procesamiento y distribución de datos de satélite de NASA y NOAA, a partir de los cuales se han obtenido la mayor parte de las imágenes usadas en este trabajo (MODIS, LAC and LTDR). Las imágenes SPOT 4 - VEGETATION estuvieron disponibles dentro del marco del proyecto GBA 2000.

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2010-22189-C02 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Evolución de las áreas quemadas en Colombia a partir del producto MODIS-MCD45

F. González-Alonso[1], D. Armenteras[2], C. Franco[2], M. Morales[2], V. Salgado[1] y S. Merino-de-Miguel[3]

[1] Laboratorio de Teledetección. CIFOR-INIA. Carretera de la Coruña Km. 7.5 28040 Madrid (España). Correo electrónico: fgainia@gmail.com, alonso@inia.es

[2] Universidad Nacional de Bogotá (Bogotá, Colombia)

[3] EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid (España)

RESUMEN

Los incendios forestales son una de las principales causas de la deforestación y degradación de los bosques en el mundo y se estima que cada año emiten 2.5 GTn de Carbono a la atmósfera, lo cual representa aproximadamente el 25% del total de las emisiones anuales de CO_2. Según las estadísticas de la FAO, durante el período 2000-2010, se quemaron el 1% de los bosques del mundo, pero estimaciones realizadas a partir de imágenes de satélite elevan este porcentaje hasta el 4.35%. Los incendios forestales inciden sobre la cubierta del suelo y son un factor importante sobre la dinámica de la vegetación y el uso del suelo. La estadística de los incendios forestales en Colombia no es muy bien conocida y no existen datos concordantes acerca de la magnitud de los mismos. En este trabajo se analiza la distribución en el tiempo y en el espacio del área quemada para todo el territorio Colombiano a partir del producto de área quemada MCD45. Se presenta un análisis de la dinámica interanual y mensual de la superficie afectada por los incendios para distintas cubiertas del suelo y regiones naturales del país. La Orinoquia y los herbazales son la región y el tipo de cubierta más afectado, pero los bosques en la Amazonia y los pastos en el Caribe deben recibir atención. La información proporcionada por este tipo de análisis puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en el manejo de los recursos forestales y la puesta en marcha de los mecanismos REDD+ en Colombia.

Palabras clave: Área quemada, MODIS, anomalías térmicas, Colombia.

ABSTRACT

Forest fires are one of the main reasons causing deforestation and forest degradation around the world. This phenomenon seems to be responsible for the emission of 2.5 GTn of C to the atmosphere, a figure that may suppose around 25% of total CO_2 emissions. According to the FAO statistics, during the period 2000-2010, 1% of world forests were burned, although estimations using satellite data are of 4.35%. Forest fires affect land cover and they play an important role in vegetation dynamics and land use. Forest fires statistics in Colombia are not very well done since data from different sources are not concordant. In this paper, we analyzed the temporal and spatial distribution of the burned area in Colombia using the MCD45 product. We present an analysis of the inter-annual dynamics and total monthly burned area for different land covers and natural regions throughout the country. The Orinoquia and grasslands are the most affected region and land cover, respectively. However, other areas such as the Amazonia or the Caribbean grasslands also may need attention. Information derived from this type of studies may be very useful for forest resources management as well as for the implementation of REDD+ mechanisms in Colombia.

Keywords: *Burned area, MODIS, thermal anomalies, Colombia.*

INTRODUCCIÓN

Desde hace miles de años, el fuego ha dejado de ser una fuerza natural que modifica el paisaje para convertirse, en la mayoría de los casos, en una herramienta antrópica que permite adaptar el ambiente con rapidez y facilidad a las necesidades del hombre. Estos fuegos antropogénicos no sólo se han hecho cada vez más frecuentes y extensivos, sino que también afectan cada vez más a los ecosistemas naturales, disminuyendo su resistencia (Roberts, 2000). Aunque el fenómeno del fuego afecta por igual a casi todas las regiones del planeta, el énfasis en la investigación del

fuego estuvo durante mucho tiempo en los ecosistemas subtropicales y templados, y sólo desde la última década ha comenzado a desarrollarse investigación en torno a los fuegos de las regiones tropicales, especialmente bosques y sabanas y de su impacto sobre el uso y la cubierta del suelo (Roberts, 2000). El cambio de usos del territorio es reconocido como uno de los principales impactos globales sobre la biodiversidad, con el cambio climático, la deposición del nitrógeno y la introducción de especies exóticas.

Adicionalmente a los productos de área quemada globales, también se han generado productos de área quemada regionales. Chuvieco *et al.* (2008) generaron un producto de área quemada para Latinoamérica para el año 2004, denominado AQL2004. La estimación del área quemada para todo el continente latinoamericano fue de 153,215 km^2, de los cuales 19,449 km^2 correspondieron a Colombia. La comparación de productos globales de área quemada es problemática pues las cifras que se han obtenido en diferentes productos son muy diferentes. Chang y Song (2009) han comparado los productos globales de área quemada L3JRC (Tansey *et al.*, 2008) y MCD45 para el período 2000-2006 y han obtenido unas cifras medias globales de área quemada de 4,010,858km^2 y 3,465,434km^2, respectivamente. El valor promedio de área quemada para dicho período en el caso de Sudamérica según las estimaciones de L3JRC, fue de 360,882km^2 lo cual representa el 8,99% del total de área quemada mundial. En el caso del producto MCD45 la cifra promedio de área quemada para el periodo 2000-2006 para Sudamérica fue de 176,601km^2, lo cual representa el 5.09% del área quemada mundial según MCD45. Según las estimaciones de L3JRC cada año se quema en promedio el 2% de Sudamérica y según las estimaciones de MCD45 el 0.99% del continente.

Román-C *et al.* (2003), Cochrane y Schulze (1998) y Armenteras *et al.* (2009) por su lado son algunos ejemplos de investigaciones recientes sobre el comportamiento temporal y espacial del fuego en México, Brasil y Colombia, respectivamente.

En este trabajo se analiza la distribución en el tiempo y en el espacio del área quemada para todo el territorio Colombiano durante el período 2001-2008, a partir del producto de área quemada MCD45. Se presenta un análisis de la dinámica interanual y mensual de la superficie afectada por los incendios para distintas cubiertas del suelo y regiones naturales del país.

MATERIAL

Los materiales utilizados son la serie temporal de área quemada del producto MCD45 (Roy *et al.,* 2005, Boschetti *et al.,* 2009). La NASA dispone en los satélites Terra y Aqua de un espectro-radiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), el cual les ha permitido generar una serie de productos MODIS globales, incluyendo el MCD45 de área quemada de 500 m. Para este estudio se recopilaron los conjuntos de datos mensuales para el periodo de diciembre de 2000 a marzo de 2009. Para los análisis de área quemada anuales, sólo se contempló la información del período enero 2001 a diciembre 2008. Entre otros aspectos, este producto reporta la calidad del dato de área quemada a nivel del pixel (QA), en una escala que va de 1 (más confiable) a 4 (menos confiable); en el caso de este estudio sólo se seleccionaron aquellos pixeles de 500m con QA igual a 1.

Las unidades de análisis de este estudio asociadas con el estado de la cubierta del suelo resultaron de la integración de información cartográfica digital de regiones naturales y de la propia cubierta del suelo. Las 5 regiones naturales fueron derivadas del modelo de elevación digital (SRTM, 2002). El segundo componente, la cubierta del suelo, corresponde a una reclasificación de la cartografía de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (IDEAM *et al*., 2007) para el año 2000, escala 1:500,000. De la integración de estas dos fuentes de información surgió la cartografía de unidades de cubierta/región, la que permite caracterizar el área de estudio en 27 diferentes unidades de análisis.

METODOLOGÍA

Para el producto de área quemada mensual, se procedió a eliminar las posibles superposiciones de áreas quemadas entre meses contiguos. Por medio de operaciones simples de intersección de mapas y extracción de áreas superpuestas, se procedió a calcular mes a mes el área afectada por quemas y detectada como quemada con los diferentes tipos de cobertura. Estos datos, se sintetizaron anualmente sumando la superficie quemada mes a mes durante todo el período analizado para cada una de las diferentes unidades de análisis. También se analizó la recurrencia de incendios a lo largo del periodo analizado.

RESULTADOS

Pese a que algunas regiones naturales de Colombia han sido sometidas a considerables niveles de intervención antrópica sobre la cubierta del suelo (especialmente los Andes y el Caribe), aún puede considerarse que el país está dominado por bosques, los cuales suman un poco más de 61 millones de ha. De éstos, los más extendidos son los bosques de la Amazonia, que ocupan el 36.57% del territorio terrestre del país (41,629,725ha), seguidos por los bosques de los Andes, con 9,434,083ha (8.29%), los pastos de los Andes (8.04%), los herbazales de la Orinoquia (8.04%) y los pastos del Caribe (6.32%).

El territorio anteriormente descrito en términos de cubierta del suelo/región se vio afectado por incendios forestales durante al período de análisis en una extensión total de 3,609,750ha (3.17% del país). Los resultados presentan al año 2003 como aquel con más superficie quemada en Colombia, con unas 942,787ha, seguido del 2004 (779,274ha) y del 2007 (753,904ha) respectivamente. En años como en el 2006 se reporta una baja extensión de área quemada (únicamente 74,033ha) seguida del año 2008 (125,876ha) y 2005 (129,208ha) respectivamente. Otro de los aspectos de los incendios forestales contemplado aquí es la recurrencia anual. Entre diciembre del año 2000 y diciembre de 2008 el 42.7% (unas 1,213,650ha) del área quemada sólo se vio afectada una vez y el resto, un 57.3% del área quemada presenta recurrencia a lo largo de los años con una frecuencia superior a dos veces.

El área quemada no sólo fluctúa entre años, también lo hace a lo largo de ellos. Para el caso colombiano, es durante el período comprendido entre diciembre y febrero cuando el área quemada se intensifica, correspondiendo esta situación a una de las temporadas secas dominantes en el país. Por región natural, Colombia registra un panorama diferencial en lo que a área quemada anual se refiere. La Orinoquia, una región relativamente plana y dominada por formaciones herbáceas, concentra, sin importar el año, la mayor proporción de área quemada en el país, llegando en casos como el de 2005 a equivaler al 95% de todos la extensión asociada a incendios forestales. Esta es seguida a lo largo de todos los años por la superficie quemada detectada para la Amazonia y la región del Caribe. El área anual quemada para los Andes, la región más densamente poblada del país y la segunda más extensa, no superan en ninguno de los casos el 3% del área total anual quemada de toda Colombia. Finalmente, la región Pacífico es la que menor área anual quemada registra en el periodo analizado, consecuencia quizás del régimen climático asociado a ella.

Al analizar el área quemada con respecto al tipo de cubierta del suelo vuelve a presentarse una situación contrastante. En este caso son los herbazales el tipo de cubierta más afectada por incendios a lo largo de los años analizados. Estos herbazales se presentan especialmente en la región de la Orinoquia, mencionada como la más afectada. Incluso al analizar el área quemada por tipo de cubierta estandarizada por el área total existente de la misma se puede observar que la más afectada por los fuegos sigue siendo los herbazales. Esta está seguida por pastos y bosques, en proporciones mucho más bajas.

Si bien los incendios forestales en Colombia no están predominantemente asociados a cubiertas del tipo boscoso, su incidencia en casos como el de los años 2003, 2004 y 2007 es considerable, especialmente teniendo en cuenta los costos que representa restaurar un bosque a su estado original. De las hectáreas reportadas como área anual quemada, la mayor proporción, en todos los años, corresponde a los bosques de la región de la Orinoquia, los cuales se disponen como cordones riparios a lo largo de los ríos en las denominadas "matas de monte", los cuales están inmersos en una matriz dominada por herbazales. En todos los casos, a estos bosques le siguen en ocurrencia de incendios los bosques de la Amazonia, con valores que, en casos como el del año 2007, ascienden a un poco más de 8,000ha. El reporte de área anual quemada asociada a los bosques de las regiones Andina y Caribe apenas si supera las 1,000ha.

CONCLUSIONES

Productos de información derivada de sensores remotos como los empleados en este estudio permiten hacer un monitoreo estandarizado, efectivo y constante de la incidencia de incendios forestales. Este monitoreo resulta de la mayor importancia ante los cambios que se están presentando en el ambiente, derivados del cambio climático, especialmente en un país como Colombia, con una riqueza natural excepcional, el cual está en una etapa inicial en lo que se refiere a monitoreo y seguimiento a escala nacional de fenómenos como la deforestación, la pérdida de biodiversidad y los incendios forestales.

El hecho de que lleguen a quemarse por año hasta 60,000ha de bosque en Colombia puede no parecer significativo con respecto al total nacio-

nal que supera ese valor en más de 10 veces, pero si se tienen en cuenta las dificultades asociadas a la regeneración de los bosques naturales, se hace urgente tomar acciones que prevengan que los bosques colombianos se vean afectados por los incendios forestales, cuyo origen suele estar asociado en la gran mayoría de los casos a la mano humana. Esto es particularmente importante en una región como la Amazonia, donde aún se conservan considerables extensiones de bosques naturales no perturbados, que están siendo intervenidos para establecer otras cubiertas del suelo como pastos y áreas agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA

ARMENTERAS, D., GONZÁLEZ-ALONSO, F., FRANCO, C., 2009. *Distribución espacial y temporal de incendios en Colombia utilizando datos de anomalías térmicas*. Caldasia 31(2), 291-306.

BOSCHETTI, L., ROY, D., HOFFMANN, A.A., 2009. *MODIS Collection 5 Burned Area Product - MCD45*. User's Guide Version 2.0.

CHANG, D., SONG, Y., 2009. *Comparison of L3JRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007*. Journal of Geophysical Research, 114, D16106.

CHUVIECO, E., OPAZO, S., SIONE, W., DEL VALLE, H., ANAYA, J., DI BELLA, C., CRUZ, I., MANZO, L., LÓPEZ, G., MARI, N., GONZÁLEZ-A., F., MORELLI, F., SETZER, A., CSISZAR, I., KANPANDEGI, J.A., BASTARRIKA, A., LIBONATI, R., 2008. *Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data*. Ecological Applications, 18(1), 64-79.

COCHRANE, M.A., SCHULZE, M.D., 1998. *Forest fires in the Brazilian Amazon*. Conservation Biology, 12, 948–950.

IDEAM, IGAC, IAVH, INVEMAR, I., SINCHI, E., IIAP, 2007. *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John von Neumann, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras Jose Benito Vives De Andreis e Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. Bogotá, D. C., 276 p. + 37 hojas cartográficas.

ROBERTS, S.J., 2000. *Tropical fire ecology*. Progress in Physical Geography, 24(2), 281-288.

ROMÁN-C., R.M., GRACIA, M., RETANA, J., 2003. *Environmental and human factors influencing fire trends in Enso and non-Enso years in tropical Mexico*. Ecological Applications, 13, 1177–1192.

ROY, D.P., JIN, Y., LEWIS, P.E., JUSTICE, C.O., 2005. *Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data*. Remote Sensing of Environment, 97, 137-162.

TANSEY, K., GRÉGOIRE, J.M.C., DEFOURNY, P., LEIGH, R., PEKEL, J.-F., VAN BOGAERT, E., BARTHOLOMÉ, E., BONTEMPS, S., 2008. *A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals*. Geophysical Research Letters, 35(1), L01 401.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Española de Cooperación Internacional por su apoyo a través de la Acción Complementaria C/7838/07 y el Proyecto A/019951/08. También al equipo de MODIS por la cesión de los datos MCD45.

Un algoritmo híbrido para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes radar ALOS PALSAR

F. González-Alonso[1], D. de Abelleyra[2], N. Mari[2], V. Salgado[1], C. M. di Bella[2], D. Armenteras[3] y S. Merino-de-Miguel[4]

[1] Laboratorio de Teledetección. CIFOR-INIA. Carretera de la Coruña Km. 7.5 28040 Madrid (España). Correo electrónico: alonso@inia.es

[2] Instituto de Clima y Agua. INTA Instituto Nacional de Tecnología Agraria. Castelar (Buenos Aires, Argentina)

[3] Universidad Nacional de Bogotá (Bogotá, Colombia)

[4] EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid (España)

RESUMEN

Empleamos imágenes de radar ALOS PALSAR pre y post incendio e información de focos activos generados a partir del sensor MODIS. La intensidad de retrodispersión de la señal de radar responde positivamente al nivel de biomasa de la vegetación, particularmente cuando se considera la polarización HV. Por ello se identificó el área quemada como aquella en que se produjo una disminución en la intensidad del canal HV. Utilizamos el algoritmo BASA (Burned Area Synergic Algorithm) (González-Alonso y Merino-de-Miguel, 2009) con el objetivo de optimizar el umbral de cambio de intensidad de radar más adecuado para discriminar el área quemada. La sinergia provista por BASA entre la información de fuegos activos y la respuesta en el cambio de la intensidad de retrodispersión permitió identificar un umbral óptimo de detección, que posteriormente fue validado con una clasificación de área quemada a partir de un método tradicional sobre imágenes Landsat TM. Identificamos los errores de comisión y omisión y sugerimos las ventajas de esta metodología en función de la disponibilidad de información y la practicidad de su aplicación.

Palabras clave: Área quemada, MODIS, anomalías térmicas, ALOS PALSAR, radar.

ABSTRACT

We used pre and post-fire ALOS PALSAR images together with MODIS active fire locations for burned area mapping. The backscattering intensity of the radar signal is sensitive to the amount of vegetation biomass, especially in the HV polarization. Therefore, we indentified burned area using the decrease of the backscattering signal in such polarization. We used the BASA algorithm (González-Alonso, F. y Merino-de-Miguel, S., 2009) in order to identify the threshold of the backscaterring signal that optimize the burned area mapping. This was possible thanks to the synergy between the MODIS active fire locations and the behavior of the radar backscattering signal. The result was validated using a Landsat5-TM image by means of a confusion matrix. Finally, we emphasized the advantages of this methodology.

Keywords: *Burned area, MODIS, thermal anomalies, ALOS PALSAR, radar.*

INTRODUCCIÓN

La cartografía de áreas quemadas es una variable climática esencial para el estudio del calentamiento global y el cambio climático. Van der Werf *et al.* (2010) han estimado que las quemas de biomasa en el mundo han emitido como media anual durante el período 1997-2009 una cantidad de 2,013 GTn de C, lo cual puede representar aproximadamente un 20% de las emisiones globales de CO_2. Los bosques tropicales son las zonas del mundo donde se produce una mayor acumulación de biomasa, pero suelen tener una cobertura nubosa importante. En consecuencia, la cartografía de las zonas quemadas a partir de imágenes de satélites en el dominio visible – infrarrojo en dichas áreas puede ser bastante problemática y por esta razón se justifica el empleo de imágenes de radar para la cartografía de áreas quemadas sin ningún tipo de restricción debido a la cubierta nubosa.

El coeficiente de retrodispersión que se puede derivar de las imágenes de radar está muy relacionado con la estructura de la vegetación y el contenido de biomasa (Le Toan *et al*., 1992). Cuanto mayor es el poder destructivo del incendio mayor es la cantidad de biomasa consumida en el mismo y en esta razón se justifica el empleo de las imágenes de radar para estudiar el área quemada (Tanase *et al*., 2010). En este trabajo se presenta una metodología para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes de radar (banda L) del sensor ALOS PALSAR combinadas de forma sinérgica con la información de focos activos procedente del sensor MODIS (Giglio *et al.*, 2003).

MATERIAL Y MÉTODOS

Consideramos como caso de estudio un evento de fuego de gran magnitud ocurrido en el delta del Río Paraná, en Argentina, durante el mes de abril 2008. Según las autoridades argentinas más de 200.000 ha se vieron afectadas.

En este trabajo se emplearon tres tipos de imágenes: (i) imágenes ALOS PALSAR pre y post incendio, (ii) focos activos MODIS y (iii) una imagen Landsat5-TM posterior al incendio de fecha 6 de Octubre 2008. Las imágenes ALOS PALSAR fueron de tipo FBD (Fine Beam Dual) con polarizaciones HH y HV. La imagen previa al incendio fue de fecha 23/07/2007 (ver Figura 1a) y la posterior de fecha 25/07/2008 (ver Figura 1b).

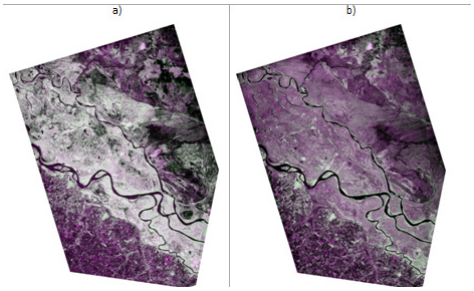


Figura 1: (a) Imagen pre-incendio (23/07/2007) y (b) post-incendio (05/07/2008). Ambas son imágenes ALOS PALSAR FBD del área de estudio. Composición RGB: HH, HV, HH.

Dichas imágenes se han obtenido en formato de nivel 1.0 y se han procesado con el software ROI_PAC (Rosen *et al*., 2004) para obtener imágenes del tipo SLC (Single Look Complex). La intensidad de la retrodispersión se ha calculado en decibelios (dB). Las imágenes fueron multilooked con un factor de cinco y se georeferenciaron en base a una imagen Landsat ETM ortorectificada procedente del GLFC (Global Land Cover Facility) de la Universidad de Maryland. El tamaño final del pixel ha sido de 18,8 m.

Las imágenes ALOS PALSAR de polarización cruzada HV son las más sensibles a la reducción de biomasa que produce el incendio (Tanase *et al*., 2010) y en consecuencia pueden ser un buen indicador del área quemada. En estas imágenes se han observado reducciones entre 2 y 8 dB entre la imagen anterior y posterior al incendio.

Para fijar el nivel óptimo de reducción en el nivel de dB que delimita mejor el área quemada se ha empleado el algoritmo sinérgico BASA (González-Alonso y Merino-de-Miguel, 2009). Dicho algoritmo busca el nivel en el indicador de área quemada (en este caso la reducción de dB) que proporciona la máxima concordancia (máximo valor del coeficiente Kappa) con el área de influencia de los focos activos de la colección 5 de MODIS. Se ha considerado como área de influencia de los focos activos un cuadrado de 1km de lado centrado en cada foco activo.

RESULTADOS

En la Figura 2 se puede observar que el máximo valor de Kappa entre la reducción de dB y el área de influencia de los focos activos se obtiene para una reducción de 4 dB.

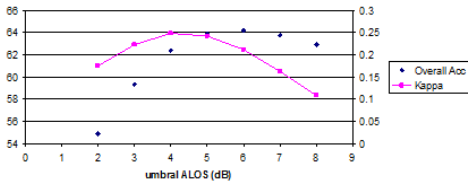


Figura 2: Precisión global y coeficiente kappa en función del umbral seleccionado.

En la Figura 3 se representa el área quemada obtenida en la imagen ALOS PALSAR con este procedimiento en color rojo. Para validar estos resultados se ha empleado la imagen Landsat5-TM mencionada anteriormente que se representa en la Figura 4.



Figura 3: Cartografía de área quemada a partir de ALOS PALSAR.

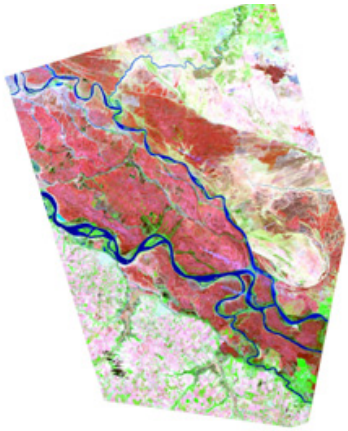


Figura 4: Imagen Landsat5-TM (06/10/2008) utilizada en validación. Composición RGB: 743.

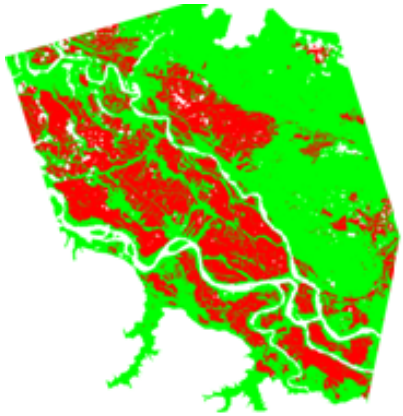


Figura 5: Cartografía de área quemada a partir de imagen Landsat5-TM (06/10/2008)

El área quemada en la imagen Landsat se ha obtenido mediante un procedimiento de clasificación supervisada y sus resultados se presentan en la Figura 5.

En la Tabla 1 se representan los resultados de la validación, de la cual se deduce un porcentaje de clasificación correcta del 68%, un error de omisión del 10,46% y un error de comisión del 21,59%. El área quemada en la imagen Landsat representa un 38,73% del área de estudio y en la imagen ALOS PALSAR un 49,86%.

Acierto no quemado	Error omisión	Error de comisión	Acierto quemado
% area			
39,67	10,46	21,59	28,27
Precisión global (%)			
67,94			
Coeficiente Kappa			
0,3584			
Área quemada Landsat (%)			
38,73			
Área quemada ALOS (%)			
49,86			

Tabla 1: Resultados del proceso de validación.

CONCLUSIONES

Las imágenes de radar en banda L ALOS PALSAR, han demostrado que tienen un gran interés para la cartografía de áreas quemadas y los errores de omisión y comisión que se obtienen son comparables a los que se obtienen con otros sensores en el dominio visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta.

La gran ventaja que tienen las imágenes de radar es que la obtención de la información está garantizada en situaciones de alta cubierta nubosa tal y como es el caso de los bosques tropicales, con lo cual la monitorización y la evaluación de la deforestación en los mismos es posible en cualquier situación.

La metodología presentada en este trabajo se piensa aplicar en bosques tropicales en los cuales es razonable pensar que los resultados a obtener sean mejores que en el caso estudiado, debido a que en dichos bosques la biomasa acumulada es mucho mayor y en consecuencia el incendio producirá reducciones de biomasa mucho mayores, con lo cual serán más fácilmente detectables con las imágenes ALOS PALSAR de polarización HV.

También es razonable pensar que en dicho tipo de bioma la humedad presente en el suelo

tendrá menos influencia en la señal radar y en consecuencia la identificación de las áreas quemadas será más clara.

La metodología que se presenta puede tener un gran impacto en la implementación de los mecanismos REDD+ en aquellos países que poseen grandes superficies de bosques tropicales y presentan graves problemas de incendios forestales o quemas de biomasa (Brasil, Indonesia, Angola, República Democrática del Congo, Bolivia, etc.).

BIBLIOGRAFÍA

GIGLIO L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C.O., KAUFMAN, Y.J., 2003: *An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS*. Remote Sensing of Environment, 87, 273-282.

GONZÁLEZ-ALONSO. F., MERINO-DE-MIGUEL, S., 2009. *Integration of AWiFS and MODIS active fire data for burn mapping at regional level using the burned Area Synergic Algorithm (BASA)*. International Journal of Wildland Fire, 18, 404-414.

LE TOAN, T., BEAUDOIN, A., GUYON, D., 1992. *Relating forest biomass to SAR data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30, 403-411.

ROSEN, P.A., HENSLEY, G., PELTZER, G., SIMONS, M. 2004. *Updated repeat Orbit Interferometry Package released*, EOS, 85(5), 47.

TANASE, M., SANTORO, M., DE LA RIVA, J.R., PÉREZ-CABELLO, F., LE TOAN, T., 2010. *Sensitivity of X, C and L-band SAR backscatter to FIRE severity in mediterranean pine forest*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(10), 3663-3675. (doi:10.1109/TGRS.2010.2049653).

VAN DER WERF, G., RANDERSON, J.T., GIGLIO, L., COLLATZ, G.J., MU, M., KASIBHATLA, P.S., MORTON, D.C., DEFRIES, R.S., JIN, Y., VAN LEEUWEN, T.T., 2010. *Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural and pear fires (1997-2009)*. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 11707-11735.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la red SERENA-CYTED, al grupo de trabajo RedLatif de GOFC-GOLD, al equipo MODIS–Forest Fire y a las agencias espaciales ESA, JAXA y CONAE, la ayuda y las facilidades proporcionadas para la realización de este trabajo.

Utilización de índices de vegetación derivados de datos MODIS en el modelado del peligro de incendio forestal

A. González-Calvo, P. A. Hernández-Leal, M. Arbelo, A. Alonso-Benito y A. Barreto

Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Departamento de Física F. E. Universidad de La Laguna. Av. Astrofísico Francisco Sánchez, s/n. 38206 San Cristóbal de La Laguna. Tel: 922318225, Fax: 922318228. Correo electrónico: agcalvo@ull.es

RESUMEN

La probabilidad de ignición en una zona boscosa depende de numerosos factores como la meteorología, naturaleza y humedad del combustible, factores antropogénicos y una serie de factores estructurales o estáticos que permiten asociar a cada localización geográfica un valor de numérico representativo del peligro de incendio. En este trabajo se comparó el uso de varios índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI y GEMI), obtenidos a partir de datos del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua, como indicadores de estrés hídrico. Dichos índices se usaron como moduladores de la función probabilística de peligro estático de incendio definida previamente para las islas de Tenerife y la Palma (Islas Canarias-España). Se usaron composiciones multitemporales de dichos índices, para la evaluación del peligro en las fechas previas a dos grandes incendios acaecidos en las islas de Tenerife (2007) y la Palma (2009), con el objetivo de determinar cuál de ellos puede aportar una información más valiosa en la estimación del riesgo dinámico de incendio forestal. La evolución en las zonas afectadas de los valores promedio de los índices obtenidos en los 7 meses previos a los dos eventos, demuestra la mejor representatividad de los valores del índice dinámico obtenido a partir de los datos del índice EVI. No obstante, dependiendo de las zonas analizadas, otros índices de los propuestos también podrían representar alternativas válidas para la estimación del peligro de ignición.

Palabras clave: Peligro de incendio, estrés hídrico, índices vegetación, MODIS, SIG.

ABSTRACT

The probability of ignition in a wooded area depends on many factors such as weather, fuel moisture and composition, anthropogenic factors and a series of static structural factors that allow the association of a numeric representative value of fire hazard to each geographic location. This paper compared the use of several vegetation indices (NDVI, EVI, SAVI and GEMI), obtained from data from the MODIS sensor aboard the Terra and Aqua satellites, as indicators of water stress. These indices were used as modulators of the static probabilistic function of fire danger previously defined for Tenerife and La Palma islands (Canary Islands-Spain). Multitemporal composites of these indices were used for the assessment of risk during the months previous to two important fires in the islands of Tenerife (2007) and La Palma (2009), in order to determine which of them can provide more valuable information in estimating the dynamic risk of wildfire. The evolution of the average values of dynamic risk in the affected areas, during the 7 months prior to the two events, shows that EVI derived index yields better representation of fire danger in the study areas. However, depending on the type of forest cover in the other test sites, other indices may also represent valid alternatives to estimate the risk of ignition.

Keywords: *fire danger, water stress, vegetation indexes, MODIS, GIS.*

INTRODUCCIÓN

La existencia de una gran variedad de índices de peligro de incendio forestal o de probabilidad de ignición adaptados a las particularidades climáticas y forestales de cada país o región, hace que en muchos casos los modelos aplicados a dichos países o regiones, con unas características muy concretas tanto climáticas como de tipificación de los combustibles, sean poco útiles para la representación del riesgo de incendio forestal a escala local, como es el caso de las Islas Canarias, con unas particulares características tanto por su orografía compleja como por la diversidad de microclimas, o de especies forestales, en muchos casos endémicas, En la definición de

esos índices de peligro de incendio forestal, aparecen como determinantes la combinación de factores medioambientales, condiciones meteorológicas y causas antropogénicas (Chuvieco et al., 2010, Diagne et al., 2010, Leblon, 2005). En el presente trabajo, partiendo de un índice de riesgo adaptado para las islas, que considera variables de riesgo cuasiestáticas (Hernández-Leal et al, 2008), se analiza la idoneidad de diferentes estimadores del estrés hídrico o Fuel Moisture content (FMC) (Chuvieco et al., 2003; Verbesselt et al., 2007; Bisquert et al., 2010), obtenidos a partir de índices de vegetación derivados de datos del sensor MODIS (Maeda et al., 2009, Yebra et al., 2008),

DATOS Y METODOLOGÍA

Para analizar la dinámica del estrés hídrico de la vegetación, y obtener medidas indirectas del FMC, se usaron datos de diferentes índices de vegetación derivados de los sensores MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua, en concreto del producto MOD13Q1, que dispone de una resolución temporal de 16 días y espacial de 250 m. La contaminación de ciertos píxeles debida a la presencia de nubes se corrigió con la información contenida en la banda de calidad mediante el correspondiente filtrado. Los índices utilizados en el presente trabajo fueron el NDVI, EVI, GEMI y SAVI, obtenidos a partir de diversas combinaciones de los canales de dicho sensor.

El estrés hídrico obtenido indirectamente a través de cada uno de los índices permitió modular el factor de riesgo estático previamente obtenido (Hernández-Leal et al., 2008), dando lugar a una probabilidad de riesgo dinámico mucho más representativa del nivel de peligro real. El objetivo final no era otro que verificar la consistencia de este índice y su grado de representatividad, analizando su evolución en las fechas previas a los distintos incendios forestales acaecidos en Tenerife (2007) y La Palma (2009). Tal y como están definidos, la variación de los índices de vegetación considerados oscila para zonas de tierra entre 0 y 1, de tal forma que una zona geográfica con cobertura forestal que ofrezca valores próximos a 0, tiene un alto estrés hídrico. Así, el valor complementario de los índices de vegetación nos indicará la mayor propensión de una zona geográfica a incendiarse.

Por tanto, el criterio adoptado para definir un índice de riesgo de incendio forestal que tenga en cuenta parámetros dinámicos fue:

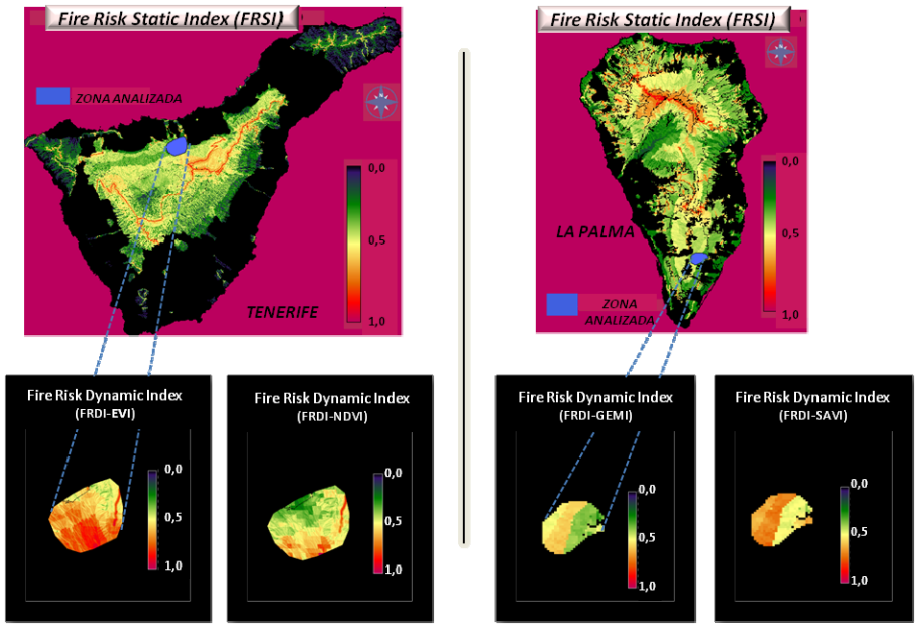


Figura 1: Mapas de riesgo estático para las islas de Tenerife y La Palma, además de algunos ejemplos de extracción de valores de riesgo dinámico para los índices EVI, GEMI, NDVI y SAVI.

$$FRDI = (1 - WSI) \times FRSI \qquad (1)$$

siendo el WSI cada uno de los índices de vegetación considerados en este estudio y FRSI el índice de riesgo estático definido en trabajos previos (Hernández-Leal et al., 2008). Conociendo dónde comenzaron los dos incendios analizados, se procedió a calcular el valor promedio del FRDI en un entorno de varias hectáreas alrededor del origen, para determinar si dicho índice puede utilizarse como indicador de alerta en el ámbito de los incendios forestales.

RESULTADOS

En la representación de los mapas de riesgo estático o FRSI para las islas de Tenerife y La Palma (Figura 1), se han considerado las estadísticas de incendios (punto de inicio), del periodo 2000-2008 en esas islas, así como los factores de riesgo cuasi-estático antes mencionados, es decir: insolación, altitud, mapa de vegetación, pendiente, orientación y proximidad a carreteras (factor humano). En gran parte de estos mapas de riesgo estático puede observarse cómo quedan perfectamente delineadas la mayoría de las carreteras de ambas islas, demostrando el enorme peso del factor antropogénico en el valor absoluto del índice de peligrosidad estático.

En la misma figura se representan también las zonas en torno a los puntos de inicio de los dos grandes incendios (Tenerife 2007 y la Palma 2009) consideradas para la extracción de los valores promedio de riesgo dinámico, aportando algunos ejemplos de los valores extraídos para los índices EVI, NDVI, GEMI y SAVI a partir de datos Terra-MODIS. La figura 2 muestra la evolución de los valores promedio de los mencionados índices de de riesgo dinámico en las regiones antes remarcadas.

Los valores promedio de riesgo en el entorno de los focos de inicio suponen una medida de la representatividad de los diferentes índices utilizados para caracterizar el incremento del peligro en las fechas previas a los incendios ocurridos en estas islas. Del análisis de las curvas de tendencia para cada uno de los 4 índices obtenidos se puede observar que si bien para la isla de Tenerife es el $FRDI_{EVI}$ el que presenta una evolución creciente en las fechas previas al incendio de 2007, en el caso de la Palma, tanto el $FRDI_{EVI}$ como el $FRDI_{GEMI}$ pueden representar por igual la situación de aumento de peligro. Las diferencias en la idoneidad de uno u otros indicadores de estrés hídrico para la modulación del riesgo estática está en las diferencias en el tipo de cobertura vegetal existentes en las zonas bajo análisis, dado que cada índice de vegetación reproduce mejor el estado de la vegetación en función de sus características y de las proporciones de matorral, suelo desnudo y cubierta forestal presente. No obstante, en el caso de las Islas Canarias, tanto esta experiencia test como otras previas realizadas en otras zonas, permiten constatar la mejor adecuación de los datos EVI-MODIS para la caracterización del FMC y la posterior modulación de los factores de riesgo estáticos.

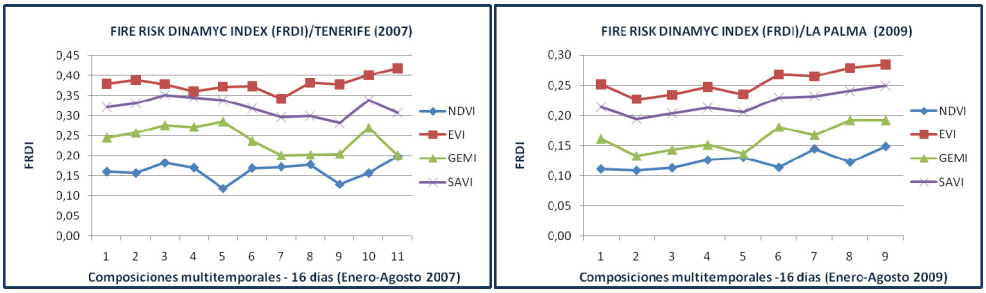


Figura 2: Evolución de los índices de riesgo dinámico de incendio $FRDI_{EVI}$, $FRDI_{GEMI}$, $FRDI_{NDVI}$ y $FRDI_{SAVI}$ para las meses previos a los incendios de las islas de Tenerife (2007) y la Palma (2009) en las islas Canarias (España).

CONCLUSIÓN

Se han usado composiciones multitemporales de los índices de vegetación NDVI, SAVI, GEMI y EVI obtenidos a partir de datos de los sensores MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua, para los dos grandes incendios acaecidos en las islas de Tenerife (2007) y la Palma (2009) en las Islas Canarias (España). Dichos índices han sido utilizados en conjunción con un modelo probabilístico de riesgo estático definido para dichas islas, para discriminar cuál de ellos puede aportar una información más valiosa en la estimación del peligro dinámico de incendio forestal. La evolución de los valores promedio de los índices obtenidos en los 7 meses previos a los dos eventos, demuestra la mejor representatividad de los valores del índice dinámico obtenido a partir de datos EVI ($FRDI_{EVI}$) si bien, dependiendo de las zonas analizadas otros índices de los propuestos, también podrían representar alternativas válidas para la estimación del peligro o probabilidad de ignición.

Es evidente que los factores meteorológicos forman parte importantísima del inicio y rápida propagación de la mayor parte de los incendios forestales. En esa línea se pretende introducir capas de información adicionales al modelo de riesgo, basadas en modelos numéricos mesoescalares, capaces de aportar variables meteorológicas como la humedad relativa o la velocidad y dirección del viento, con resoluciones espaciales que permitan una mejor representación de las situaciones de peligro. Esto, unido a una más amplia validación de los indicadores de estrés hídricos, son algunas de las propuestas de mejora, ya en curso, que a buen seguro serán valoradas muy positivamente por todos los gestores forestales

BIBLIOGRAFÍA

BISQUERT M. SÁNCHEZ J.M., CASELLES, V., PAZ ANDRADE, M. I., LEGIDO, J. L., 2010. *Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor Terra-MODIS*. Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740. 33: 80-91.

CHUVIECO, E, AGUADO, I, YEBRA, M, et al., 2010. *Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies*. Ecological Modelling Vol. 221(1): 46-58.

CHUVIECO E., AGUADO I., COCERO D. et al., 2003. *Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies*, *International Journal of Remote Sensing*, 24, pp. 1621-1637.

DIAGNE, M., DRAME, M., FERRAO, C., et al. 2010. *Multisource Data integration for Fire Risk Managament. The local test of a global approach*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters vol. 7(1) pp: 93-97.

HERNANDEZ-LEAL P. A., GONZALEZ-CALVO A., ARBELO M., BARRETO A., ALONSO-BENITO, A., 2008. *Sinergy of GIS and Remote Sensing data in forest fire danger modeling.* IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth observations and Remote Sensing (JSTARS) Vol 1 (4):240-247.

LEBLON, B., 2005. *Monitoring forest fire danger with remote sensing*. Natural Hazards. Vol. 35(3): 343-359.

MAEDA, E., FORMAGGIO, A. R., SHIMABUKURO, Y. E., et al., 2009. *Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Vol. 11 (4) pp: 265-272.

VERBESSELT, J., SOMERS, B., LHERMITTE, S., et al., 2007. *Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems.* Remote Sensing of Environment. Vol: 108 (4): 357-368.

YEBRA, M., CHUVIECO, E., RIAÑO, D. 2008. *Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment*. Agricultural and Forest Meteorology. 148: 523-536.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto SATELMAC del PCT-MAC 2007-2013 co-financiado con fondos FEDER de la Unión Europea y el proyecto CGL2010-22189-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Idoneidad de diferentes fuentes de información para la caracterización de incendios forestales

M. R. González Moradas[1], C. Recondo[1, 2] y J. J. Peón[1]

[1] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias). Correo electrónico: mrgmoradas@uniovi.es

[2] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias).

RESUMEN

Para la caracterización de los incendios en Asturias es necesario utilizar varias fuentes de información, a saber, los partes de incendios de 112 Asturias y la cartografía de zonas quemadas obtenida a partir de imágenes Landsat-TM. Este trabajo ha tenido por objeto comparar ambas fuentes de información y proponer la idoneidad en función de las características de los incendios. Así mismo se analiza la distribución de los incendios forestales ocurridos en Asturias (norte de España) durante los últimos años y se propone una zonificación del territorio en función de la concentración de incendios.

Palabras clave: teledetección, incendios forestales, SIG.

ABSTRACT

To characterize the fires in Asturias is necessary to use several sources of information such as reports of fires of 112 Asturias and the cartography of burnt zones obtained from Landsat-TM images. In this report both sources of information have been compared to propose the suitability depending on the characteristics of the fires. Also it has been analyzed the characteristics and distribution of the forest fires happened in Asturias (north of Spain) during the last years to propose a territory zoning depending of fire concentration.

Keywords: *remote sensing, forest fire, GIS.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas medioambientales de Asturias (Norte de España) es el relacionado con los incendios forestales que ponen en peligro la biodiversidad de la región. Un mejor conocimiento de su ocurrencia y distribución permitirá mejorar la prevención y extinción de incendios, centrando los recursos destinados a estas tareas y reforzando la vigilancia precisamente en aquellas zonas en las que los incendios causan la mayor devastación.

Esta problemática ha de ser abordada integrando las distintas fuentes de información en un sistema informático que constituye una herramienta para análisis estadísticos y espaciales. Gracias a esto, se puede realizar una zonificación del territorio con el fin de determinar aquellas zonas de mayor concentración de incendios, información especialmente importante para una correcta distribución de recursos de vigilancia y extinción de incendios. Pero manejar fuentes de información diversas requiere un análisis previo con el que definir ventajas e inconvenientes de cada una de ellas y la idoneidad de las mismas en función del tipo de estudio que se quiera realizar.

Por esta razón, los datos de partida empleados son la base de datos de partes de incendios proporcionada por 112 Asturias y la cartografía de zonas quemadas en Asturias entre el 2 de agosto de 2008 y el 2 de junio de 2009, obtenida mediante técnicas de teledetección empleando imágenes Landsat-TM. Además, se dispuso de modelos derivados de un Modelo Digital de Elevaciones de Asturias de 30 m de resolución espacial y del mapa de vegetación de la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (CTAPA).

INFORMACIÓN DE PARTIDA

La naturaleza de los datos de partida empleados requiere la utilización de herramientas que permitan el manejo simultáneo de datos espacialmente distribuidos de diverso origen, tipo y estructura, por ello se hace necesario recurrir a software SIG, habiéndose utilizado en este trabajo ArcGIS 9.3

La base de datos empleada forma parte de un software de gestión de incendios forestales diseñado por el Área de Defensa contra Incendios Forestales de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (DGCN) del Ministerio de Medio Ambiente, antiguo ICONA. Esta base de datos se suministra en formato de Microsoft Access y proporciona información relativa a los incendios ocurridos en Asturias desde 1965 hasta diciembre de 2009; incluye un ingente volumen de datos almacenados en 131 tablas, de los cuales únicamente son relevantes para este estudio 28 características. Para extraer la información requerida se seleccionaron aquellos campos con mayor interés desde el punto de vista estadístico y se agruparon en una tabla resumen mediante una consulta SQL.

Los incendios forestales se representan como puntos cuya localización queda determinada por tres campos, a saber, XUTM, YUTM y el huso. Las coordenadas de los incendios se encuentran en ED-50, siendo necesario efectuar un cambio de sistema de referencia para poder integrar la información de los partes de incendios con el resto de datos que se encuentran en ETRS-89 (González-Matesanz y Dalda-Mourón, 2007).

Seguidamente se procedió a una depuración de datos utilizando consultas y herramientas de análisis. Se trata de errores groseros que suponen el 1,2% de los datos, por lo que se decide prescindir de ellos quedando la base de datos constituida por un total de 4377 puntos, número suficientemente elevado como para que los análisis estadísticos sean representativos.

Algunos análisis estadísticos requieren que los incendios se representen como polígonos, por lo que éstos han sido generados como áreas de influencia con un radio calculado a partir de la superficie de incendios. Esta forma de representación de los incendios será válida para realizar determinados análisis en ausencia de cartografía de zonas quemadas de mayor precisión. No obstante, para la realización de este estudio también se dispuso de cartografía más precisa, ya que se cuenta con las áreas quemadas obtenidas a partir de imágenes Landsat-TM de 30 m de resolución espacial en las bandas ópticas. Para la elaboración de esta cartografía se emplea el método de diferencia simple de imágenes, una anterior y otra posterior al período de incendios, realizando posteriormente una clasificación supervisada para separar las zonas claramente visualizadas como quemadas del resto (Recondo et al., 2001). El método se empleó con éxito en la elaboración de la cartografía histórica de incendios en Asturias a lo largo de 30 años (Recondo et al., 2002; 2007). Los contornos de los incendios obtenidos de las imágenes Landsat-TM son más fidedignos, como se puede comprobar en la Figura 1, por lo que la caracterización de incendios será más precisa. Sin embargo son difíciles de cartografiar con fiabilidad cuando el incendio ocupa extensiones de menos de 15 ha (Recondo et al., 2007), por lo que se hace imprescindible emplear la información procedente de los partes.

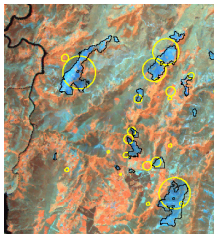


Figura 1: Cartografía de zonas quemadas obtenida a partir de Landsat (polígonos en negro) y partes de incendios con área de influencia (en amarillo), sobre la imagen Landsat-TM del 2 de junio 2009 en composición de color RGB=457.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los incendios forestales en Asturias durante el periodo comprendido entre el año 2007 y 2009 son predominantemente de invierno, resultando críticos los meses de febrero y marzo. Su superficie es reducida en relación a los incendios que se producen en el resto de la península. Por otro lado, los brezales son la unidad ambiental más afectada.

El análisis de los partes reveló una tendencia creciente del número de incendios en los últimos años. Además este aumento se produce independientemente de la superficie del incendio, aunque es más acentuado en aquellos de mayor superficie, sobre todo en los comprendidos entre 50 y 250 ha. También se aprecia un crecimiento especialmente importante en el intervalo comprendido entre 100 y 250 ha.

Los incendios analizados se concentran en los meses de invierno. Curiosamente en los meses de mayor sequía el número de incendios es muy bajo. Esto ha llevado a pensar en la intencionalidad de los mismos (Recondo et al., 2002). También se realizó el mismo análisis estadístico seleccionando únicamente los incendios mayores de 25 ha, observando los mismos resultados, lo que nos puede indicar un origen intencionado y que no fue controlado.

Con el objeto de comparar los resultados obtenidos a partir de las diferentes fuentes de información manejadas, las estadísticas anteriores se han repetido empleando la cartografía de zonas quemadas Landsat en aquellos casos en los que fue posible, como en el análisis del número de incendios por superficie. La comparación entre el número de zonas quemadas Landsat y el de partes de incendios para las distintas superficies muestra una coincidencia elevada, observándose la mayor discrepancia en el intervalo 5-10 ha, lo que resulta esperable teniendo en cuenta que el umbral de detección efectivo de la cartografía Landsat se sitúa en unas 15 ha. Los resultados obtenidos en este intervalo coinciden con los de estudios realizados anteriormente en Asturias empleando imágenes Landsat, en los que se observó un acuerdo del 52% en el intervalo de 5 a 10 ha (Recondo et al., 2007).

Se crearon mapas de pendiente, orientación e insolación a partir de un modelo digital de elevaciones de Asturias con el fin de analizar la relación entre estas variables y la superficie de los incendios forestales. Los resultados del análisis estadístico no mostraron ninguna diferencia significativa que permita relacionar las variables citadas en las zonas quemadas con el tamaño de los incendios. Los resultados han sido muy similares empleando los partes de incendios. Por tanto, se puede concluir que para una caracterización de incendios desde este punto de vista se puede utilizar indistintamente cartografía Landsat o partes de incendios. Por otra parte, se ha obtenido la orientación de las laderas más quemadas que suelen ser las de orientación este, sureste y sur.

Para determinar aquellas unidades ambientales más afectadas por los incendios se ha realizado un análisis estadístico empleando el mapa de vegetación de la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (CTAPA) elaborado por el INDUROT a escala 1:25.000. Las unidades más afectadas son fundamentalmente los brezales, seguidos de los piornales y los helechales.

Con el fin de determinar aquellas zonas de mayor concentración de incendios se realizan varios mapas de densidad. La delimitación de estas zonas resulta especialmente importante para una correcta distribución de recursos de vigilancia y extinción de incendios. Se realizó el mapa de densidad empleando la información proporcionada por la base de datos, seleccionando los incendios mayores de 1 ha (Figura 2). Así mismo, se elaboró el mapa de densidad para los incendios mayores de 25 ha, apreciándose dos zonas de densidad muy alta (en trama de color rojo en la Figura 2): región occidental, que abarca los concejos de Cangas de Narcea y Allande, y región centro-meridional en los concejos de Sobrescobio y Laviana.

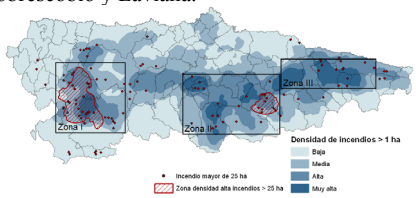


Figura 2: Densidad de incendios en el periodo 2007-2009.

Con el fin de comparar los resultados de concentración de incendios obtenidos por la otra fuente información, se crearon mapas de densidad de polígonos Landsat, para lo cual se emplearon los centroides de los polígonos quemados. Este mapa (Figura 3) presenta diferencias significativas, sobre todo en la región central y en el extremo oriental, respecto al de partes en incendios mayores de 1 ha.

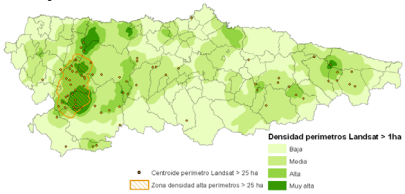


Figura 3: Densidad de perímetros quemados obtenidos a partir de Landsat en el período entre el 2 de agosto de 2008 y el 2 de junio de 2009.

A pesar de observarse diferencias notables en incendios mayores de 1 ha, existe una coincidencia elevada cuando se consideran exclusivamente los mayores de 25 ha (Figura 4), lo que permite corroborar que los estudios de incendios mayores de 25 ha deberían realizarse a partir de Landsat, aunque podría reducirse a los mayores de 15 ha.



Figura 4: Zonas de alta densidad de incendios mayores de 25 ha obtenidas a partir de Landsat y a partir de la base de datos de partes de incendios.

Por otra parte se analizó el número incendios por concejos, obteniendo unos resultados sustancialmente parecidos en los tres años analizados. La región occidental, formada por los concejos de Cangas de Narcea, Tineo y Allande, es la más problemática, tanto por número como por superficie quemada.

CONCLUSIONES

La integración de datos procedentes de diversas fuentes en un SIG facilita el análisis conjunto de toda la información en un único sistema. De esta forma se pudo comparar la información proporcionada por la base de datos de partes de incendios forestales de 112 Asturias con la cartografía de zonas quemadas obtenida a partir de imágenes Landsat-TM. Para el análisis estadístico de incendios por año y por mes resulta adecuada la información de la base de datos, ya que la cartografía de zonas quemadas Landsat no refleja la fecha en la que se produce el incendio; sin embargo esta cartografía es más adecuada para la realización de estadísticas por superficie, ya que muestra la posición y tamaño de los incendios con mayor precisión que los partes siempre que los incendios sean mayores a 10 o 15 ha, límite a partir del cual se observa una detección efectiva de la cartografía de zonas quemadas Landsat. Para el análisis de la superficie de los incendios situados por debajo de ese umbral es preferible emplear los datos de los partes de incendios, aunque teniendo presente que tanto la posición como la superficie es, en muchos casos, bastante aproximada. Las estadísticas por pendiente, orientación, insolación y vegetación se realizarán preferiblemente a partir de la cartografía Landsat en estudios de incendios mayores de 10 o 15 ha por las mismas razones dadas. El empleo de áreas de influencia circulares en los partes de incendios supone una alternativa menos precisa, pero válida para determinados estudios a escala regional.

Para analizar mediante mapas de densidad las zonas de mayor concentración de incendios forestales con una superficie superior a 25 ha, resulta indistinto emplear los partes de incendios o la cartografía de zonas quemadas Landsat, ya que se apreció una coincidencia elevada entre los mapas obtenidos a partir de ambas fuentes. Los mapas de densidad y de superficie quemada por concejos delimitan de forma efectiva aquellas zonas con mayor problemática en lo que respecta a incendios forestales. En la zona occidental de Asturias se observó el mayor número de incendios y la mayor superficie quemada, apreciándose también una región oriental en la que se registró un elevado número de incendios, aunque de menor tamaño que los que se producen en la zona occidental.

BIBLIOGRAFÍA

GONZÁLEZ-MATESANZ, J. y DALDA-MOURÓN, A., 2007. *Modelos de transformación entre ED50 y ETRS89*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

RECONDO, C., GARCÍA, L., ADRADOS, L. y GARCÍA-MANTECA, P., 2001. *Mejores métodos de detección de zonas quemadas en Asturias a partir del análisis multitemporal de imágenes Landsat-TM*. Mapping, 71, 6-16.

RECONDO, C., WOZNIAK, E. y PÉREZ-MORANDEIRA, C.S., 2002. *Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el periodo 1991-2001 a partir de imágenes Landsat-TM*. Revista de Teledetección (Revista de la Asociación Española de Teledetección, AET), 18, 47-55.

RECONDO, C., WOZNIAK, E. y PÉREZ-MORANDEIRA, C.S., 2007. *Impacto de los incendios forestales en Asturias. Análisis de los últimos 30 años*. Principado de Asturias, INDUROT (Universidad de Oviedo) y KRK Ediciones. ISBN: 978-84-8367-043-9.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el proyecto "Metodología para la elaboración de un sistema de alarmas de incendios en tiempo real a partir de datos del sensor MODIS válida para Asturias" (FC-09-IB09-149), financiado en 2010 por el Gobierno del Principado de Asturias (FICYT).

Cartografía de áreas quemadas en Castilla y León mediante clasificación de índices espectrales de imágenes MODIS: perspectiva unitemporal

C. Hernán[1], C. Quintano[1] y A. Fernández-Manso[2]

[1] Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. C/ Francisco Mendizábal, 1. 47014 Valladolid (España). Correo electrónico: menchu@tele.uva.es

[2] Universidad de León. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias – Campus de Ponferrada. Av. Astorga s/n 24400 – Ponferrada (León, España).

RESUMEN

A partir de una imagen MODIS posterior a la fecha del incendio (perspectiva unitemporal) se estimó el área afectada por el mismo, mediante la clasificación de diferentes índices de vegetación, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cociente simple entre las banda roja e infrarroja (SR) y el índice global de seguimiento medioambiental (GEMI). Además de los índices de vegetación, se utilizaron algunos índices específicamente diseñados para la identificación de zonas quemadas tales como el índice de área quemada (BAI) y el cociente normalizado de área quemada (NBR). La fiabilidad de las estimaciones obtenidas al clasificar los diferentes índices fue computada mediante el estadístico κ. Dicho estadístico se calculó a partir de la matriz de confusión generada al comparar cada estimación con la imagen verdad-terreno obtenida mediante la rasterización del perímetro oficial del área quemada. El área de trabajo elegida fue Castilla y León, donde se estudiaron los incendios mayores de 100 ha ocurridos en las campañas de los años 2007 y 2008. Los resultados preliminares indican que la metodología propuesta permite obtener valores del estadístico κ del orden de 0.7, cuando se emplean como entrada al clasificador los índices BAI y NBR.

Palabras clave: teledetección, incendios forestales, índices spetrales, MODIS.

ABSTRACT

Following an unitemporal perspective, we estimated the area burned by forest fires by classifying different vegetation indices obtained from MODIS data: normalized difference vegetation index (NDVI), simple ratio index (SR), and global environment monitoring index (GEMI). In addition, we used several indexes specifically designed to identify burned areas: burned area index (BAI) and normalized burnt ratio (NBR). Accuracy of the burned area estimations was measured by statistic κ. κ was calculated from the confusion matrix obtained by comparing each burned area estimation to the ground-truth image (rasterization of official burned area perimeters). The study area was Castilla y León region (Spain); specifically we considered areas larger than 100 has affected by forest fires happened during 2007 and 2008. Preliminary results show that the proposed method leads to κ higher than 0.7, when NBR or BAI are used as inputs.

Keywords: *remote sensing, forest fires, spectral indices, MODIS.*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son uno de los principales problemas ambientales en España, tanto por su frecuencia como por su intensidad. En este ámbito, las imágenes de satélite ofrecen la posibilidad de realizar una estimación de daños de forma rápida y económica. Entre las imágenes más ampliamente utilizadas a escala regional pueden mencionarse las procedentes del sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiomater (MODIS) a bordo de los satélites TERRA y ACQUA lanzados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos de América (USA) (Roy et al., 2008; Giglio et al., 2009; Quintano et al. 2010). Estas son las imágenes que empleamos en este trabajo.

Respecto a la metodología, hemos planteado una metodología unitemporal en la que a partir de una imagen posterior a la fecha del incendio se estimará el área afectada por el mismo. Habitualmente, en el planteamiento unitemporal los métodos para cartografiar las zonas quemadas se

basan en las diferentes respuestas espectrales de los objetos de esa imagen, siendo las técnicas comúnmente empleadas las clasificaciones (p.e. Mitri y Gitas, 2006; Kontoes et al., 2009).

Respecto al tipo de imagen empleada, las bandas rojo, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) son las que más información aportan para la identificación de áreas afectadas por incendios. Sin embargo, el empleo de las bandas originales se ha venido sustituyendo por bandas sintéticas, como son diferentes índices de vegetación o incluso índices espectrales específicamente desarrollados para la identificación de áreas quemadas (Chuvieco et al., 2002; Epting et al., 2005). No hay un tipo de imagen óptimo, depende de la zona de estudio considerada: boreal, mediterránea, tropical, etc. En este trabajo se han utilizado los siguientes índices espectrales: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), cociente simple entre las bandas rojo y NIR (SR), índice global de seguimiento medioambiental (GEMI), índice de área quemada (BAI), y cociente normalizado de área quemada (NBR).

De esta forma, el objetivo principal del trabajo puede resumirse en desarrollar una metodología unitemporal válida para obtener una estimación fiable de áreas quemadas a partir de imágenes de satélite MODIS. La fiabilidad de las estimaciones obtenidas al clasificar los diferentes índices se medirá mediante el estadístico κ. Como objetivos secundarios se pueden mencionar la identificación de:

- El índice espectral que permite obtener la estimación de área quemada con mayor fiabilidad.
- El algoritmo clasificador que permite obtener la estimación de área quemada más fiable.

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

La zona de estudio elegida es Castilla y León. El European Forest Fire Information System (EFFIS) indicó que durante el año 2008 se produjeron en Castilla y León 1996 incendios, 1010 menores de 100 ha. La tabla 1 muestra los incendios considerados en este estudio. Respecto a los datos empleados, dos fueron los tipos de datos que utilizamos. Por una parte, la Junta de Castilla y León nos proporcionó los contornos de los incendios considerados en el trabajo. Dichos perímetros fueron medidos mediante un Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, GPS). En este trabajo los hemos utilizado como imágenes verdad-terreno para medir la fiabilidad de las estimaciones de área quemada que serán obtenidas aplicando la metodología propuesta a las imágenes MODIS de entrada.

UBICACIÓN	FECHA	TÉRMINO MUNICIPAL	Área (ha)
ZONA ESTUDIO 1 (Salamanca y Zamora)	31/07/2007	Aldeadávila de la Ribera	664.75
	31/07/2007	Mancera de Abajo	609.32
	31/07/2007	Villamor de la Madre	356.42
ZONA ESTUDIO 2 (Segovia)	28/08/2007	Tizneros	635.00
ZONA ESTUDIO 3 (Segovia y Burgos)	06/08/2008	Moral de Hornuez / Villaverde de Montejo, Honrubia de la Cuesta/Pradales	992.47
	31/07/2008	Isar / Sasamón	902.34
ZONA ESTUDIO 4 (León)	31/08/2008	Porqueros y Zacos	578.40
	17/08/2008	Castrillo de la Valduerna	367.45
ZONA ESTUDIO 5 (Zamora)	02/09/2008	San Martín de Tábara	223.71
	30/08/2008	Gallegos del Río	691.85
	24/08/2008	Vegalatrave	259.95

Tabla 1: Incendios considerados.

Por otra parte, hemos utilizado como entrada a la metodología propuesta para la estimación de las áreas afectadas por incendios dos tipos de productos MODIS: los productos 09 y 13, reflectividad diaria e índices de vegetación cada 16 días, respectivamente, ambos a 250 m de resolución espacial.

MÉTODO

La metodología propuesta tiene tres etapas principales: pre-procesado, estimación del área quemada y validación de los resultados. En la etapa de preprocesado hemos incluido las siguientes tareas: 1) descarga de las imágenes MODIS, el principal criterio para su selección fue la proximidad a la fecha del incendio y la ausencia de nubes; 2) obtención de las imágenes verdad-terreno a partir de los ficheros vetoriales con los perímetros GPS de las áreas quemadas; 3) cálculo de los índices de vegetación y espectrales, empleados como entrada a los diferentes algoritmos de clasificación (NIR, NDVI, SR, GEMI, BAI, NBR).

En la fase de estimación de área quemada, obtenemos las distintas estimaciones de área

quemada empleando diferentes combinaciones de imágenes de entrada y algoritmos clasificadores (supervisado y no supervisado con 5 y 10 clases). Cuando fue necesario, tras el proceso de clasificación, re-clasificamos la imagen para que sólo existieran dos clases: 'quemado' y 'no quemado'. Finalmente, aplicamos un filtro de moda 3x3 para obtener la estimación de área quemada definitiva.

Por último, en la fase de validación de resultados, se calcula la fiabilidad de las diferentes estimaciones de área quemada obtenidas en al etapa anterior mediante el estadístico κ. Obtuvimos dicho estadístico a partir de la matriz de confusión generada al comparar cada estimación con la imagen verdad-terreno. Localizando la estimación con mayor κ, identificamos la combinación óptima 'imagen de entrada'-'clasificador' que permite obtener la estimación de área quemada más fiable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 2 muestra un resumen de los resultados obtenidos (se reflejan únicamente las estimaciones de área quemada cuyo estadístico κ fue superior a 0.5). Analizando dicha tabla, y respecto al tipo de imagen de entrada, es posible observar que en dos de las zonas de estudio, la imagen SR produjo las estimaciones más fiables; en las tres zonas de estudio restantes, las imágenes NIR, BAI y NBR fueron las entradas que permitieron obtener las estimaciones más fiables. A la vista de los resultados no es posible obtener una conclusión clara, si bien la imagen BAI permitió obtener estimaciones con κ mayor que 0.5 un mayor número de veces que el resto de las imágenes de entrada consideradas. Por otra parte, los índices NDVI y GEMI no permitieron obtener en ninguna zona de estudio una estimación de área quemada aceptable.

Si tenemos en cuenta el clasificador más adecuado, y como era de esperar, los resultados han mostrado que el clasificador supervisado presenta un mejor comportamiento que el no supervisado, si bien, presenta la desventaja de necesitar ser entrenado. En cualquier caso, el empleo de clasificadores no supervisados obtuvo mejores resultados cuando se emplearon 10 clases en lugar de 5.

Finalmente, y respecto al tipo de producto MODIS, en cuatro de las cinco zonas de estudio, el producto '13: índices de vegetación, 16 días' permitió obtener las estimaciones más precisas.

Z.E.[1]	P. MODIS[2]	ENT.[3]	CLAS. (S/NS-n clases)[4]	κ
1	**MOD13Q1**	**SR**	**S**	**0.51**
2	**MYD13Q1**	SR	NS – 5	0.52
		SR	**NS – 10**	**0.55**
		SR	S	0.52
3	**MOD13Q1**	NIR	S	0.60
		NBR	S	0.69
		SR	**S**	**0.71**
	MOD09GQ	NIR	S	0.70
		BAI	S	0.58
4	MOD13Q1	SR	S	0.64
	MOD09GQ	BAI	NS – 5	0.50
		BAI	NS – 10	0.70
		BAI	**S**	**0.74**
		NIR	**S**	**0.74**
5	**MOD13Q1**	NIR	S	0.59
		NBR	**S**	**0.71**
		SR	S	0.69
	MOD09GQ	NIR	S	0.66
		BAI	NS – 5	0.56
		BAI	NS – 10	0,60
		BAI	S	0,57

Tabla 2: Estimaciones de área quemada cuyo κ es mayor que 0.5.
[1]: Z.E.: Zonas de Estudio; [2]: P. MODIS: Productos MODIS, MYD13Q1/MOD13Q1: índices de vegetación, 16 días; MYD09Q1/MOD09GQ: reflectividad diaria, (satélite ACQUA/TERRA respectivamente); [3]: Ent. Entradas: NIR: banda infrarroja, SR: cociente simple, BAI, índice de área quemada, NBR, cociente normalizado de área quemada; [4]: CLAS. (S/NS-n clases): clasificador, S, supervisado; NS: no supervisado con "n" clases;
NOTA: En negrita aparece la estimación de área quemada más fiable para cada zona de estudio

La estimación de área quemada más fiable (κ aproximadamente 0.75) se obtuvo aplicando un clasificador supervisado a las imágenes BAI o NIR del producto reflectancia diaria en la zona de estudio 4. La figura 1 muestra esas dos imágenes de entrada.

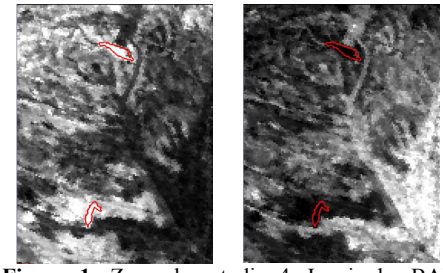


Figura 1: Zona de estudio 4. Izquierda: BAI. Derecha: Banda NIR. En rojo: contorno GPS de áreas quemadas.

En la figura 2 (derecha), se muestra la estimación de área quemada más fiable obtenida para la zona de estudio 4. En la parte de la izquierda, se muestra la imagen verdad-terreno para poder realizar una comparación visual.

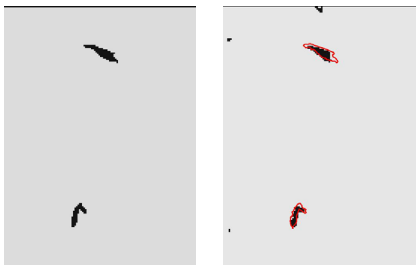


Figura 2: Zona de estudio 4. Izquierda: imagen verdad-terreno. Derecha: Estimación de área quemada. En rojo: contorno GPS de áreas quemadas.

La tabla 3 permite comparar numéricamente las estimaciones de áreas quemadas más fiables para la zona de estudio 4. Así, la estimación a partir del índice BAI sobreestimó la superficie quemada en un 11% y la basada en la banda NIR la subestimó en un 1%.

Datos oficiales (ha)	Estimación basada en BAI (ha)	Estimación basada en NIR (ha)
945.85	1056.25	931.25

Tabla 3: Superficie afectada por los incendios considerados en la zona de estudio 4.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite desde un punto de vista unitemporal (utilizando únicamente una imagen de satélite posterior al incendio) la cartografía de superficies forestales afectadas por grandes incendios en Castilla y León a partir de imágenes MODIS. La principal conclusión del trabajo realizado ha sido pues la validación de dicha metodología propuesta. El trabajo ha permitido además: 1) identificar la imagen de entrada al clasificador que permitió obtener la estimación mas precisa, imagen BAI; 2) reconocer qué tipo de clasificador obtuvo la estimación de área quemada más precisa, supervisado; y 3) identificar el producto MODIS que permitió obtener estimaciones de área quemada más precisas, producto '13: índices de vegetación, 16 días'.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E., MARTÍN, M.P. and PALACIOS, A. 2002. *Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination.* International Journal of Remote Sensing, 23, 5103-5110.

EPTING, J., VERBYLA, D., y SORBEL, B. 2005. *Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+.* Remote Sensing of Environment, 96, 328−339.

GIGLIO, L., LOBODA, T., ROY, D.P., QUAYLE, B. y JUSTICE, C.O. 2009. *An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor.* Remote Sensing of Environment, 113, 408–420.

KONTOES C.C., POILVE, H., FLORSCH, G., KERAMITSOGLOU, I. y PARALIKIDIS, S. 2009. *A comparative analysis of a fixed thresholding vs. a classification tree approach for operational burn scar detection and mapping.* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, 299–316.

MITRI, G.H, y GITAS, I.Z. 2006. *Fire type mapping using object-based classification of Ikonos imagery.* International Journal of Wildland Fire, 15, 457–462.

QUINTANO, C., STEIN, A., BIJKER, W. y FERNÁNDEZ-MANSO, A. 2010. *Pattern validation for data mining of burned area objects from MODIS satellite images.* International Journal of Remote Sensing, 31, 3065-3087.

ROY, D.P. BOSCHETTI, L., JUSTICE, C.O. y JU, J. 2008. *The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product.* Remote Sensing of Environment ,112, 3690–3707.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León toda la información proporcionada (proyecto VA098A08).

Identificación de las áreas quemadas utilizando imágenes MODIS (México)

L. Manzo-Delgado[1], I. Cruz-López [2] y G. López-Saldaña[3]

[1] Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán (México, D.F.). Correo electrónico: llmanzo@igg.unam.mx

[2] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Insurgentes Sur 4903, Parques del Pedregal, 14010 Tlalpan (México, D.F.).

[3] Department of Space and Climate Physics. University College London. Holmbury St. Mary, Dorking, Surrey, RH5 & NT (United Kingdom).

RESUMEN

En el marco de las actividades realizadas por la Red Latinoamericana de Incendios (RedLatif) y la Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudios de los Recursos Naturales (SERENA), se desarrolló un nuevo algoritmo para identificar las áreas quemadas en la región sureste de México para el periodo 2008. El método ajusta los índices espectrales post-incendio NBR y BAI derivados de los productos de reflectancia de 16 días MCD43B4 del sensor MODIS, tomando como referencia el algoritmo de áreas quemadas AQL2004. El nuevo algoritmo está compuesto por tres fases: 1) Discriminación, 2) Comparación multitemporal y 3) Análisis contextual. Resultados preliminares muestran que AQM2008 identificó áreas quemadas mayores a 100 hectáreas, ubicadas en bosques, selvas y en terrenos agropecuarios. Este avance es una contribución importante para obtener la cartografía de áreas quemadas de Latinoamérica.

Palabras clave: Áreas quemadas, MODIS, BAI, NBR

ABSTRACT

As part of the activities of the Latin American Network of remote sensing and forest fires (RedLatif) and the Latin American Network of Monitoring and Studying of Natural Resources (SERENA), it was created a new algorithm to identify extensive burned areas on the southeast of Mexico during 2008. The method includes post-fire spectral index such as NBR and BAI, calculated from surface reflectance 16-day composites from MODIS sensor (MCD43B4) having as reference the AQL2004 algorithm. The discrimination of burned areas was addressed in three phases: 1) Discrimination, 2) Multitemporal comparison and 3) contextual analysis. Preliminary results show that AQM2008 identifies burned areas larger than 100 hectares, located in forest and cropland. This algorithm is an important contribution to obtain burned land mapping of similar environmental features.

Keywords: *Burned area, MODIS, BAI, NBR.*

INTRODUCCIÓN

Cada año se queman extensas superficies agrícolas, pecuarias y forestales induciendo cambios en la vegetación, el suelo y la atmósfera. En la última década diversos países han reforzado sus programas de detección de incendios utilizando técnicas de percepción remota, imágenes de satélite y sistemas de información geográfica, manteniendo un monitoreo continuo para combatir estos eventos y elaboran reportes semanales, mensuales y anuales. Sin embargo, las superficies quemadas han sido poco estudiadas, careciendo de cartografía temática apropiada para conocer el patrón de distribución espacial y temporal, estudiar los efectos ocasionados en la densidad de cobertura vegetal, la erosión del suelo y la calidad del aire, además de ser un apoyo importante para desarrollar programas de reforestación y recuperación de este tipo de superficies.

A finales de 2004 se formó la Red Latinoamericana de Teledetección de Incendios Forestales (RedLatif) con apoyo del programa internacional GOFC-GOLD, teniendo como objetivo inicial cartografiar las superficies quemadas de gran extensión ocurridas en 2004, desde México hasta la Patagonia en Argentina. Para ello se utilizaron compuestos MODIS de 32 días de reflectancia de la superficie, logrando construir el algoritmo AQL2004, obteniendo información relevante a escala regional y nacional de la

distribución espacial de estos eventos (Chuvieco et al. 2008). En la actualidad RedLatif, en el marco del proyecto Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudios de los Recursos Naturales (SERENA), ha estado desarrollando un algoritmo que permita evaluar sistemáticamente las áreas quemadas en Latinoamérica, utilizando imágenes MODIS diarias y compuestos de 16 días de reflectancia de la superficie (MCD43B4), tomando como periodo de análisis el año 2008. Para lograr esto se establecieron las siguientes etapas: 1) Selección de áreas piloto, 2) Aplicación y validación de diferentes algoritmos a escala local, 3) Análisis comparativo entre los algoritmos y 4) Aplicación y validación regional. En la primera etapa se eligieron 6 Tiles o ventanas MODIS como áreas piloto, las cuales se ubican en México, Cuba, Colombia, Paraguay, Brasil y Argentina. De manera particular, el Tile correspondiente a México cubre la región sureste del país y parte de Centroamérica. El presente trabajo expone los avances de la segunda etapa obtenidos para el área piloto asignada a México.

El objetivo de este trabajo fue ajustar el algoritmo AQL2004 para identificar, estimar y cartografiar las superficies afectadas por incendios en el sureste de México para el periodo 2008, utilizando el producto estándar MODIS MCD43B4 para el periodo 2008.

ÁREA EN ESTUDIO

La ventana MODIS-H09v07 comprende la región sureste de México, incluyendo en su totalidad a los estados de Chiapas y Tabasco, así como parte de Campeche y Quintana Roo. En 2008, la CONAFOR reportó para esta región 643 incendios que afectaron 29,658 ha, siendo Quintana Roo el estado más afectado (17,830 ha) seguido por el de Chiapas (9,711 ha). A escala nacional, ambos estados fueron considerados dentro de las 10 entidades más afectadas por incendios.

IMÁGENES MODIS

El producto estándar MODIS MCD43B4 se genera cada 16 días, en proyección Sinusoidal, a partir de la combinación de los datos de los satélites Terra y Aqua, con resolución espacial de 1 km y 7 bandas espectrales, logrando con ello corregir el efecto bidireccional y reducir la influencia de nubes y distorsiones atmosféricas. Este producto se creó con la finalidad de optimizar la calidad de los compuestos MODIS de 32 días, constituyendo una oportunidad para cartografías áreas quemadas con mejores resultados (Opazo y Chuvieco 2007). Debido a ello fue considerado de gran utilidad para las condiciones ambientales de Latinoamérica.

AJUSTES AQM2008

Este proceso se inició con la revisión, identificación y selección de superficies afectadas por incendios (CONAFOR 2008, CONANP 2008). Dicha información se utilizó para identificar visualmente la presencia de áreas quemadas en los quicklook de Landsat (http://glovis.usgs.gov).

Posteriormente se verificó su presencia en el correspondiente compuesto MODIS de 16 días. Este proceso constituyó una etapa importante para verificar o corregir cada uno de los umbrales del algoritmo AQL2004. Una vez efectuados los ajustes necesarios, se aplicó a los 46 compuestos que cubren el periodo 2008.

El algoritmo AQM2008 está compuesto por tres fases: 1) Discriminación, 2) Comparación multitemporal y 3) Análisis contextual. Las nubes y las superficies no combustibles se enmascaran antes de iniciar la primera fase para disminuir posibles confusiones. Las nubes se eliminaron utilizando las Bandas 2, 3 y 5:

$$Si\ B2 > 0.25\ y\ B3 > 0.06\ y\ B5/B3 > 0.7 \quad (1)$$

donde:B1=Banda2: B2=Banda3 y B3= Banda 5

La máscara de combustible se construyó a partir del mapa de vegetación VCF (Vegetation Continuos Fields; Hansen et al. 2004) el cual tuvo que adecuarse a la misma proyección y resolución espacial que los compuestos MODIS de 16 días. La primera fase del algoritmo discrimina los pixeles más afectados por el fuego a partir de umbrales fijos aplicados a los índices de áreas quemadas Normal Burn Ratio (NBR; López-García y Caselles, 1991) y Burned Area Index (BAI; Martín et al. 2005).

La segunda fase compara la diferencia de valores NBR y BAI de los píxeles discriminados en un tiempo dado *(t)*, con relación al valor del mismos pixel en el compuesto anterior *(t-1)*:

$$BAI_{t} - BAI_{t-1}\ y\ NBR_{t} - NBR_{t-1} \quad (2)$$

Si la diferencia es mayor que los umbrales establecidos las áreas quemadas se conservan; de lo contrario se eliminan. De esta manera el pixel seleccionado puede ser elegido una sólo vez,

disminuyendo la posibilidad que un mismo evento sea seleccionado de manera consecutiva (por lo menos dos veces).

El compuesto de enero 2008 ($_t$) se consideró como el tiempo inicial, cuyos resultados se comparan con el último compuesto los de 2007 ($_{-1}$). Al final de esta fase las áreas quemadas pequeñas (< 3 pixeles = 300 ha) fueron eliminadas.

La tercera fase es un análisis contextual para agregar nuevos pixeles al grupo seleccionado y rehacer la superficie afectada por el fuego. Para ello se utiliza un buffer de 3 km (3 pixeles) y el índice BAI con un filtro de paso bajo aplicado en una ventana de 7 x7 pixeles. Si el BAI del pixel > (BAI medio * 1.3) y el pixel está dentro del buffer, entonces se considera como áreas quemada.

VALIDACIÓN AQM2008

Para validar el nuevo algoritmo AQM2008 se tomó como referencia los reportes de incendio elaborados por CONAFOR y CONABIO (2008), así como las imágenes Landsat y SPOT previas y posteriores a los eventos. Considerando la distribución de los incendios y las áreas quemadas se eligieron tres imágenes al azar; sin embargo, la zona en estudio, por su ubicación geográfica, presenta alta densidad de nubosidad durante todo el año, siendo más intensa en la temporada lluviosa de junio a septiembre. Debido a ello, sólo fue posible obtener 2 pares de imágenes Landsat ETM+ (http://landsat.org): Path 21 - Row 49 del 9 y 25 de abril de 2008 y Path 22 - Row 48 del 3 de marzo y del 2 de mayo de 2008. En complemento se obtuvo un par de imágenes SPOT: K/J 604-318 del 29 de marzo y del 2 de abril de 2008. Con apoyo de la interpretación visual (Roy et al., 2005) se identificaron y delimitaron en formato vector varias áreas quemadas. A partir de ROI's (Regions of interest) se obtuvo la superficie coincidente en ambos vectores y se estimó la confiabilidad del algoritmo. Así mismo se organizó una matriz de confusión para determinar los errores de omisión y comisión.

RESULTADOS

Utilizando los compuestos MODIS de 16 días y tomando como base el algoritmo AQL2004, se construyó uno nuevo para el sureste de México denominado AQM2008. Los umbrales de ambos algoritmos se presentan en la Tabla 1. Los ajustes para el algoritmo AQM2008 consistieron generalmente en la disminución de umbrales debido a su resolución espacial.

Umbrales	AQL2004	AQM2008
BAI mínimo	100	95
NBR mínimo	0.15	0.05
BAI multitemporal	0.6	0.25
NBR multitemporal	160	50
Semillas	> 5 pixels	> 3 pixels
Buffer	3 km	3 km
Ventana	15 x 15	7 x 7

Tabla 1: Umbrales establecidos para detectar áreas quemadas

Solamente los primeros 19 compuestos (enero - junio) presentaron superficies quemadas; los 27 restantes presentaron resultados en julio y en diciembre. Así mismo, se estimó que durante 2008, el sureste de México presentó una superficie total de 66,973.53 ha de áreas quemadas, con polígonos entre 86 y 2400 ha, siendo el estado de Chiapas el que presentó una mayor superficie afectada. Para el mismo periodo, CONAFOR reportó 29,658 ha como producto de 643 incendios, considerando a Quintana Roo como el estado más afectado (17,830 ha) seguido por el de Chiapas (9,711 ha).

Una análisis comparativo preliminar sugiere que el algoritmo AQM2008 discriminó tanto quemas agropecuarias como forestales; debido a ello, la superficie final puede considerarse que está estar sobrestimada.

Por otra parte, se observó que el 45 % de los polígonos quemados ocurre solo una vez; el 24% ocurren 2 veces; el 14% se repiten 3 veces y el 17% pueden reincidir entre 4 y 8 veces. Esta dinámica muy probablemente está relacionada con la sobreposición de 8 días entre los compuestos.

Los resultados obtenidos fueron comparados visualmente con los productos derivados a partir MODIS (MCD45A1) que genera la Universidad de Maryland mediante FIRMS (Fire Information for Resources Management System). Esto permitió reconocer que ambos algoritmos detectaron, de manera general, las mismas superficies; sin embargo, AQM2008 falló en la identificación de varias superficies. Este ejercicio será considerado para ajustar y mejorar el algoritmo en un futuro próximo (Figura 1).

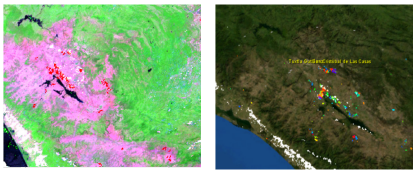


Figura 1: Comparación de áreas quemadas derivadas de diferentes algoritmos y compuestos MODIS para el periodo 2008. De arriba a abajo: a) AQM2008 - MCD43B4 y b) FIRMS - MCD45.

Como resultado preliminar de la validación se observó que algunas superficies forestales quemadas no fueron identificadas (errores de omisión); en tanto que, las extensas quemas agrícolas y pecuarias fueron identificadas fácilmente, considerándose en ocasiones una sobreestimación (errores de comisión).

DISCUSIÓN

El uso de compuestos MODIS de 16 días permitió construir un algoritmo para detectar superficies quemadas > 300 ha agropecuarias o forestales. El algoritmo AQM2008 detectó varias superficies afectadas por grandes incendios forestales, particularmente el ocurrido en la Reserva de El Triunfo entre el 11 y 24 de abril de 2008 (> 570 ha). Sin embargo existen varios incendios de menor superficie .

CONCLUSIÓN

El algoritmo AQM2008 y el uso de compuestos MODIS - 16 días constituyen una alternativa para identificar y evaluar las superficies quemadas > 300 ha de manera sistemática a escala regional. Asimismo, se considera que puede ser un insumo importante para desarrollar un monitoreo en otras regiones del país y en Latinoamérica. La cartografía generada de áreas quemadas se considera de gran utilidad para elaborar programas de reforestación y vigilancia de quemas agropecuarias.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E., OPAZO, S., SIONE, W., DEL VALLE, H., ANAYA, J., DI BELLA, C., CRUZ I., MANZO, L., LÓPEZ, G., MARÍ, N., GONZÁLEZ F., MORELLI, F., SETTER, A., CSISZAR, I., KARPANDEGUI, J., BASTARRIKA, A., LIBONATI, R. 2008: *Global burned land estimation in Latin America using Modis Composite Data.* Ecological Applications, 18, 64-79.

CONAFOR 2008. *Reportes de incendios 2008*. Comisión Nacional Forestal, México, D.F. http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales forestales/incendios/index.html

FIRMS WEB GIS SYSTEM (Fire Information for Resource Managemnet System). *Modis Burned Area and Active Fire Layer*. University of Maryland, Maryland, USA. http://modis-fire.umd.edu/BA_getdata.html (consultado 25 may. 2011).

HANSEN, M., DEFRIES, R., TOWNSHEND, J.R., CARROLL, M., DIMICELI, C., SOHLBERG, R. 2004: *500m MODIS Vegetation Continuous Field.* University of Maryland. Maryland, USA. http://glcf.umiacs.umd.edu/data/modis/ (consultado 10 sep. 2009).

LÓPEZ GARCÍA, M.J., CASELLES, V. 1991: *Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper Data.* Geogarto International, 1, 31-37.

MARTÍN, M.P., GÓMEZ, I., CHUVIECO, E. 2005: *Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data*. In Proccedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: fire Effects Assessment (eds J. Riva, F. Pérez-Cabello y Emilio Chuvieco). Universidad de Zaragoza, Gofc-Gold, EARSeL, París. pág. 193-198

OPAZO SALDIVIA, S. Y CHUVIECO SALINERO, E. 2007: *Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas*. Revista de Teledetección. 27, 27-43.

Comparación de los productos de área quemada y anomalías térmicas de MODIS en Brasil durante 2008

S. Merino-de-Miguel[1], A. Setzer[2], F. Morelli[2], S. de Jesús[2], F. González-Alonso [3] y M. Huesca[4]

[1] EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid (España). Correo electrónico: silvia.merino@upm.es

[2] INPE-CPTEC. Av. dos Astronautas, 1758. São José dos Campos, SP 12227-010 (Brasil)

[3] Laboratorio de Teledetección. CIFOR-INIA. Carretera de la Coruña Km. 7.5 28040 Madrid (España)

[4] ETSI Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid (España)

RESUMEN

Cada año, los incendios forestales afectan a una superficie a escala global que ronda los 3 millones de kilómetros cuadrados. Conocer cuánta y qué superficie se ve afectada es de vital importancia de cara a estimar el impacto de este fenómeno, así como para planificar posibles acciones de manejo y restauración de las zonas incendiadas. La estimación de la superficie afectada por incendios, así como la estadística de quema de biomasa, suele realizarse a escala global a partir de datos de satélite, siendo el sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectrometer) de la NASA, uno de los más utilizados para este fin. A partir de datos de reflectancia de este sensor se elabora un producto de área quemada, de 500m de tamaño de píxel y periodicidad mensual (MCD45A1), mediante un algoritmo basado en el análisis de series de tiempo. Por otra parte, y utilizando las bandas del térmico del mencionado sensor, se elaboran productos de anomalías térmicas o hotspot, de 1000 m de resolución espacial. Ambos productos pueden obtenerse gratuitamente a través de Internet. El presente trabajo analiza la relación espacial entre ambos productos para 2008 en Brasil, utilizando para ello una rejilla de 10 por 10km basada en la proyección cartográfica equal-area Sinusoidal, utilizada en la mayor parte de los productos derivados de MODIS. El análisis de los datos, que se han estudiado de forma global, mensual, y utilizando diversas cartografías temáticas para estratificar el territorio, ponen de manifiesto las dificultades para encontrar relaciones estables y predecibles entre ambos productos. También permiten cuestionar la precisión de uno y otro tipo de producto, así como su idoneidad para la toma de decisiones o la incorporación en modelos complejos que requieren este tipo de información.

Palabras clave: MCD45A1, foco activo, hotspot.

ABSTRACT

Each year, wildfires affect an area of 3 million of squared kilometers around the world. In order to estimate the impact of such phenomenon, and in order to be able to plan management activities and restoration works, it is necessary to know how much area is affected and where does vegetation burn. At global scale, the estimation of the burned area as well as the biomass statistics are performed by means of satellite data, being the NASA MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectrometer) sensor one of the most widely used. On the one hand, and by means of MODIS reflectance data, a global 500m-pixel size burned area product is produced at monthly resolution (MCD45A1) using a methodology that is based on temporal series of reflectance data. On the other hand, and by means of the MODIS thermal bands, a global 1000m spatial resolution thermal anomalies or hotspot product is elaborated. Both products can be downloaded from the Internet free of charge. The present paper analyses the relationships between these two products in Brazil during 2008, using an equal-area Sinusoidal grid of 10 by 10km. The analysis of the resulting data, which were studied at annual and monthly scales, and in combination with different thematic cartographies for stratification purposes, revealed the difficulties to find reliable and predictable relationships between the two mentioned products. The lack of a proper relationship between MODIS burned area and thermal anomalies products may also make us think about the adequacy of one or the other product to be involved in complex climatic models or decision making mechanisms.

Keywords: *MCD45A1, active fire, hotspot.*

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 40 años, Latinoamérica ha experimentado un proceso de cambios ambientales sin precedentes en su historia. Entre las principales causas figuran la deforestación, los incendios, la expansión de la agricultura o el cambio climático. El estudio y la cuantificación del cambio sufrido requieren de la elaboración y puesta a disposición de cierta información actualizada, la cual permitirá realizar un correcto seguimiento del estado de los ecosistemas. De entre las causas citadas, los incendios forestales son una de las principales amenazas a tener en cuenta. Este tipo de eventos alteran el funcionamiento de los ecosistemas, además de generar un gran impacto paisajístico (Pyne *et al*., 1996) y suponer la emisión de cantidades muy significativas de gases de efecto invernadero, partículas y aerosoles a la atmósfera (Levine, 1991).

Los incendios forestales son uno de los campos de investigación más activos en la teledetección de la cubierta terrestre. La utilidad de los datos de satélite en este campo es amplia y variada. La principal ventaja de la teledetección frente a otras técnicas es su capacidad para muestrear de forma sistemática la superficie del Globo en un brevísimo espacio de tiempo (Chuvieco, 1999; Sunar y Ozkan, 2001), y producir resultados también con un escasísimo margen temporal.

Una de las medidas más directas que puede obtenerse a partir de los datos de teledetección sobre los efectos del fuego, es el cartografiado o estimación del área afectada (Lentile *et al.*, 2006). Sin embargo, todavía existe la necesidad de valorar qué métodos son los más capaces de funcionar sobre un amplio espectro de ecosistemas y condiciones de adquisición (Lentile *et al.*, 2006), lo que unido a la fuerte demanda de productos globales de área quemada y estadísticas de quema de biomasa, hace de aquéllos un intenso campo de investigación. Esta fuerte demanda se basa en el interés por modelar el ciclo del carbono, entender las relaciones entre los regímenes de incendios y el clima y las emisiones, estimar el impacto de la quema de vegetación sobre los cambios en el uso del suelo, etc. (Tansey *et al.*, 2008).

De entre los métodos utilizados para el cartografiado del área quemada, el uso de datos satelitales de reflectancia, es uno de los más extendidos. Además, muchos estudios han mostrado la utilidad de las detecciones de focos activos como herramienta para la elaboración de estimaciones de área quemada o quema de biomasa. En la detección de focos activos intervienen los canales del infrarrojo medio y térmico, los cuales permiten estimar la energía térmica, característicamente alta en el caso de ocurrir un evento. El problema al utilizar los focos activos surge porque puede ocurrir que el paso del satélite no coincida con el desarrollo del incendio, o que éste quede oculto por cobertura nubosa o humo denso (Roy *et al*., 2002), lo que claramente tendería a subestimar la variable afectada (superficie, cantidad de biomasa, etc.)

A partir de los datos del sensor MODIS se generan un importante número de productos. De éstos, nos interesan los relacionados con el estudio de los incendios forestales: el MCD45A1 (MODIS Terra + Aqua Burned Area Montly L3 Global 500m; Roy *et al.*, 2005 y 2008) y los MOD14 y MYD14 (MODIS Terra and Aqua Thermal Anomalies; Giglio *et al*., 2003 y 2006). El producto MCD45A1 se distribuye en archivos mensuales por recortes de un área de 1200 por 1200km aproximadamente, denominados *tiles*. Por su parte, los datos de anomalías térmicas fueron facilitados en un único archivo (para toda el área y periodo de estudio) de puntos (en formato *shapefile*) por parte de la Universidad de Maryland, lo que facilitó enormemente su procesado.

El objetivo perseguido en este trabajo era realizar un análisis sobre la relación espacial entre ambos productos (de área quemada y de anomalías térmicas), supuesto que ambos están directamente relacionados con la incidencia del fuego sobre la vegetación. Para ello, se elige Brasil y el año 2008, y se realiza un análisis espacial de coincidencia utilizando una rejilla de 10 por 10km de lado basada en la proyección Sinusoidal, que es de tipo equal-area.

ÁREA DE ESTUDIO Y MATERIAL

El área de estudio es Brasil y el periodo de estudio 2008. Respecto al área de estudio, solo se muestran los resultados para el *tile* H13V11 que se localiza al sur (ver Figura 1). Como se ha dicho anteriormente, este *tile* tiene un área de aproximadamente 1200 por 1200km y cubre parcialmente no solo Brasil, sino también Argentina y Paraguay, donde también se llevaron a cabo los análisis de relaciones espaciales.

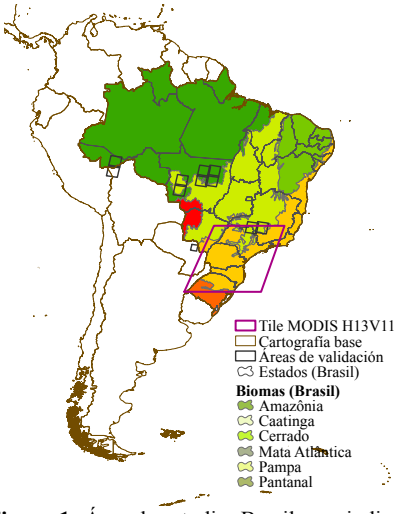


Figura 1: Área de estudio: Brasil, con indicación de la división por Estados (dentro de Brasil) y biomas (en tonos verdes y grises). Localización del *tile* H13V11, cuyos resultados se muestran en este trabajo, y localización de las áreas donde se disponía de escenas Landsat y CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) de validación. Datos en latitud-longitud (WGS-84).

Los materiales utilizados son: (i) una serie temporal del producto de área quemada MCD45A1 (desde enero a diciembre de 2008), (ii) una serie temporal de anomalías térmicas (desde enero a diciembre de 2008) y, (iii) cartografía temática (límites administrativos – Estados - y un mapa de división por grandes biomas de Brasil).

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se basó en el análisis de la coincidencia espacial de los productos MODIS de área quemada y anomalías térmicas. Para ello, se dividió el área de estudio en cajas de 10 por 10km en cuyo interior se evaluó la cantidad de área quemada y el número de anomalías térmicas o hotspots, variables que posteriormente fueron comparadas mediante cros-tabulación.

La división por cajas de 10 por 10km estuvo basada en la proyección equal-area Sinusoidal, que es especialmente apropiada para este tipo de estudios, ya que el área se conserva aproximadamente constante al variar latitud y longitud. De este modo, hubo que reproyectar el fichero de datos de anomalías térmicas, que se encontraba en latitud-longitud (datum WGS-84).

En cuanto al tamaño, 10 por 10km, éste suponía un compromiso entre el nivel de detalle de la información de partida (500m en el producto de área quemada y 1km en el de anomalías térmicas) y la superficie total que sería evaluada (más de 8.5 millones km^2). En particular, y solo para el *tile* objeto de estudio, se analizaron datos correspondientes a 14,400 cajas, conteniendo cada caja 400 píxeles MODIS de 500m o 100 píxeles de 1km.

Como se ha comentado anteriormente, las dos series de datos se analizaron por cros-tabulación, de forma global y mes a mes. Además se tuvo en cuenta la división del territorio con fines de estratificación, desde el punto de vista administrativo (para lo que se utilizó la división por Estados) y desde el punto de vista del ecosistema predominante (para lo que se utilizó la división por grandes biomas). La división por Estados puede tener sentido desde el punto de vista de la motivación para quemar, ya que distintos Estados tienen distintas políticas sobre el uso o fomento del fuego. Por su parte, la división por biomas es interesante desde el punto de vista de la respuesta de la vegetación al fuego y/o de su capacidad para regenerarse y 'hacer desaparecer', de forma más o menos rápida, el efecto del fuego sobre la cubierta vegetal.

De entre los estadísticos que proporciona la cros-tabulación de datos, el coeficiente de correlación de Pearson fue el más estudiado en este caso. Cabe mencionar que en el cálculo de dicho estadístico no se tuvieron en cuenta los pares de datos (0,0), es decir, aquellas cajas en las que no había ni píxeles quemados (de acuerdo al producto MCD45A1) ni anomalías térmicas; lo que incluía por ejemplo, todas las cajas que caían en láminas de agua.

RESULTADOS

Los resultados alcanzados en términos de coeficiente de correlación de Pearson, entre el área quemada y el número de anomalías térmicas fueron muy variados. Se encontraron valores ocasionalmente altos (mayores de 0.5), aunque fueron mayoritariamente bajos (por debajo de 0.3). En general resultaron positivos aunque también aparecieron valores negativos. Desde el punto de vista temporal, ningún mes destacó por presentar sistemáticamente valores más altos en el coeficiente de correlación. Desde el punto de vista geográfico, Argentina produjo los mejores resultados. Desde el punto de vista del tipo de

cubierta (grandes biomas – solo en Brasil), los mejores resultados fueron para la Mata Atlántica, un tipo de bosque maduro.

CONCLUSIONES

En principio, los productos de área quemada y de anomalías térmicas que se derivan de observaciones de satélite, más aún cuando ambos proceden del mismo sensor y la toma de datos (de reflectancia y emitancia) es simultánea, deberían responder a una misma realidad. Sin embargo, no parece que la relación que existe entre ambos sea fácilmente predecible, lo que pone de manifiesto que deberían realizarse mayores esfuerzos de validación antes de utilizar estos productos en modelos climáticos o tenerlos en cuenta en la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E., 1999. *Introduction.* En 'Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean basin'. (Ed. E Chuvieco) pp. 1-3. (Springer: Berlin).

GIGLIO L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C.O., KAUFMAN, Y.J., 2003. *An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS*. Remote Sensing of Environment, 87, 273-282.

GIGLIO, L., CSISZAR, I., JUSTICE, C.O., 2006: *Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) sensors*. Journal of Geophysical Research, 111, G02016, doi:10.1029/2005JG000142.

LENTILE, L.B., HOLDEN, Z.A., SMITH, A.M.S., FALKOWSKI, M.J., HUDAK, A.T., MORGAN, P., LEWIS, S.A., GESSLER, P.E., BENSON, N.C., 2006. *Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects*. International Journal of Wildland Fire, 15, 319-345.

LEVINE, J.S., 1991. *Introduction.* En: 'Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications'. (Ed. J.S. Levine). (MIT Press: Cambridge, USA.

PYNE, S.J., ANDREWS, P.L., LAVEN, R.D., 1996. *Introduction to Wildland Fire. Final Report MMF practices* – 3015, Canada. John Wiley & Sons, New York, USA.

ROY, D.P., LEWIS, P.E., JUSTICE, C.O., 2002. *Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data – a bi-directional reflectance model-based expectation approach*. Remote Sensing of Environment, 83, 263-286.

ROY, D.P., JIN, Y., LEWIS, P.E., JUSTICE, C.O., 2005. *Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data*. Remote Sensing of Environment, 97, 137-162.

ROY, D.P., BOSCHETTI, L., JUSTICE, C.O., JU, J., 2008. *The collection 5 MODIS burned area product – Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product.* Remote Sensing of Environment, 112, 3690-3707.

SUNAR, F., ÖZKAN, C., 2001. *Forest fire analysis with remote sensing data.* International Journal of Remote Sensing, 22, 2265-2277.

TANSEY, K., GRÉGOIRE, J.M.C., DEFOURNY, P., LEIGH, R., PEKEL, J.-F., VAN BOGAERT, E., BARTHOLOMÉ, E., BONTEMPS, S., 2008. *A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals*. Geophysical Research Letters, 35, L01 401.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Carolina y a la UPM por la financiación de una estancia de investigación en INPE-CPTEC (Brasil). A CYTED por la financiación de la Red Temática SERENA 'Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales'. A NASA y a la Universidad de Maryland, por la cesión de los datos MODIS de área quemada y anomalías térmicas.

Estimación de la eficiencia del quemado a partir de la severidad de quemado

P. Oliva y E. Chuvieco

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares (Madrid, España). Tel: 918855257, Fax: 918854439. E-mail: patricia.oliva@uah.es

RESUMEN

La eficiencia del quemado (EQ) se define como el porcentaje de biomasa consumida por el fuego. Este parámetro forma parte de la ecuación utilizada para estimar el volumen de emisiones producidas por la quema de biomasa. Tradicionalmente se asume que este parámetro es constante suponiendo que la cobertura vegetal se consume completamente, sin embargo debería ser considerado una variable dinámica. En este estudio utilizamos los niveles de severidad de quemado de un gran incendio ocurrido en España en 2009 determinados a partir de imágenes del sensor ENVISAT-MERIS para estimar valores de eficiencia de quemado en función del tipo de vegetación afectada.

Palabras clave: área quemada, severidad, cartografía.

ABSTRACT

The burning efficiency (BE) is defined as the percentage of biomass consumed by the fire. This parameter is part of the equation used to estimate the amount of greenhouse gases (GHG) emitted by biomass burning. Traditionally, BE is assumed as a constant parameter which suppose that the vegetation cover is completely consumed by the fire. However, BE should be considered as a spatially dynamic variable. In this study we used the burn severity map of a big fire occurred in Spain in 2009 obtained from ENVISAT-MERIS data to estimate burning efficiency values by type of vegetation.

Keywords: *remote sensing, forest fire, GIS.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el interés sobre las estimaciones de severidad de quemado y eficiencia de quemado ha ido en aumento. Concretamente, las estimaciones de severidad a partir de imágenes de satélite se han convertido en una variable clave tanto para los estudios de emisiones a la atmósfera como para los estudios ecológicos de comportamiento y recuperación de la vegetación (French *et al.*, 2008).

La eficiencia del quemado (EQ) se define como el porcentaje de biomasa consumida por el fuego. La eficiencia de quemado se incluye en la ecuación propuesta por el IPCC (2006) (Intergovernmental Panel on Climate Change) de la siguiente manera,

$$L_{FIRE} = A \times M_B \times C_f \times G_{ef} \times 10^{-3} \qquad (1)$$

Donde L_{FIRE} es el volumen de gases de efecto invernadero producido por el incendio (toneladas por cada gas), A es el área quemada (m^2), M_B es la cantidad de combustible disponible para la combustión (ton/m^2), C_f es la eficiencia de quemado (sin dimensiones), y G_{ef} es el factor de emisión de cada gas (g/kg de materia seca quemada).

La mayoría de los estudios utilizan un valor constante de eficiencia de la combustión por tipo de vegetación o combustible, asumiendo que la vegetación afectada ha sido completamente consumida por el fuego (French *et al.*, 2004). Sin embargo, algunos estudios concluyen que la EQ debería ser considerada como una variable dinámica en vez de un parámetro constante (Sá *et al.*, 2005).

Con el objetivo de cubrir estas necesidades y explorar el potencial de las imágenes del sensor ENVISAT-MERIS en este campo se desarrolla el proyecto FEMM (Fire Effects Monitoring and Mapping). Este proyecto se incluye dentro de la iniciativa de la Agencia Espacial Europea denominada Changing Earth Science Network. En este artículo se presentan los resultados preliminares en relación a la estimación de la eficiencia de quemado a partir de los datos de severidad previamente calculados.

ZONAS DE ESTUDIO

Varios incendios de gran tamaño ocurrieron en España durante el verano de 2009. Se seleccionó uno de ellos debido a la superficie afectada y a la posibilidad de encontrar una amplia variabilidad de niveles de severidad de quemado en ellos.

El incendio fue iniciado el 28 de Julio en las proximidades de arenas de San Pedro (Ávila – Castilla y León). El incendio fue finalmente extinguido después de tres días y afectó a un total de 3920 ha. El incendio se produjo en una región principalmente ocupada por bosque de pinos y matorral denso.

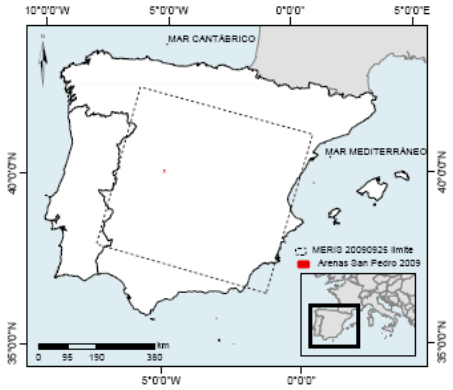


Figura 1: Área de estudio. La línea de puntos marca el límite de la imagen MERIS utilizada.

DATOS DE ENTRADA

Fueron utilizadas en este estudio imágenes MERIS (Medium Spectral Resolution Imaging Spectrometer) *full resolution* nivel 1b. Este sensor mide la radiación solar reflejada por la superficie terrestre a una resolución espacial de aproximadamente 300 metros en 15 bandas espectrales distribuidas entre la región del visible y del infrarrojo cercano (390 nm – 1040 nm), y con una resolución temporal de 3 días (Bézy *et al.*, 2000).

Se seleccionó una imagen MERIS tomada el 25 de septiembre de 2009. Se aplicó el software SCAPE-M para obtener la reflectividad corregida atmosféricamente.

METODOLOGÍA

Estimación de la severidad de quemado

La severidad de quemado fue estimada aplicando los resultados del modelo de simulación desarrollado por De Santis *et al*. (2009). Los autores propusieron la inversión consecutiva de dos modelos de transferencia radiativa (RTM), uno de ellos a nivel de hoja (PROSPECT) y el segundo a nivel de dosel (GeoSAIL). El modelo resultante estaba compuesto por 30 firmas espectrales diferentes que se correspondían con diversos valores de GeoCBI (Geo Composite Burn Index, De Santis y Chuvieco (2009)). GeoCBI es un índice que se utiliza como medida de severidad de quemado, presenta un rango de 0 a 3, siendo 0 no quemado y 3 completamente quemado. Este índice se mide en campo y tiene en cuenta diversos parámetros para medir la severidad de un incendio considerando diferentes estratos vegetales (suelo, matorral y arbolado).

Por ultimo, los 30 espectros se utilizaron como librería espectral para realizar una clasificación supervisada basada en el ángulo espectral denominada Spectral Angle Mapper (Kruse *et al.*, 1993). El resultado es un mapa de severidad de quemado medida en valores de GeoCBI.

Para realizar la validación de esta cartografía generada a partir de imagines MERIS se utilizaron imagines Landsat-TM a las cuales se aplicó la misma técnica para obtener mapas de severidad de quemado. Ha sido demostrado por varios autores que los datos Landsat pueden ser utilizados como referencia para validar productos de resolución espacial media y baja (De Santis y Chuvieco, 2008; Roy *et al.*, 2005). Los resultados de la validación mostraron valores de coeficiente de determinación de 0,92 y 0,95, y de pendiente de la recta de regresión de 0.87 y 0.98 (en Ávila y Teruel, respectivamente). Estos resultados demostraron la capacidad de las imágenes MERIS para estimar niveles de severidad de quemado.

Estimación de la eficiencia de quemado

En primer lugar se realizó una extensiva búsqueda bibliográfica para conocer los valores de eficiencia de quemado que habían sido utilizados en estudios anteriores. Es de destacar que se han encontrado pocos estudios que indiquen la eficiencia del quemado en bosques mediterráneos. De los valores de EQ encontrados se seleccionaron los que más se ajustaban a las características de la vegetación afectada en los

incendios seleccionados (Tabla 1).

Tipo de vegetación	EQ_{Lit}	Referencia
Pasto	0.98	(Wiedinmyer *et al.*, 2006)
Matorral	0.95	(IPCC, 2006)
Coníferas	0.57	(Deeming *et al.*, 1977)
Caducifolios	0.56	(Deeming *et al.*, 1977)

Tabla 1: Valores de eficiencia de quemado encontrados en la literatura por tipo de vegetación.

En este estudio se decidió seguir la metodología utilizada previamente por Kasischke *et al*. (1995), por lo que se dividieron los rangos de severidad en tres categorías: bajo, medio y severo. Los valores de EQ fueron adaptados a cada uno de los niveles de severidad teniendo en cuenta las siguientes consideraciones (De Santis *et al.*, 2010):

- Valores de severidad menores de 2,5 conllevan una afección baja en la cobertura arbórea, matorral quemado pero no consumido y suelo totalmente consumido.
- GeoCBI entre 2,5 y 2,8 supone que las hojas y ramas de matorral han sido altamente consumidas por el fuego, mientras en el estrato arbóreo todavía las ramas más altas no han sido afectadas.
- GeoCBI mayor a 2,8 supone que las hojas han sido completamente consumidas por el fuego, así como pequeñas y medianas ramas. Matorral completamente consumido.

Tipo de vegetación	EQ ajustado al nivel de afección		
	Bajo	Medio	Severo
Pasto	0.85	0.9	0.98
Matorral	0.7	0.85	0.95
Coníferas	0.25	0.42	0.57
Caducifolios	0.25	0.4	0.56

Tabla 2: Valores de eficiencia de quemado adaptados según el nivel de afección por tipo de vegetación.

Los valores mínimos y máximos encontrados en la bibliografía marcaron los valores de BE ajustado para la categoría "bajo" y "severo". El valor de BE medio se obtuvo a partir de la interpolación entre los dos valores anteriores. Está aproximación establece un punto de partida en la estimación de los valores de eficiencia de quemado por tipo de vegetación y nivel de severidad (Tabla 2).

RESULTADOS

La Figura 2 muestra la cartografía de eficiencia de quemado resultante después de aplicar los valores de la Tabla 2.

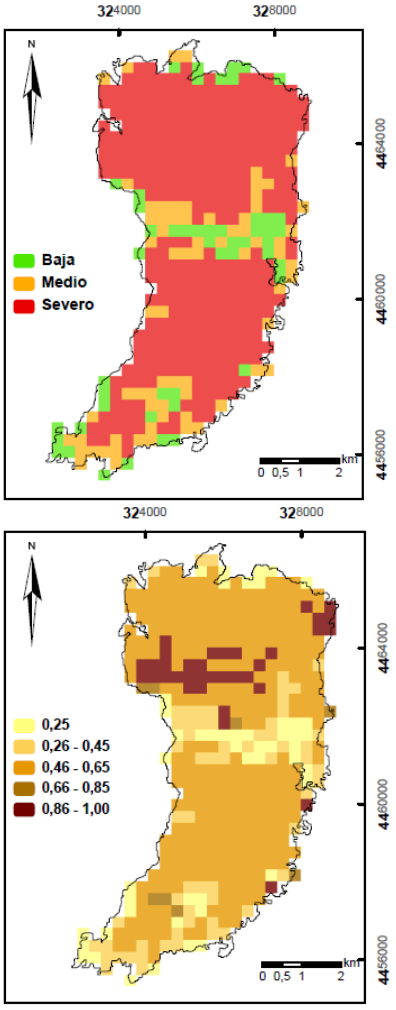


Figura 2: Arriba se representan los niveles de afección considerados en función de la severidad de quemado. Abajo se representan los valores de EQ por tipo de vegetación.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio preliminar ponen de manifiesto la importancia de considerar la eficiencia de quemado como un factor dinámico, dado que varía sensiblemente dependiendo del tipo de vegetación afectada y de

los niveles de severidad de quemado.

El análisis de la bondad de las estimaciones de BE realizadas será el siguiente paso de este estudio. Dado que las mediciones de campo de este parámetro son prácticamente inexistentes, se plantea evaluar los resultados con otra medida que permita estimar la pérdida de biomasa producida a causa del fuego.

BIBLIOGRAFÍA

BÉZY, J. L., S. DELWART y M. RAST (2000). *MERIS - A new generation of ocean-color sensor onboard Envisat*. ESA Bulletin 103: 48-56.

DE SANTIS, A., G. P. ASNER, P. J. VAUGHAM y D. E. KNAPP (2010). *Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery*. Remote Sensing of Environment 114: 1535-1545.

DE SANTIS, A. y E. CHUVIECO (2008). *Comparative analysis of different Satellite-Borne sensors to map burn severity in the Riba de Saelices (Guadalajara) fire.* Revista de Teledeteccion 29: 25-37.

DE SANTIS, A. y E. CHUVIECO (2009). *GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity sensed data.* Remote Sensing of Environment 113: 554-562.

DE SANTIS, A., E. CHUVIECO y P. J. VAUGHAN (2009). *Short-term assessment of burn severity using the inversion of PROSPECT and GeoSail models*. Remote Sensing of Environment 113: 126-136.

DEEMING, J., R. BURGAN y J. COHEN (1977). The National fire-danger rating system. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

FRENCH, N. H. F., P. GOOVAERTS y E. S. KASISCHKE (2004). *Uncertainty estimating carbon emissions from boreal forest fires*. Journal of Geophysical Research 109 (D14S08).

FRENCH, N. H. F., E. S. KASISCHKE, R. J. HALL, K. A. MURPHY, D. L. VERBYLA, E. E. HOY y J. L. ALLEN (2008). *Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary results*. International Journal of Wildland Fire 17: 443-462.

IPCC (2006). Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. S. Eggleston,L. Buendia,M. Miwa,T. Ngara y K. Tanabe. Hayama, Japan, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 4.

KASISCHKE, E. S., N. H. F. FRENCH, L. L. BOURGEAU-CHAVEZ y N. L. J. CHRISTENSEN (1995). *Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in alaska*. Journal of Geophysical Research 100(D2): 2941-2951.

KRUSE, F. A., A. B. LEFKOFF y J. B. DIETZ (1993). *Expert system-based mineral mapping in northern Death Valley, California/Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)*. Remote Sensing of Environment 44: 309-336.

ROY, D., P. FROST, C. O. JUSTICE, T. LANDMANN, J. ROUX, K. GUMBO, S. MA-KUNGWA, K. DUNHAM, R. DU TOIT, K. MHWANDAGARA, A. ZACARIAS, B. TACHEBA, O. DUBE, J. PEREIRA, P. MUCH-OVE, J. T. MORISETTE, S. SANTHANA y D. DAVIES (2005). *The Southern Africa Fire Network (SAFNet) regional burned area product validation protocol*. International Journal of Remote Sensing 97: 137-162.

SÁ, A. C. L., J. M. C. PEREIRA y J. M. N. SILVA (2005). *Estimation of combustion completeness based on fire-indiced spectral changes in a dambo grassland (Western province Zambia)*. International Journal of Remote Sensing 26(19): 4185-4195.

WIEDINMYER, C., B. QUAYLE, C. GERON, A. BELOTE, D. MCKENZIE y X. ZHANG (2006). *Estimating emissions from fires in North America for air quality modelling.* Atmospheric Environment 40: 3419-3432.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto FEMM ha sido financiado por la iniciativa “Changing Earth Science Network” de la Agencia Espacial Europea. Los autores quieren agradecer las aportaciones de A. De Santis en el desarrollo de este trabajo.

Detección de incendios y cartografía temprana de áreas quemadas en Asturias mediante imágenes MODIS

C. Recondo[1, 2], A. Abajo[1], J.J. Peón[2], A. Rodríguez-Quevedo[2], F. González-Alonso[3] y V. Salgado[3]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: mdrecondo@uniovi.es

[2] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n. 33600 Mieres (Asturias, España).

[3] Centro de Investigación Forestal (CIFOR), INIA. Ctra. A Coruña km 7, 28040 Madrid (España).

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento del producto MOD14 de anomalías térmicas y de distintos índices y métodos para cuantificar y cartografiar de forma temprana las áreas afectadas por incendios en Asturias. La metodología empleada en la cartografía utiliza un "*Burned Area Synergic Algorithm*" (BASA) para tratar de sacar el máximo partido del sensor MODIS, empleando distintos índices basados en diferentes partes del espectro y combinando la información de las imágenes con la del producto MOD14. Nuestros resultados suponen, con respecto a los productos existentes, una mejora en la caracterización de las áreas quemadas, tanto en su rapidez como en su efectividad.

Palabras clave: MODIS, fuegos activos, áreas quemadas, cartografía de incendios, algoritmo sinérgico.

ABSTRACT

In this work we analyze the behaviour of the product MOD14 of thermal anomalies and of the different indexes and methods to quantify and map the areas affected by fires at an early stage in Asturias. Our methodology for the cartography consists in a Burned Area Synergic Algorithm (BASA) which tries to extract the maximum potentiality from sensor MODIS. It uses different indexes based on different parts of the spectrum and combines the images with the information from product MOD14. With respect to existing products, our results provide an improvement in the characterization of the burned areas, not only in their promptness but also in their effectiveness.

Keywords: *MODIS, active fires, burned areas, fire cartography, synergic algorithm.*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen un problema de primer orden tanto desde un punto de vista puramente humano, por los riesgos que comporta su extinción, como ecológico, por su repercusión sobre el mantenimiento de la biodiversidad y los ecosistemas. La situación en Asturias no es una excepción, más bien todo lo contrario, debido a la alta proporción de terreno forestal, en gran parte bajo distintas figuras de protección ambiental, y a la orografía del territorio, que complica las labores de extinción.

Obtener por lo tanto un método eficaz para detectar incendios en tiempo real con la antena MODIS de la Universidad de Oviedo, así como para la realización de una cartografía temprana de zonas quemadas, es una prioridad en nuestra región y el objetivo de este trabajo. En él se valida el producto estándar de la NASA MOD14 o de anomalías térmicas o *hotspot*s (Giglio et al., 2003), sugiriendo nuevos parámetros o criterios para adaptarlo a las características diferenciales de los incendios en Asturias (incendios en su mayoría de invierno y de pequeño tamaño). Asimismo se realizan cartografías empleando tres métodos distintos, todos ellos basados en las bandas 2 y 7 de MODIS, y se eligen los valores de referencia y/o umbrales en cada uno de ellos con una modificación del algoritmo BASA (*Burned Area Synergic Algorithm*) (González-Alonso y Merino de Miguel, 2009). Este algoritmo utiliza sinérgicamente cada uno de los métodos empleados en la cartografía con los *hotsposts* de MOD14, con el fin de obtener rápidamente los umbrales adecuados a cada imagen y, por consiguiente, una cartografía

rápida sobre ella. Para la validación tanto del producto MOD14 como de las distintas cartografías obtenidas se utilizó una cartografía de detalle realizada con imágenes Landsat-TM (30 m de resolución). Esta cartografía se realizó siguiendo la metodología estándar en Asturias de Recondo et al. (2002), comparando las imágenes del 2 de agosto de 2008 y del 2 de junio de 2009. Las cartografías MODIS obtenidas en este trabajo se compararon también con el producto estándar de la NASA de áreas quemadas de periodicidad mensual MCD45 (Roy et al., 2005).

METODOLOGÍA

Se analizaron todas las imágenes MODIS obtenidas con nuestra antena, tanto del satélite Terra como del Aqua, del año 2008 y 2009. Sobre cada una de ellas se utilizó un software gratuito que permite generar el MOD14 en tiempo real. Las anomalías térmicas encontradas se producen la mayoría en febrero-marzo, como podemos observar en la Tabla 1. Cada una de ellas fue asignada a su correspondiente incendio por comparación con la cartografía Landsat y con los partes de incendios de estos años. Esto sirvió también para depurar errores, la mayoría producidos en la localización de las centrales térmicas asturianas.

Año 2008												
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hotspots	0	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Incendios	0	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Año 2009												
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hotspots	0	3	97	0	1	0	0	3	1	0	0	0
Incendios	0	3	41	0	1	0	0	2	1	0	0	0

Tabla 1: Relación de los *hotspots* con el número de incendios para los años 2008 y 2009.

Para la realización de las cartografías MODIS se escogieron las imágenes diurnas posteriores a los incendios con menor nubosidad, analizando en cada una de ellas los *hotspots* previos a la fecha de la imagen (por ejemplo, para la imagen del 23 de marzo de 2009 se emplearon los *hotspots* obtenidos entre el 18 y el 22 de marzo, que fueron un total de 71). Los métodos empleados se basan en la banda 2 del NIR (*Near InfraRed*) y la 7 del SWIR (*Short Wavelenght InfraRed*), ambas de 500 m de resolución espacial. Concretamente se ha usado el umbral en la banda 2 y los índices BAIM (*Burnt Area Index for MODIS*; Martín et al., 2005), NBR (*Normalized Burnt Ratio*; López-García y Caselles, 1991) y ΔNBR. Las Ecuaciones 1, 2 y 3 muestran las fórmulas de los tres índices, aunque en el caso del NBR hemos cambiado de signo el numerador con respecto a la fórmula original, haciendo que el NBR tenga valores más altos en las zonas quemadas, al igual que el BAIM y el ΔNBR.

$$BAIM = \frac{1}{(\rho c_{SWIR} - \rho_{SWIR})^2 + (\rho c_{NIR} - \rho_{NIR})^2} \quad (1)$$

$$NBR = \frac{\rho_7 - \rho_2}{\rho_7 + \rho_2} \quad (2)$$

$$\Delta NBR = NBR_{postfuego} - NBR_{prefuego} \quad (3)$$

La metodología para la determinación del umbral óptimo, que marca la diferencia entre las zonas quemadas de las que no lo están, se basó inicialmente en el trabajo de González-Alonso y Merino de Miguel (2009) y en su algoritmo BASA de utilización sinérgica de índices MODIS y *hotspots*. Sin embargo, este algoritmo no se había aplicado en incendios tan pequeños como los ocurridos en Asturias ni en el periodo de invierno, de forma que los umbrales encontrados en nuestro caso difieren a los del trabajo indicado y similares. La idea básica en BASA es utilizar la localización de los *hotspots* para encontrar el umbral que ofrezca la mayor coincidencia espacial (el máximo de fiabilidad global) entre éstos y las zonas quemadas cartografiadas. Sin embargo, en el caso de Asturias, con gran número de incendios pequeños que ocupan una pequeña parte del territorio total, la fiabilidad global no llega a alcanzar un máximo absoluto que indique claramente el umbral más adecuado, de forma que hemos encontrado que la mejor cartografía es la que hace iguales los errores de omisión y comisión (Figura 1 para el umbral en el BAIM) al calcular la matriz de confusión cartografía-*hotspots*. Además, los errores son grandes ya que, al tratar los *hotspots* como círculos de 1 km^2 de área (MOD14 sólo indica el centro del píxel, de 1 km^2=100 ha, donde se produce el exceso de temperatura), se cometen errores aunque los *hotspots* estén correctamente localizados sobre las zonas quemadas correspondientes.

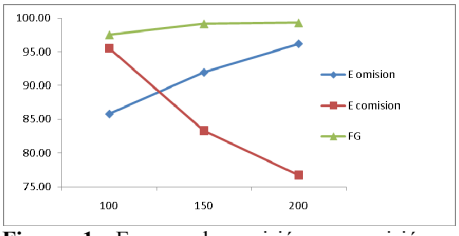


Figura 1: Errores de omisión y comisión y fiabilidad global (FG) de la clase "quemado" (eje Y) para los distintos umbrales BAIM (eje X) aplicados a la imagen Aqua-MODIS del 23 de marzo de 2009 a las 13:47 UTC.

Para las imágenes de marzo de 2009 los valores NIR de las zonas quemadas están entre 0.04 (por debajo son zonas de agua) y un umbral máximo entre 0.08 y 0.1. Para el BAIM, los valores de referencia más adecuados (ρc en la Ecuación 1) fueron de 0.06 en el NIR y de 0.14 en el SWIR. Los umbrales, que dependen de cada imagen, se encuentran generalmente entre 180-200 en las imágenes Terra-MODIS y entre 120-150 en las Aqua-MODIS, en ambos casos en las imágenes en la que ha sido posible elaborar la matriz de confusión para obtener el umbral y la cartografía de forma semiautomática, que son las imágenes que cuentan con un número suficiente de *hotspots* asociados (entre 20 y 70). Éstos son los casos más interesantes, ya que en el caso de pocos *hotspots* (1-3) resulta mejor y más rápido el método visual para establecer el umbral. Los valores encontrados en Asturias difieren de los encontrados por González-Alonso y Merino de Miguel (2009) en Galicia (0.06, 0.19 y 90, respectivamente), así como de los de Gómez y Martín (2008) en España y Portugal (0.04, 0.20 y 202, respectivamente). Para el NBR y el ΔNBR, los valores para Asturias usando la matriz de confusión fueron de entre -0.08 y -0.09 para el NBR y de 0.12 para el ΔNBR (por encima de estos valores se considera área quemada). La desventaja de estos dos índices es que en ellos es difícil obtener el cruce error de omisión-comisión a través de la matriz de confusión, de forma que la mayoría de la asignación de umbrales ha sido visual y sobre cada imagen concreta.

Para la búsqueda de un algoritmo de detección de *hotspots* adaptado a Asturias, se estudiaron los incendios mayores de 50 ha que no fueron detectados por MOD14 pero que, sin embargo, sí aparecieron en las cartografías MODIS. Se analizaron los parámetros térmicos que los caracterizaban para determinar si podían establecerse unos criterios sistemáticos que hubiesen permitido detectarlos como *hotspots*.

RESULTADOS

La comparación *hotspots*-Landsat (periodo entre 02-08-2008 y 02-06-2009) indica que, si bien el producto MOD14 ha detectado en algunas ocasiones incendios pequeños (<10 ha), su grado de detección aumenta con el tamaño de los incendios, siendo medianamente fiable a partir de 50-100 ha (39% de detecciones). Ver Tabla 1.

Independientemente del método elegido para la cartografía, los mejores resultados se producen cuando ésta se realiza en los días posteriores al incendio (5-7 días). Pasados más de 10 días la cicatriz de los incendios está notablemente reducida o incluso no se detecta en la mayoría de los casos (Figura 2).

Landsat		**Nº de incendios detectados/cartografiados**				
Intervalo	**Nº**	MOD14	NIR	BAIM	NBR	MCD45
> 250 ha	1	1	1	1	1	1
100-250 ha	7	6	6	7	7	7
50 - 100 ha	13	5	5	11	12	5
25 - 50 ha	51	10	10	31	31	6
10 - 25 ha	84	7	7	18	20	2

Tabla 1: Comparación entre MOD14 y las cartografías MODIS con la cartografía Landsat (entre 02-08-2008 y 02-06-2009), con respecto al número de incendios detectados/cartografiados.

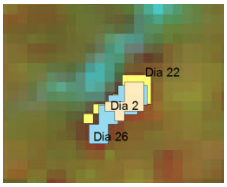


Figura 2: Ejemplo de estudio multitemporal de incendios. Se muestra cómo la cartografía BAIM de la zona quemada concreta se va reduciendo con el tiempo (22 y 26 de marzo y 2 de abril de 2009, respectivamente).

La comparación cartografías MODIS-Landsat se resume en las Tablas 1, 2 y 3, con los incendios Landsat categorizados por tamaños. Se ha añadido también la cartografía MCD45. De la Tabla 1 se deduce que las cartografías BAIM y la NBR son las que detectan mayor número de incendios, seguidas por la NIR y la MCD45. También se observa cómo la proporción de incendios cartografiados va disminuyendo con su tamaño, siendo ya muy baja para los menores de 25 ha. Notar también que los índices BAIM y NBR cartografían más incendios que los detectados por los *hotspots*. En cuanto al porcentaje de superficie quemada cartografiada respecto a la Landsat (Tabla 2), las mejores cartografías son de nuevo las BAIM y NBR. Ambas proporcionan buenos resultados para los incendios mayores de 50 ha, mientras que para los menores subestiman la superficie (para 25-50 ha el acuerdo es de un 60%). En cuanto a la coincidencia espacial (Tabla 3), de nuevo son los índices BAIM y NBR los que generan las mejores cartografías, con un acuerdo del 50% para incendios mayores de 100 ha, el cual va decreciendo con el descenso de tamaño. Notar que el mayor acuerdo que se da con la cartografía MCD45 en las categorías superiores se debe a su sobreestimación del área quemada en esos casos (ver también Tabla 2).

Landsat	Superficie quemada estimada (%)			
Intervalo	NIR	BAIM	NBR	MCD45
> 250 ha	31,75	108,86	**102,06**	145,15
100 - 250 h	42,52	**114,15**	122,95	128,70
50 - 100 ha	22,91	122,99	**86,12**	44,25
25 - 50 ha	1,39	55,60	**62,79**	28,76
10 - 25 ha	11,38	33,61	**45,03**	9,48

Tabla 2: Superficie estimada por las diferentes cartografías MODIS respecto a la Landsat.

Landsat	Coincidencia espacial (%)			
Intervalo	NIR	BAIM	NBR	MCD45
> 250 ha	23,11	**52,19**	38,70	**62,08**
100 - 250 h	26,79	**54,03**	49,56	**64,58**
50 - 100 ha	5,14	**20,10**	18,07	8,31
25 - 50 ha	8,27	**16,89**	16,85	7,85
10 - 25 ha	0,08	**9,37**	6,57	4,75

Tabla 3: Grado de coincidencia espacial de las diferentes cartografías MODIS con la Landsat.

Como ya comentamos, hubo bastantes incendios que dejaron zonas quemadas en las cartografías BAIM y NBR y que no fueron detectados previamente como *hotspots* (Tabla 1). De entre ellos, se analizaron los mayores de 50 ha, encontrándose situaciones diversas en lo que al cumplimiento de los criterios del algoritmo MOD14 se refiere. En la mayoría de los casos, sería necesario bajar el umbral de temperatura del canal 21 (T_{21}) hasta 298 K (310 K en el algoritmo actual) y relajar la diferencia T_{21}-T_{31} a 5 K (10 K en MOD14) para poder detectarlos como incendios lo cual, sin embargo, generaría muchos falsos positivos. En algunos casos sí que se cumple uno de los dos criterios, (por ejemplo, T_{21}-T_{31}>10-15 K pero T_{21}=302-305 K), o bien se está en una situación próxima a ambos (T_{21}>301 K y T_{21}-T_{31}≤10 K). En estos casos, fijar el umbral de T_{21} en 302 K y relajar ligeramente el criterio de T_{21}-T_{31} parece dar buenos resultados, detectándose prácticamente todos los incendios y no apareciendo falsos positivos.

CONCLUSIONES

El producto de anomalías térmicas MOD14 empieza a ser medianamente fiable en Asturias para incendios mayores de 50 ha. Quizá debido a que los incendios son en su mayoría de invierno, su temperatura es, en ocasiones, algo más fría que la fijada como umbral en MOD14. Por ello, la modificación de algunos de sus criterios, así como el uso de umbrales en el SWIR, podría servir para mejorar este algoritmo en Asturias.

Las mejores cartografías MODIS obtenidas, siempre tomando la cartografía Landsat como referencia, son las de los índices BAIM y NBR, tanto respecto al número de incendios cartografiados, como a la superficie quemada estimada (acuerdos del 60% para incendios entre 25-50 ha) y a la coincidencia espacial de los polígonos obtenidos. Entre ambas elegimos el BAIM, ya que su cartografía se puede realizar casi siempre de forma semiautomática. Por otra parte, las cartografías MODIS aportan un valor añadido a la cartografía Landsat, al poder datar los incendios cartografiados con mayor precisión temporal. Los índices BAIM y NBR cartografían más incendios que los detectados por los *hotspots*, debido al uso de bandas de 500 m.

BIBLIOGRAFÍA

GIGLIO, L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C. & KAUFMAN, Y., 2003. *An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS*. Remote Sensing of Environment, 87, 273-282.

GÓMEZ, I. y MARTÍN, M.P., 2008. *Estudio comparativo de índices espectrales para la cartografía de áreas quemadas con imágenes MODIS*. Revista de Teledetección, 29, 15-24.

GONZÁLEZ-ALONSO, F. & MERINO DE MIGUEL, S., 2009. *Integration of AWiFS and MODIS active fire data for burn mapping at regional level using the Burned Area Synergic Algorithm (BASA)*. International Journal of Wildland Fire, 18 (4), 404-414.

LÓPEZ GARCÍA, M.J. & CASELLES, V., 1991. *Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data*. Geocarto International, 1, 31-37.

MARTÍN, M.P., GÓMEZ, I. & CHUVIECO, E., 2005. *Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data*. Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment, pag. 193-198.

RECONDO, C., WOZNIAK, E. y PÉREZ-MORANDEIRA, C. S., 2002. Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el período 1991-2001 a partir de imágenes Landsat-TM. Revista de Teledetección 18: 47-55.

ROY, D.P., JIN, Y., LEWIS, P.E. & JUSTICE, C.O., 2005. *Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data*. Remote Sensing of Environment, 97, 137-162.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto FC-09-IB09-149 ha sido financiado, a través de la FICYT, por el Principado de Asturias. Adán Abajo tiene el contrato PTA2008-1623-I para la antena MODIS.

Seguimiento y monitorización de la recuperación ambiental del territorio afectado por los grandes incendios del noroeste de la Región de Murcia (España)

M. Vicente[1], C. Guillamón[1], P. Hurtado[1] y J. Pecci[2]

[1] D.G. de Patrimonio Natural y Biodiversidad . Servicio de Información e Integración Ambiental (SIGA). Región de Murcia. C/ Catedrático Eugenio Úbeda, nº3, 3ª pl, 30008 (Murcia, España). Tlfn: +34 968 272566; Fax: +34 968 228887. mariano.vicente@carm.es , concepcion.guillamon@carm.es

[2] INDRA Espacio S.A. c/Mar Egeo nº4, Pol. Ind. nº 1, 28138 San Fernando de Henares (Madrid, España). Tel: +34 91 6268835, Fax: 916268890. E-mail: jpecci@indra.es

RESUMEN

La presente comunicación es un resumen de los resultados obtenidos en el trabajo denominado "Seguimiento y monitorización de la recuperación ambiental del territorio afectado por los grandes incendios del noroeste de la Región de Murcia. Evaluación de las actuaciones en las sierras de El Algaidón y de las Herrerías". Este trabajo sirve para monitorizar con técnicas de Observación de la Tierra y SIG los efectos de los citados incendios y de las actuaciones realizadas en la zona en el periodo 1991-2009.

Palabras clave: incendios, regeneración, Landsat, SPOT, PNT

ABSTRACT

The present communication is a summary of the results obtained in the Project named "Monitorisation of the environmentla recovering of the territory affected by the big forest fires of Nothwestern of Murcia Region. Evaluation of the actions over the "El Algaidon" and "Las Herrerías" Hills. This work serves to monitor with Earth Observation and GIS techniques the effects of the named fires and the activities developed in the area along the period 1991-2009.

Keywords: *forests, regeneration, Landsat, SPOT, PNT*

INTRODUCCIÓN

El incendio que tuvo lugar en Moratalla en 1994 devastó una superficie de 27.400 has, afectando a una zona de alto valor ecológico. Hasta la fecha, se puede considerar como el mayor suceso catastrófico sufrido por el medio natural en la historia reciente de la Región de Murcia. Este incendio, junto a las 600 has calcinadas en el incendio de Calasparra de 1991 suponen un 5% de la superficie forestal de la misma. Las consecuencias de estos incendios fueron importantes: reducción de superficie arbolada, pérdida de diversidad biológica, agudización de los fenómenos erosivos en el suelo, pérdidas de rentas complementarias en las familias de la zona (productos del monte y turismo), etc.

Para contribuir a la recuperación de la zona, el gobierno autonómico elaboró el Plan de Restauración de zonas incendiadas de la Comarca del Noroeste de Murcia (REPLANT, 2002). Dentro de ese plan, se enmarcó un ambicioso proyecto que fue seleccionado para su financiación por el I.F.E.E.E. (Instrumento Financiero del Espacio Económico Europeo). El objetivo general de este proyecto era la recuperación medioambiental de diversas zonas incendiadas en el Término Municipal de Moratalla a través del aumento de la viabilidad de la masa forestal y el fortalecimiento de la vegetación frente a posibles amenazas. El proyecto definió la realización de distintos trabajos en esa área, como tratamientos silvícolas, reforestaciones, tratamientos fitosanitarios, correcciones hidrológicas, infraestructuras viarias y de seguridad y salud. Igualmente, contempló la monitorización de las zonas incendiadas para observar el impacto del incendio y su regeneración a lo largo del tiempo mediante técnicas de Teledetección y SIG (Sistemas de Información Geográfica).

Este último trabajo se denominó "Seguimiento y monitorización de la recuperación ambiental del territorio afectado por los grandes incendios del noroeste de la Región de Murcia. Evaluación de las actuaciones en las sierras del Algaidón y de las Herrerías" y fue desarrollado por Indra Espacio. La presente comunicación explica de manera resumida los objetivos y los resultados de este trabajo.

El proyecto en cuestión realiza diversos análisis biofísicos y de usos de suelo anuales sobre 3 áreas geográficas y marcos temporales: estudio de la Región de Murcia con imágenes Landsat desde 1991 hasta 2009; estudio local del área incendiada desde 1991 a 2005 con Landsat y desde 2005 a 2008 con SPOT-5 y un estudio de detalle sobre las Sierras de El Algaidón, la Silla y las Herrerías desde 2005 a 2009 para monitorizar la situación: antes, durante y después de las actuaciones de regeneración. Las imágenes SPOT-5 y Landsat de 2009 utilizadas pertenecen al Plan Nacional de Teledetección (PNT).

A partir de estas imágenes se ha monitorizado la evolución del área incendiada según su grado de afectación y el tipo de actuaciones realizadas sobre ellas. Las conclusiones se han expuesto en forma de mapas, estadísticas y gráficas de evolución en base a usos de suelo, grado de afectación y tipos de labores de regeneración. Finalmente, se han elaborado diferentes indicadores ambientales de regeneración.

DATOS DE PARTIDA

El trabajo se ha dividido en tres fases: estudio regional del periodo 1991 a 2005 con imágenes Landsat, estudio de la zona incendiada con imágenes Landsat y SPOT-5 de 1991 a 2005 y estudio de detalle, de 2005 a 2009 con SPOT-5.

A continuación, se muestra el listado de imágenes utilizadas en este trabajo (Tabla 1).

	Landsat	SPOT
1991	02/04/1991 23/07/1991	
1992	20/04/1992 10/08/1992	
1993	01/01/1993 28/07/1993	
1994	19/12/1994 09/03/1994	
1995	13/04/1995 18/07/1995	
1997	17/03/1997 21/06/1997	
1999	19/02/1999 21/07/1999	
2001	21/04/2001 26/07/2001	
2003	10/03/2003 08/07/2003	
2005	18/01/2005 13/07/2005	20/07/2005
2006		28/08/2006
2008		11/07/2008
2009		08/02/2009 05/10/2009

Tabla 1: Listado de imágenes utilizadas

La D.G. del Patrimonio Natural de la Región de Murcia puso a disposición de los trabajos el material referente a los proyectos de regeneración realizados en el periodo 1991-2010 sobre las zonas incendiadas.

Para poder validar los resultados obtenidos de las imágenes de satélite, se diseñó y realizó un trabajo de campo que obtuvo información del terreno durante y después de los trabajos de regeneración del proyecto REPLANT, en el año 2009.

Igualmente, se contó con una serie de datos meteorológicos obtenidos de dos redes de estaciones meteorológicas: SIAM y AEMET. Estos datos fueron utilizados para comparar los perfiles de evolución de la vegetación con la evolución meteorológica de la zona.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Corrección de las imágenes

Una vez seleccionadas y adquiridas las imágenes se procedió a realizar la cadena de proceso que prepara la imagen para ser analizada espectralmente. En primer lugar se procedió a la ortorrectificación: para ello se utilizó una ortofoto de 0,5 m/pixel y un MDE de 10 m de malla (2008). El RMSE admitido fue, en todos los casos, inferior al tamaño del pixel. A continua-

ción, se procedió a la transformación de los niveles digitales a niveles de radiancia y de reflectividad. Tras ello, se realizaron correcciones atmosféricas (método de COST) y topográficas (Hodgson and Shelley, 1994). Al final de estos procesos, se realizó una normalización de los histogramas de todas las imágenes de un mismo sensor para poder hacer el estudio multitemporal.

Estudio regional (Región de Murcia)

Este área de trabajo implica toda la Región de Murcia (11.300 Km²) y afecta al periodo 1991-2005. En este periodo se estudian 20 imágenes Landsat-5 y 7, según detalla la Tabla 1.

Partiendo de las imágenes tratadas según al apartado anterior y normalizadas entre sí, espectralmente, se han desarrollado los siguientes productos finales:

- Series temporales de índices de vegetación: NDVI, MSAVI, NRB y NDWI;
- Serie temporal de Temperatura de superficie;
- Identificación de incendios forestales del Noroeste de la Región de Murcia.

Una vez, realizada este trabajo, se han editado mapas con las distintas series temporales.

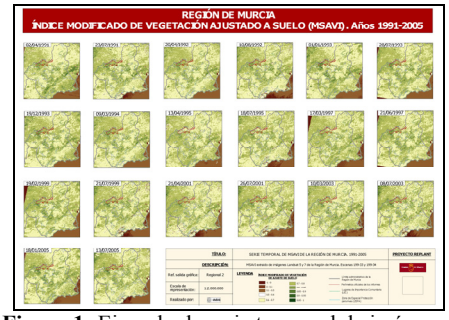


Figura 1: Ejemplo de serie temporal de imágenes MSAVI sobre la Región de Murcia, 1991-2005

Estudio local (zonas incendiadas)

Esta área comprende 1.330 Km^2 y enmarca a los incendios de Moratalla (1994) y Calasparra (1991). En este caso, se ha estudiado la situación de las zonas incendiadas desde 1991 hasta 2008.

Los productos que han sido generados han sido:

- Índices de vegetación SPOT de 2005, 2006 y 2008: NDVI y MSAVI;
- Mapas de usos de suelo de los años: 1991, 1993, 1995 y 2005 y mapas de cambios
- Mapa de grado de afectación del incendio de Moratalla;
- Mapas de combustible de 1991, 1993, 1995 y 2005;
- Estudio de la evolución y los cambios en los índices de vegetación, los usos de suelo y los tipos de combustible.

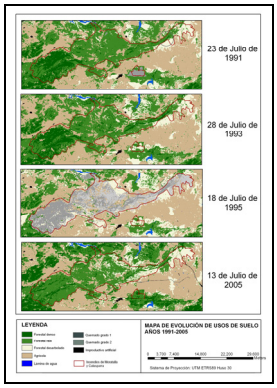


Figura 2: Ejemplo de serie de mapas de usos de suelo obtenidos.

Para la realización de los mapas de usos de suelo se utilizaron imágenes Landsat y SPOT, definiendo una leyenda de 8 clases; estas clases se seleccionaron teniendo en cuenta los Inventarios Forestales Nacionales II y III y las posibilidades de información de las propias imágenes. Las zonas afectadas por los incendios forestales se delimitaron y clasificaron mediante imágenes Landsat en 4 grados de severidad: nula, baja, media y alta. Por su parte, los mapas de combustible se realizaron a partir de los mapas de usos de suelo y teniendo en cuenta la clasificación de Rothermel.

Igualmente, se han estudiado los grados de afectación, según el uso de suelo, el tipo de combustible y el grado de recuperación a lo largo de las fechas de estudio.

Estudio de detalle (Actuaciones REPLANT)

En este ámbito se han estudiado 70.2 km^2 que envuelven las actuaciones REPLANT realizadas sobre diversas zonas incendiadas de las sierras de Las Herrerías, La Silla y El Algaidón en el año 2009.

El proyecto de regeneración de esta zona definió una serie de rodales según tipo de vegetación que contenía y una serie de actuaciones selvícolas en cada uno de ellos. La Teledetección ha permitido hacer un seguimiento de las actua-

ciones en cada uno de esos rodales y ver los efectos de esas actuaciones. Estos efectos se han observado en términos:

- Análisis de los efectos de las actuaciones que podían observarse con Teledetección
- Índices de vegetación: NDVI, MSAVI,
- Evolución del uso de suelo según el grado de afectación en el incendio
- Mapa de combustible.
- Análisis de las zonas adyacentes a los rodales tratados, esto ha servido de "blanco" en el estudio comparativo.

Se ha estudiado la evolución de los parámetros anteriores en los distintos rodales de actuación antes y después del tratamiento recibido.

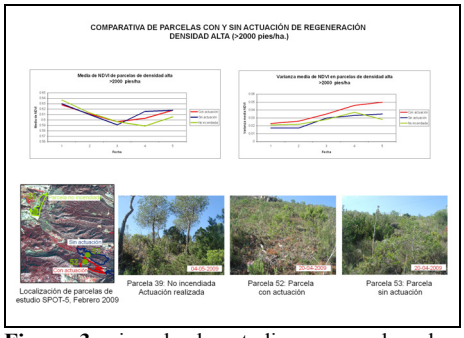


Figura 3: ejemplo de estudio comparado sobre zona de actuación

CONCLUSIONES

El completo estudio realizado ha permitido poner a punto una metodología de análisis de regeneración de zonas incendiadas: definición de productos idóneos, metodología de obtención, definición de indicadores y parámetros de estudio, análisis estadísticos comparativos, etc. Por ello, esta metodología está puesta a punto para continuar los estudios en el futuro y ser aplicados a otras áreas.

Son numerosas las conclusiones a las que se han llegado, dado el alto número de análisis realizados; sin embargo, a continuación, se exponen algunas de estas conclusiones a modo de ejemplo.

Se ha concluido que la regeneración experimentada en el área incendiada, desde la fecha de los incendios hasta Julio de 2005 y en términos de biomasa verde media ha estado entre el 82 y el 92 % para Calasparra y entre el 63 y el 77% para Moratalla.

Por otro lado, el incendio de Moratalla afectó al 99 % del área clasificada como "Forestal denso" y en 2005 ya se había recuperado un 35% del área de esta clase forestal. Por su parte, el área "Forestal desarbolada y matorral" duplicó su superficie en 2005, respecto a la fecha inmediatamente anterior al incendio.

Además, al estudiar la regeneración, observamos cómo en 2005, el 17% del área quemada de alta intensidad (o severidad) se transformó en "Forestal Arbolado Denso", mientras que más del 75% se transformó en "Forestal arbolado de media densidad".

En lo que respecta al análisis de detalle en las zonas con actuación en 2009, se concluye que, utilizando imágenes SPOT-5 es posible determinar en qué ventana temporal se realizaron las labores silvícolas, en qué zonas exactas y cómo afectaron a la vegetación.

BIBLIOGRAFÍA

DAVID RIAÑO ET AL 2003: *Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types*. IEEE transactions on Geoscience and remote sensing, vol. 41, nº5.

HODGSON, M.E., AND SHELLEY, B.M., 1994.: *Removing the Topographic Effect in Remotely Sensed Imagery*. ERDAS Monitor 6(1)4-6.

MAHMOUD EL HAJJ ET AL. 2008: *Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series*. Sensors, 8, 2774-2791.

J. SCOTT AND R. BURGAN. 2005. *Standard Fire Behavior Fuel Models: A comprehensive set for use with Rothermel´s surface fire spread model*. United States Department of Agriculture.

MEDIO AMBIENTE, RECURSOS HÍDRICOS, EDAFOLOGÍA Y GEOLOGÍA

Utilización de técnicas de teledetección para el seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid

L. Albizua [1], I. Barinagarrementeria [1] y J.C. Ibañez[2]

[1] TRACASA. Cabárceno 6, 31621 Sarriguren (Navarra), Tel: 948289000, Fax: 948 249209.
Correo electrónico: lalbizua @tracasa.es

[2] CYII. José Abascal 10, 28003 MADRID, Tel: 91541259. E-mail: jci@cyii.es

RESUMEN

Este trabajo presenta la puesta a punto de una metodología operativa para la definición y elaboración de una base de datos cartográfica para la Comunidad de Madrid y la realización de actualizaciones periódicas, a partir de imágenes del satélite SPOT5. En esta base de datos queda reflejada la evolución temporal de las zonas urbanizadas como consecuencia de la consolidación de los Planes de Desarrollo Urbano de los municipios, así como el estado y evolución de zonas verdes urbanas. La información resultante se ha incorporado en el Sistema de Información Geográfica de Canal de Isabel II y servirá de base para la elaboración y actualización de los Planes de desarrollo de infraestructuras estratégicas de abastecimiento, que deben dar respuesta anticipada a las futuras demandas de agua ocasionadas por el proceso de expansión urbana en la Comunidad de Madrid.

Palabras clave: Planes urbanísticos, Cambios urbanos, Demanda de agua, Teledetección.

ABSTRACT

This work presents the development of an operative methodology, in order to define and elaborate a cartographic database in the Community of Madrid, which involves periodical updates, based on SPOT5 satellite imagery. This database should reflect the evolution of the urbanized areas as a result of the Urban Development Plannings' consolidation in all municipalities, as well as the evolution and state of the green urban areas. Resulting information has been integrated on the Canal de Isabel II's Geographical Information System and is intended to be the basis for the development and updating of the strategical supply infrastructure development plan that should anticipate to future water demands caused by urban expanding in the Community of Madrid.

Keywords: *Urban planning, Urban changes, Water supply demands, Remote sensing.*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y ordenación del territorio en las ciudades tiene como consecuencia un incremento y redistribución geográfica de la demanda de agua. Estos cambios se producen cada vez con mayor dinamismo y el Canal de Isabel II (CYII), como entidad responsable del abastecimiento de agua en la Comunidad de Madrid, debe programar con antelación suficiente las inversiones necesarias para disponer las infraestructuras que aseguren las condiciones del servicio.

Las predicciones de evolución de las demandas, tanto en su cuantía como en su distribución territorial, tienen como principal referente las expectativas de crecimiento vinculadas al desarrollo del planeamiento urbano municipal (Cubillo, 2005). La velocidad a la que se produzca la consolidación del suelo urbano es determinante en los plazos requeridos para la construcción y puesta en servicio de las nuevas infraestructuras.

El proyecto que aquí se presenta tiene como objeto acotar la incertidumbre existente en cuanto a los plazos reales de consolidación de las previsiones de expansión urbana contenidas en los planes urbanísticos municipales.

Los satélites de observación de la Tierra y las técnicas más avanzadas de Teledetección y SIG se han propuesto como herramientas para el seguimiento periódico de la consolidación urbanística en la Comunidad de Madrid. Estas técnicas también se han mostrado útiles para la detección y cuantificación de las zonas verdes urbanas, que en la actualidad suponen un ele-

mento importante de la demanda de agua (Beamonte *et al.*, 2010).

El proyecto se ha concretado en la puesta a punto de una metodología operativa para la definición y elaboración de una base de datos cartográfica del ámbito geográfico de la Comunidad de Madrid y la realización de actualizaciones periódicas, a partir de imágenes de satélite. En esta base de datos queda reflejada la evolución temporal de las zonas urbanizadas de la región, así como el estado y evolución de zonas verdes urbanas.

AREA DE ESTUDIO

El ámbito territorial de estudio cubre la totalidad de la Comunidad de Madrid, con una superficie de 8.021,80 km².

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para el presente proyecto contempla las siguientes fases:

Recopilación y análisis de la información disponible

La información más relevante utilizada en el proyecto consiste en:

- Información de referencia: 1) Ortofotografía digital a escala 1:5.000 del vuelo 2006 de toda la Comunidad de Madrid; 2) Modelo Digital del Terreno 25m procedente del IGN.

- Información auxiliar: 1) Cartografía digital de catastro urbano actualizada en 2009; 2) Planeamiento urbanístico vigente 2009 y en tramitación en formato digital; 3) Mapa SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo Español) de la Comunidad de Madrid año de referencia 2005 a escala 1:25.000; 4) Ortoimagen SPOT5 2005 del PNT; 5) Base de datos cartográfica de zonas verdes y usos de agua en exterior actualizada con el vuelo fotogramétrico de 2006.

Programación y Adquisición de las imágenes de satélite

Se han adquirido 4 coberturas SPOT5 en modo multiespectral 10m y pancromático 2.5m sobre la Comunidad de Madrid (verano 2008, verano 2009, primavera 2010 y verano 2010).

Diseño de la base de datos cartográfica

El diseño de la base de datos queda definido por la leyenda de monitorización de cambios que responde a la capacidad de discriminación de las imágenes SPOT5 en las categorías de interés. La base de datos cartográfica diseñada consta de las siguientes 6 capas:

- Estratos o zonas de comportamiento homogéneo, constituido por suelo consolidado, suelo en proceso de consolidación, agrícola de secano y de regadío, forestal y otros
- Ámbito urbano: zonas con un grado de consolidación homogéneo, dentro del estrato suelo en proceso de consolidación (urbanizando, urbanizado, edificando edificado) (Figura 1)
- Recinto urbano: elementos de mayor detalle dentro los ámbitos urbanos y de la base de datos cartográfica (edificio, suelo pendiente de ejecución, vial asfaltado y vial no asfaltado)
- Subestrato (verde): vegetación que inunda los estratos suelo consolidado y suelo en proceso de consolidación
- Ámbito verde: campos de golf y jardines
- Recinto verde: árbol y césped



Figura 1: Ámbitos urbanos

Proceso de imágenes

La metodología elaborada para el proyecto se estructura en las siguientes fases:

1. Procesado básico de imágenes: integra los siguientes tratamientos previos: control de calidad, ortorrectificación, correcciones atmosféricas y radiométricas, fusión (González-Audicana *et al.*, 2006), mosaico.

2. Procesos específicos de seguimiento urbano, orientados a la identificación y clasificación de los recintos urbanos para su posterior integración en la base de datos, incluye:
- Estratificación, delimitación de zonas con un comportamiento urbano y de ocupación del suelo homogéneo, a partir de la actualización y adaptación temática del Mapa SIOSE (2005).

- Segmentación de imágenes: identificación de recintos urbanos para su posterior clasificación. Se distinguen dos actuaciones diferentes según la disponibilidad de catastro.
- Clasificación orientada a objetos (Miller *et al.*, 2009): técnica avanzada de clasificación que tiene en cuenta la forma, textura y propiedades espectrales de los objetos que integran la imagen. (Figura 2)
- Detección de cambios para la actualización y delimitación de estratos, localización de nuevos ámbitos urbanos, y actualización de recintos urbanos en ámbitos que se procesan en años posteriores (Albizua *et al.*, 2005).

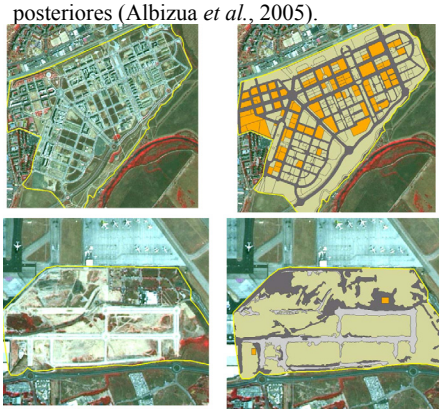


Figura 2: Ejemplos de Clasificación orientada a objetos con catastro adecuado (*imagen superior*) y no adecuado (*imagen inferior*), sobre imagen SPOT5 fusionada 2.5m.

3. Procesos específicos de la delimitación de la zona verde, que engloba las zonas verdes urbanas, agrícolas y naturales. Incluye: el cálculo del NDVI (índice de vegetación normalizado), delimitación de la superficie verde mediante el NDVI, definición de umbrales de actividad vegetativa para cada estrato, y segmentación y clasificación de recintos de árbol y césped dentro del subestrato verde (Leránoz *et al.*, 2008).

4. Verificación de metodología con Quickbird. Para cada periodo de actualización se adquiere y procesa sobre una zona piloto una imagen Quickbird. La comparación de los resultados SPOT5 frente a los obtenidos con Quickbird avalan la metodología desarrollada.

Estimación de la demanda de agua

La estimación de la demanda de agua en zonas verdes se calcula en términos de necesidad de riego (NRmes) a partir de la Ecuación 1:

$$NR_{mes} \equiv \frac{ET_{C(mes)} - P_{mes}}{EficienciaRiego} \quad (1)$$

En donde P_{mes} es la precipitación acumulada mensual y $ET_{C(mes)}$ es la evapotranspiración mensual de la zona verde y se estima a partir de la Evapotranspiración de referencia ET_o calculada con datos de estaciones agroclimáticas y corregido por un factor Kc (FAO, 2004). Las necesidades anuales se estiman a partir de las necesidades de riego mensuales sobre las zonas verdes de césped y árbol.

Respecto a la demanda de agua urbana, la identificación de nuevas zonas urbanas en proceso de consolidación y la evaluación de la superficie edificada en relación con la prevista en los planes urbanísticos permitirá una estimación más precisa de la aparición de nuevas demandas, su distribución geográfica y velocidad de consolidación.

RESULTADOS

Los resultados del proyecto incluyen: el diseño, generación y actualización de la Base de datos cartográfica (Geodatabase), su explotación y la estimación de la demanda de agua.

Los resultados e información del proyecto se han integrado en el SIG corporativo del CYII donde se generan informes, mapas temáticos, etc, y se relaciona con la información de sus infraestructuras.

Los mapas temáticos por municipio recogen el histórico de cambios cartográficos y numéricos producidos durante el proyecto (Figura 3).

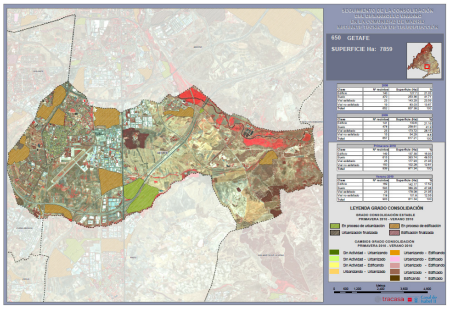


Figura 3: Mapa temático de Getafe

El cruce de la Geodatabase cartográfica de todas las actualizaciones con el planeamiento vigente permite realizar el seguimiento del grado de ejecución del desarrollo urbano. El resultado

del cruce se proporciona en una base de datos que resume para cada sector de planeamiento y para cada municipio la evolución histórica de la superficie clasificada de edificio, suelo, vial asfaltado y vial no asfaltado.

CONCLUSIONES

La metodología expuesta se muestra efectiva para un seguimiento sistemático de la ejecución del desarrollo urbano, y una prognosis de la evolución la demanda de agua en el corto y medio plazo.

Las técnicas de teledetección utilizadas, en particular el cálculo de índices de vegetación sirven para una evaluación actualizada de la utilización de agua en usos de exterior, de gran utilidad para la planificación de actuaciones en materia de suministro de agua regenerada.

Las imágenes SPOT5, de alta resolución, dada su viabilidad de adquisición de una cobertura de la Comunidad de Madrid en breve plazo (un mes en la época estival) parecen las más apropiadas para los objetivos establecidos. La comparación de los resultados con los obtenidos con imágenes de mayor resolución (Quickbird) muestra que la precisión alcanzada es adecuada para el objeto del trabajo.

La gran relevancia de la utilización del SIOSE como apoyo para la delimitación e identificación del estrato en proceso de consolidación. Así mismo, el disponer del catastro lo más actualizado posible, resulta fundamental como base en los procesos de segmentación y clasificaciones de recintos urbanos, dentro del diseño y ejecución de la metodología planteada.

La presentación de resultados en formato de Geodatabase, proporciona una enorme potencialidad desde el punto de vista gráfico y numérico. Esta información incorporada en el Sistema de Información Geográfica de CYII, servirá de base para la elaboración y actualización de los Planes de desarrollo de infraestructuras estratégicas de abastecimiento y para la utilización por las distintas áreas responsables de la planificación.

BIBLIOGRAFÍA

ALBIZUA, LERÁNOZ, ZALBA, (2005): *Seguimiento detallado de los cambios urbanísticos que se producen en el termino municipal de Madrid*, publicado XI Congreso Nacional de Teledetección, pp. 241-244.

FAO *Irrigation and Drainage Papers: (2004) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements.*

BEAMONTE GARCÍA, C.; PIMENTEL CONDE, J.; GÓMEZ CRISTÓBAL, M.; HERRERO DE ANDRÉS, G.; FERNÁNDEZ ANTÓN, N. (2010) *Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid.* Canal de Isabel II, Cuadernos de I+D+i Nº 11.

CUBILLO GONZÁLEZ, F. (2005) *Desarrollo urbano y planificación de infraestructuras y demandas.*http://grupo.us.es/ciberico/ archivos_acrobat/ sevilla1cubillo.pdf.

GONZALEZ-AUDICANA, M.; OTAZU, X.; FORS, O.; ALVAREZ-MOZOS, J. (2006): *A low computational-cost method to fuse IKONOS images using the spectral response function of its sensors.* IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 44, no. 6, June 2006, pp.1683-1691.

LERÁNOZ; ALBIZUA; ZALBA (2008): *Seguimiento de las medidas de ahorro de agua mediante técnicas de Teledetección y Gis en la provincia de Málaga*. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica.

MILLER, JENNIFER ELIZABETH, NELSON, STACY A. C. AND HESS, GEORGE R. (2009): *An Object Extraction Approach for Impervious Surface Classification with Very-High-Resolution Imagery*. The Professional Geographer, Vol 61:2, pp:250-264.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Geográfico Nacional por proporcionarnos el mapa SIOSE de la Comunidad de Madrid y la cobertura SPOT5 de 2008 del Plan Nacional de Teledetección.

Utilización de modelos tridimensionales del terreno en el análisis de la contaminación ambiental mediante métodos numéricos computacionales

C. Allende[1] y S. Torno[2]

[1] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: callende@uniovi.es

[2] Área de Explotación de Minas. Universidad de Oviedo. Escuela Superior de Ingenieros de Minas. C/ Independencia, 13. 33004 Oviedo (Asturias, España). Correo electrónico: tornosusana@uniovi.es

RESUMEN

Los vertederos son la forma más simple y más común de eliminación de residuos, aunque introducen grandes cantidades de contaminantes en el medio ambiente a través de polvo, gas, sustancias solubles e insolubles. Para el análisis de los fenómenos de dispersión de estos contaminantes, se utilizan modelos de simulación basados en dinámica de fluidos computacional (CFD3D) en los que el modelo digital de la superficie del vertedero y la malla tridimensional del dominio son elementos esenciales. Los Modelos Digitales utilizados hasta ahora, provienen de una interpolación de puntos singulares extraídos de una cartografía derivada que proporcionan una información somera de la definición geométrica del vertedero. En este artículo, se propone un procedimiento de obtención del Modelo Digital del Terreno a partir de una información directa y real obtenida mediante tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging). A partir de esta información, se identificarán y extraerán las primitivas geométricas que definen la geometría del vertedero y se exportará al software Ansys CFX® 10.0 para el modelado y simulación de emisiones contaminantes.

Palabras clave: LIDAR, MDT, CFD, Contaminación ambiental, Vertedero

ABSTRACT

Landfills are the simplest and most common way to eliminate urban solid waste; however they introduce large amounts of pollutants into the environment via dust, gas, as well as soluble and insoluble substances. The digital model of the landfill surface and the three-dimensional meshing of the domain, where the dispersion phenomena will be analyzed, are essential when modelling polluter emission simulation using computational numerical models (CFD3D). The commonly used Digital Surface Models are generated by combining a set of geometric primitives. These are obtained through a process of scanning, which identifies a set of points that geometrically define the landfill from the derived cartography. In this work, we propose a procedure to derive digital models of a real surface from a data point cloud obtained through LIDAR (Light Detection and Ranging) technology to identify, in real-time, the main geometry defining its surface. Thereof, these landfill digital models will be exported into the Ansys CFX 10.0® software for numerical modelling, and dust and odors (generated by the landfill) emission simulation will be analysed.

Keywords: *Lidar, MDT, CFD,, enrironmental pollution, landfill*

INTRODUCCIÓN

Existen estudios cuyo objetivo es la investigación de los impactos ambientales que supone la modificación morfológica de los vertederos, las características de su cobertura superficial y las características orográficas del entorno (Nolasco, D., 2008). Estos estudios se realizan con métodos de simulación numérica basados en dinámica de fluidos computacional en 3 y 4 dimensiones para estudiar la dinámica atmosférica con modelos virtuales (Toraño, J., 2009). Se utilizan en el proceso de diagnóstico ambiental del vertedero, estudiando la relación existente entre el punto de vertido y el entorno más inmediato y para lo cual seleccionan una serie de variables ambientales con el fin de cuantificar el impacto que generan los vertederos desde distintos puntos de vista.

Estos modelos de contaminación basados en la dinámica de fluidos computacional o CFD, son técnicas innovadoras que permiten conocer el comportamiento de los distintos procesos de contaminación atmosférica debido a la dispersión de partículas de polvo, gases y olores. La generación de este modelo consta de tres fases diferenciadas: definición de la geometría del vertedero, mallado tridimensional del dominio computacional y resolución del modelo, que incluye a su vez las fases de planteamiento y resolución del problema, así como la muestra y representación de los resultados (Torno, S., 2010).

La metodología de obtención de modelos geométricos utilizados hasta hora en estos modelos de contaminación, se muestra esquematizada en la figura 1. Estos modelos provienen de la combinación de primitivas que se obtienen a partir de la digitalización de un conjunto de puntos que las definen geométricamente a partir de una documentación cartográfica tomada como referencia (Allende, C., 2010).



Figura 1: Esquema del proceso

El objetivo de este trabajo consiste en plantear la forma de trabajar con modelos digitales de terreno reales obtenidos mediante la adquisición de información tridimensional directa utilizando técnicas de escaneado tridimensional, las cuales nos permitirán reducir considerablemente el número de procesos y aumentar con ello la precisión del modelo geométrico final.

El escaneado tridimensional se ha llevado a cabo utilizando la tecnología de adquisición de datos LIDAR (Light Detection and Ranging), tecnología que proporciona una representación fiable y exacta, aunque irregular, de los escenarios terrestres a partir de una nube de puntos de coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) mediante el uso de un sensor instalado en una plataforma aerotransportada (Mallet, C., 2009). Al tratarse de una representación irregular, es preciso realizar un procesado de estos datos con el fin de obtener un modelo regular y simplificado del vertedero (Torno, S., 2011).

ESCANEADO TRIDIMENSIONAL

El vertedero objeto de estudio se localiza en las inmediaciones de la franja costera del Principado de Asturias (España), a orillas de la Autovía del Cantábrico a su paso por el término municipal de Cudillero. (Figura 2).

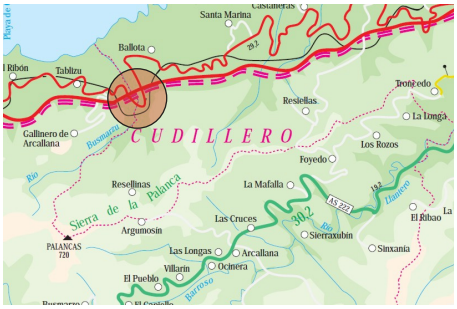


Figura 2: Localización del vertedero

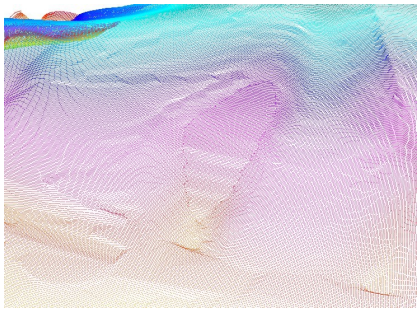


Figura 3: Nube de puntos tridimensional

Las técnicas de escaneado tridimensional son tecnologías láser que nos permiten obtener información tridimensional de objetos mediante la determinación de la distancia entre el emisor láser y el objeto. Como resultado, dispondremos de una nube de puntos con coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) que representa el objeto virtual idéntico al real en geometría y que se puede utilizar en procesos de simulación, diseño y fabricación. En la figura 3, se muestra la nube de puntos correspondiente a la zona del vertedero.

PROCESADO DE DATOS

En la simulación computacional es necesario disponer de un modelo digital, es decir, una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades teniendo como objetivo primordial su estudio de manera simple y comprensible. El objeto original

es representado por otro objeto de menor complejidad con el que se podrán conocer o predecir las propiedades del primero.

Con este fin, a partir de esta nube de puntos se identifican aquellas primitivas geométricas lineales o líneas de rotura que delimitarán, por un lado, los planos de talud y bermas que conforman la geometría del vertedero y por otro, el propio límite del vertedero con el terreno natural. Este procesado de datos se realiza con el software Trimble RealWorks Survey Office®.

Una vez identificadas las líneas de rotura, éstas nos servirán de apoyo para la segmentación de primitivas planas acotando el conjunto de puntos que pertenecerá a cada plano. Este proceso de segmentación de planos, se realizará mediante determinación estadística por mínimos cuadrados obteniendo como válido aquel que minimice las distancias existentes a cada punto.

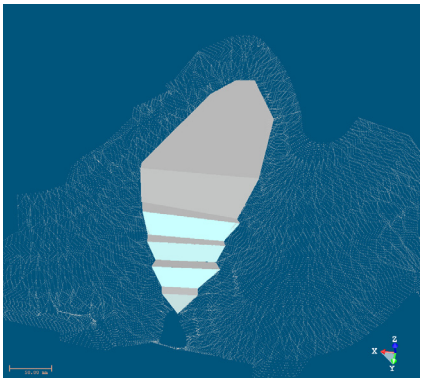


Figura 4: Geometría simplificada del vertedero

En el caso de que los resultados estadísticos que definen el plano no sean válidos o difirieran de un límite o umbral preestablecido, se puede proceder a realizar subconjuntos de puntos que definan planos más pequeños y que se adapten mejor a la geometría real del modelo. De esta forma, se generarán primitivas geométricas adaptadas al terreno en función de la precisión requerida. Por último, se aplica este proceso a todo el conjunto de grupos de puntos con el fin de determinar el modelo geométrico simplificado de la geometría del vertedero. Los resultados se muestran en la figura 4.

SIMULACIONES COMPUTACIONALES

La geometría simplificada del vertedero se utiliza para generar el mallado necesario para la simulación computacional. Este proceso, implica el establecimiento de un domino limitado en su parte inferior por el modelo geométrico del vertedero y en su parte superior y laterales por el volumen de aire considerado en el estudio. La zona límite entre el modelo geométrico y el resto del dominio se denomina zona límite o frontera y en ella el mallado tridimensional ha de ser más preciso.

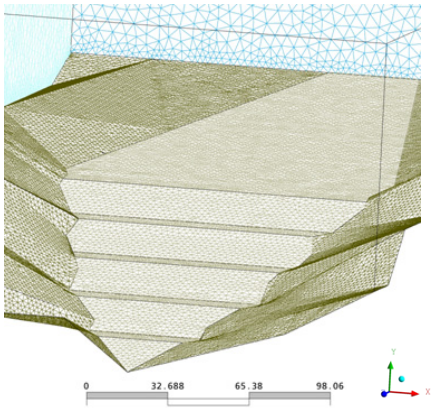


Figura 5: Mallado del modelo del vertedero.

Para la generación de este mallado, utilizamos el software Icem CFD®, el cual realiza el mallado a partir de un conjunto de aproximadamente 765 tetraedros. En la figura 5 se muestra el mallado de la geometría y del volumen total de aire del modelo con un mallado más fino en la zona fronteriza. Los datos del mallado se exportan al software Ansys CFX-10.0®, donde se definirán físicamente las simulaciones. Este software se basa en la dinámica de fluidos computacional (CFD) para simular el flujo de viento en el modelo y actúa resolviendo un conjunto de ecuaciones diferenciales en las que intervienen un serie de componentes como las características de los materiales del vertedero (viscosidad, densidad, conductividad), y condiciones atmosféricas (temperatura, tiempo, velocidad del viento, etc…).

En la figura 6 se muestra el resultado de la modelización, la distribución de las velocidades medias de viento sobre la superficie del vertedero y las colinas circundantes.

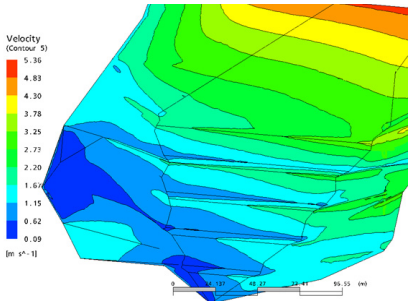


Figura 6: Distribución de la velocidad media de viento en la zona del vertedero

Se pueden ver zonas con colores más claros (rojos) que corresponden a aquellas zonas con mayor velocidad, mientras que aparecen zonas con colores más oscuros (azules), que corresponden a zonas de menor velocidad o velocidad nula.

Estos modelos necesitan ser validados con datos reales para determinar que la distribución de la velocidad sobre la superficie del vertedero coincide con lo que ocurre en la realidad. Para ello, se realizaron una serie de campañas de medidas en el vertedero objeto de estudio. Estos datos experimentales se comparan con los obtenidos por las simulaciones CFD (para los mismos puntos de muestreo), obteniéndose una correlación de 0,94, correspondiendo a la ecuación y= 0,8495x+0,2321 (figura 7).

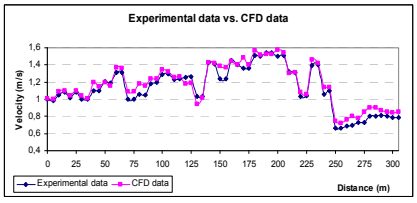


Figura 7: Comparación entre los datos experimentales y los de CFD.

CONCLUSIONES

Las modelizaciones de la contaminación ambiental generadas por el paquete de software CFD3D®, nos permite analizar el comportamiento del viento al pasar por el vertedero y el efecto de dicho viento al arrastrar los elementos contaminantes, ya sean polvo ó gases. La aplicación de la técnica LIDAR (Light Detection and Ranging) y el procesado de datos con el software RealWorks® de la casa Trimble para la definición real de la geometría del modelo, nos permite mejorar la precisión de los resultados obtenidos, evitando así el uso de sistemas de dibujo simplificados en exceso.

BIBLIOGRAFÍA

NOLASCO, D., LIMA, R. N., HERNÁNDEZ, P. A., PÉREZ, N. M., 2008. *Non-Controlled Biogenic Emissions to the Atmosphere from Lazareto Landfill, Tenerife, Canary Islands*. Environmental Science and Pollution Research, Volume 15, No. 1, 51-60, Enero de 2008

TORAÑO, J., TORNO, S., DIEGO, I., MENÉDEZ, M., GENT, M.R., 2009. *Dust emission calculations in open storage piles protected by means of barriers and CFD and Experimental test.* Environmental Fluid Mechanics. ISSN: 1567-7419.

TORNO, S., RODRIGUEZ, R., ALLENDE, C., TORAÑO, J., 2010. *Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modeling.* WIR Transaction Ecology and the environment . 136: 121-128.

ALLENDE, C., 2010. *Evaluación de la Contaminación Ambiental por polvo de zonas destinadas a vertederos y escombreras, utilizando modelos tridimensionales reales obtenidos mediante Técnicas Cartográficas y Modelos Computacionales.* Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Febrero 2010.

MALLET, C., BRETAR, F., 2009. *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 1-16 (2009).

TORNO, S., TORAÑO, J., MENÉNDEZ, m., GENT, M., ALLENDE, C., 2011. *Prediction of particulate air pollution from a landfill site using CFD and LIDAR techniques.* Environmental Fluid Mechanincs, 2011. 11:99-112.

Validación de índices espectrales para detectar salinidad edáfica en cebada mediante sensores electromagnéticos terrestres

E. Amezketa[1], V. Urdánoz[1], I. Barinagarrementeria[1], L. Albizua[1], Y. Berkane[2], C. Portero[2] y M.A. Casterad[2]

[1] TRACASA. C/ Cabárceno, 6. 31621 Sarriguren (Navarra, España), eamezketa@tracasa.es

[2] Unidad de Suelos y Riegos (asociada a EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Avda. Montañana, 930. 50059 (Zaragoza, España), acasterad@aragon.es

RESUMEN

La salinidad edáfica es un grave problema que reduce la calidad de los suelos y la producción agrícola. Para identificar áreas salinas a gran escala, la teledetección puede ser una herramienta prometedora aunque requiere calibración y validación. Este trabajo explora las posibilidades de varios índices espectrales derivados de imágenes Landsat 5 y 7 para identificar áreas salinas en parcelas con cebada. Su validación se realiza con cartografía de salinidad (conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada, CEe) utilizada como verdad terreno, obtenida a partir de sensores electromagnéticos móviles georreferenciados (SEMG). Para ello, se pone a punto una metodología para comparar en cada parcela los índices espectrales con la CEe. Se han encontrado correlaciones significativas y negativas entre la CEe y los índices NDVI, EVI y ASTER, y correlaciones significativas y positivas entre CEe y SI. Se ha seleccionado el NDVI como índice más apropiado para caracterizar la salinidad en parcelas de cebada, ya que, además de ser uno de los que más y mejor correlacionan con la CEe, tiene fácil interpretación y es el más utilizado en bibliografía.

Palabras clave: salinidad del suelo, CEe, Landsat, índices espectrales, NDVI, EVI, ASTER, SI.

ABSTRACT

Soil salinity is a severe problem reducing soil quality and agricultural production. Remote sensing has been shown as a promising tool for identifying soil salinity at big scales, even though it requires calibration and validation. This work explores the possibilities of several spectral indices derived from Landsat 5 and 7 images for identifying salt-affected areas in barley fields. Their validation is made with soil salinity mapping (mapping of electrical conductivity of the soil saturation extract, ECe), used as ground truth, and obtained with mobile and georeferenced electromagnetic sensors. For that, a methodology is set up to compare, at each parcel, the spectral indices with ECe. Significant and negative correlations have been found between soil salinity (ECe) and NDVI, EVI and ASTER indices, and significant and positive correlations between ECe and SI. NDVI has been selected as the most appropriate index for characterizing soil salinity in barley fields, because, besides being one of the most and best correlated with ECe, it is easy to interpret and is the most used in the literature.

Keywords: *soil salinity, ECe, remote sensing, Landsat, spectral indices, NDVI, EVI, ASTER, SI.*

INTRODUCCIÓN

La salinidad/salinización edáfica es uno de los procesos degradadores del suelo que conlleva pérdida en la producción agrícola y reducción en la gama de cultivos viables. Su control pasa por la identificación de las áreas afectadas y las vulnerables. Este tipo de inventario, para grandes superficies, requiere tecnologías y metodologías efectivas y abordables. La teledetección se presenta como una herramienta prometedora, aunque requiere calibración y validación. Los sensores electromagnéticos terrestres en combinación con muestreo y análisis de suelos permiten obtener la "verdad-terreno" necesaria para su validación.

En este trabajo se exploran las posibilidades de varios índices espectrales derivados de imágenes Landsat 5 y 7 para identificar áreas salinas en parcelas cultivadas con cebada y se utilizan sensores electromagnéticos móviles georreferenciados (SEMG) para su validación. Los objetivos específicos son (1) presentar una metodología para obtener mediante el SEMG

cartografía (verdad terreno) de salinidad edáfica (CEe) combinable con información de Landsat, (2) establecer las relaciones entre índices derivados de imágenes Landsat y la salinidad (CEe) y seleccionar el mas apropiado, y (3) establecer fechas óptimas para la detección y seguimiento con imágenes de satélite de la salinidad edáfica en parcelas de cebada.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

El trabajo se ha desarrollado en 9 parcelas de cebada con superficies de 4,6 a 45,3 ha y con distinto grado de afección por salinidad, desde parcelas no salinas (CEe < 4 dS m^{-1}) a parcelas con superficie fuertemente salina (CEe ≥ 16 dS m^{-1}). Cinco parcelas están en secanos de Navarra (SEC-1 a 5) y cuatro en regadíos de Aragón (Huesca; REG-1 a 4).

Índices espectrales

Los 4 índices espectrales analizados para detectar salinidad en cebada (Tabla 1) se han calculado para una serie de imágenes Landsat 5 y 7 (escenas 200/30 y 200/31 para Navarra y 199/031 para Aragón), una vez corregidas geométrica y radiométricamente y remuestreadas a píxel de 25m × 25m. Dichas imágenes recogen la variabilidad fenológica de la cebada al corresponder al período enero-julio 2009: 21 de enero, 25 de marzo, 18 de abril (la parcela SEC-5 no tiene información para esta fecha), 28 de mayo, 13 y 29 de junio para Navarra; y 14 de febrero, 18 de marzo, 19 de abril, 5 de mayo, 22 de junio y 24 de julio para Aragón.

$NDVI=\frac{TM4-TM3}{TM4+TM3}$ Rousse et al., 1974
$SI=\sqrt{(TM2^2+TM3^2}$ Douaoui et al., 2006
$ASTER=\frac{TM5-TM7}{TM5+TM7}$ Al-Khaier, 2003
$EVI=\frac{2.5\times(TM4-TM3)}{TM4+6\times TM3-7.5\times TM1+1}$ Huete et al. 1999

Tabla 1: Formulación y referencia bibliográfica de los índices espectrales estudiados.

Mapas de salinidad (CEe)

Se han elaborado mapas de salinidad (CEe, dS m^{-1}) de las parcelas utilizando el SEMG según Amezketa et al. (2007), con marcos de lecturas de 15-20m × 2-10m. La bobina transmisora del SEMG genera un campo magnético primario, que en función de la capacidad conductora del suelo induce un campo magnético secundario que es detectado por la bobina receptora. Estos campos magnéticos son convertidos a valores de conductividad eléctrica aparente (CEa), que mediante calibración con muestras de suelo recolectadas y analizadas en laboratorio, reflejan la salinidad del suelo (CEe). La interpolación de los datos puntuales de salinidad se ha realizado, mediante krigeado ordinario, a malla de 5m × 5m. Para poder combinar estos mapas con los índices de vegetación derivados de Landsat (obtenidos para píxel de 25m × 25m), para cada píxel de 25m × 25m se ha determinado el valor promedio de CEe de las 25 retículas de 5m × 5m incluidas en él. Se obtiene así un mapa ráster de salinidad con resolución de 25m × 25m, combinable con los mapas de índices espectrales. La distribución de salinidad en fases salinas se puede consultar en Casterad et al. (2011).

Validación y selección de índices espectrales para identificar salinidad

La validación de los índices espectrales para identificar salinidad se ha realizado mediante análisis de correlación lineal entre dichos índices y la CEe. Para ello, se han comparado los mapas de salinidad y de índices espectrales a nivel de píxeles de 25m × 25m. Para cada parcela y fecha se ha establecido la correlación entre cada índice y la CEe. En el análisis se han excluido los píxeles de borde de las parcelas dado que su respuesta espectral suele corresponder a dos o más cubiertas diferentes.

Las fechas óptimas para la detección de salinidad edáfica en cebada se han establecido identificando las fechas en las que se presentan las mejores correlaciones entre índices y CEe.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra, como ejemplo, la cartografía obtenida (ráster de 25 m de píxel), para una parcela de cebada con graves problemas de salinidad. Se aprecia (Fig. 1b) que la salinidad tiene un efecto muy negativo en el desarrollo y producción del cultivo. Prácticamente toda la parcela es salina (CEe ≥ 4 dS m^{-1}), y casi la mitad de ella presenta valores de CEe > 8 dS m^{-1} (Fig. 1c). Las zonas más salinas, en colores marrones y rojo en la Figura 1c, presentan los niveles más bajos de NDVI, colores naranjas y rojos en la Figura 1d, indicativos del menor desarrollo vegetativo de la cebada.

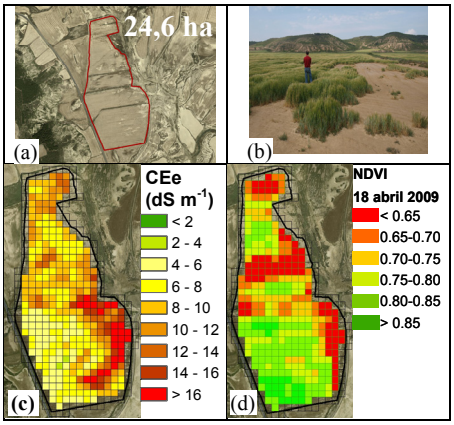


Figura 1: Parcela salina de cebada en secano: **a)** contorno sobre ortofoto; **b)** detalle del efecto negativo de la salinidad en la cebada (foto del 13 de mayo); **c)** mapa de CEe (28 octubre); y **d)** mapa de NDVI (18 de abril).

En las parcelas no salinas (CEe < 4 dS m^{-1}, SEC-4 y SEC-5 y REG-4; datos no mostrados) y ligeramente salinas (4 ≤ CEe ≤ 8 dS m^{-1}; SEC-1 y REG-3, Fig. 2), a menudo la correlación entre índices espectrales y CEe no es significativa y en general los coeficientes de correlación (r) son bajos, no superando nunca un r de 0,55. Sólo alrededor del 30% y 50% de las correlaciones son significativas en dichos suelos, respectivamente. Estos resultados son coherentes considerando que el rendimiento de la cebada comienza a verse afectado a partir de una conductividad eléctrica (CEe) de 8 dS m^{-1}.

En las parcelas con superficies moderada y fuertemente salinas (CEe > 8 dS m^{-1}; SEC-2 y SEC-3, REG-1 y REG-2, Figura 2), la relación entre índices y salinidad (CEe) es en general significativa (88% de las correlaciones con P<0,05); Figura 2).

NDVI y EVI son índices de vegetación que combinan información del rojo e infrarrojo cercano (TM3 y TM4) y reflejan el vigor y grado de desarrollo del cultivo. La relación entre ellos y la salinidad (CEe) en las parcelas de estudio es generalmente inversa (Figuras 2a y 2b) e indica que al aumentar el nivel de salinidad en la parcela disminuye el desarrollo del cultivo, por lo que un bajo crecimiento de éste puede ser indicador de la presencia de salinidad.

A pesar de que el EVI es un índice más robusto que NDVI por ser menos sensible a condiciones atmosféricas y edáficas, las correlaciones de CEe con EVI no siempre son mejores que con NDVI, resultados que difieren de los indicados en Lobell et al. (2010).

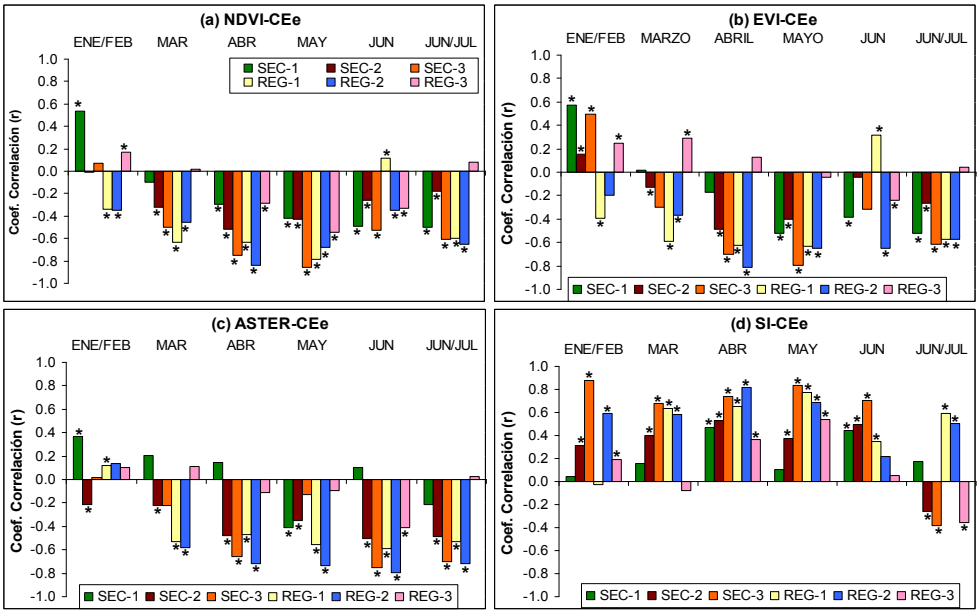


Figura 2: Coeficientes de correlación (r) para diferentes fechas entre la salinidad (CEe) y los índices espectrales (a) NDVI, (b) EVI, (c) ASTER y (d) SI, en parcelas salinas (CEe ≥ 4 dS m^{-1}) de cebada en secano (SEC-1 a 3) y regadío REG-(1 a 3) y nivel de significación (* *P* como mínimo < 0,05).

El índice SI, calculado a partir de la combinación de las bandas TM2 y TM3 (verde y rojo) detecta el brillo, aspecto que a menudo está asociado con la salinidad (Douaoui *et al.*, 2006). Este índice presenta una relación directa con la salinidad en nuestras parcelas (Figura 2d).

El ASTER es el único de los cuatro índices que combina información del infrarrojo medio (TM5 y TM7) y está indicado para detección de salinidad en suelos desnudos (Al-Khaier, 2003). Pese a esto último, se han encontrado también correlaciones significativas con salinidad, aunque inversas, cuando el cultivo esta presente, e incluso las mejores correlaciones se obtienen cuando el cultivo esta más desarrollado (Fig. 2c).

Las mejores correlaciones se obtienen, en general, en los meses de abril y mayo (Figura 2; r de hasta -0.86), correspondientes al máximo desarrollo del cultivo, y en las parcelas más salinas y con mayor variación en salinidad. Estas fechas son por tanto las mejores para discriminar con imágenes Landsat problemas de salinidad.

En las 6 parcelas salinas (Figura 2), el mayor número de correlaciones significativas se ha obtenido para el NDVI (31), seguido por SI (28), EVI (27) y ASTER (23). Se ha seleccionado el NDVI como índice más apropiado para identificar áreas salinas en cebada.

CONCLUSIONES

Se ha puesto a punto una metodología para combinar en formato ráster índices espectrales con cartografía de salinidad.

Las mejores correlaciones entre los índices espectrales y la CEe se presentan en abril y mayo y en las parcelas más salinas y con mayor variación en salinidad. Dichas correlaciones son significativas y negativas entre CEe y los índices NDVI, EVI y ASTER, y positivas entre CEe y SI.

Se ha seleccionado el NDVI como más apropiado para identificar áreas salinas en las superficies con cebada de la cuenca media del Ebro, ya que, además de ser uno de los que más y mejor correlacionan con salinidad, tiene fácil interpretación y es el más utilizado en bibliografía relacionada con el tema de estudio.

Las fechas óptimas para la detección y seguimiento con imágenes Landsat de la salinidad edáfica en cebada son abril y mayo.

BIBLIOGRAFÍA

AL-KHAIER, F. 2003. *Soil salinity detection using satellite remote sensing*. Thesis Master of Sci. International Institute for GeoInformation Science & Earth Observation, Netherland. 70 pp.

AMEZKETA, E., URDANOZ, V. y ARAGÜÉS, R. 2007. *Cartografía automática de la salinidad del suelo mediante un sensor electromagnético móvil georreferenciado*. Riegos y Drenajes XXI, 153, 34-43.

CASTERAD, M.A., PORTERO, C., BERKANE, Y., BARINAGARREMENTERIA, I., URDÁNOZ, V., ALBIZUA, L. y AMEZKETA, E. 2011. *Utilidad del NDVI para la discriminación de fases salinas en parcelas con cebada.* XIV Congreso Nacional de la Asociación Española de Teledetección, 4 pp.

DOUAOUI, A., NICOLAS, H. y WALTER, C. 2006. *Detecting salinity hazards within a semi-arid context by means of combining soil and remote sensing data*. Geoderma, 134, 217-230.

HUETE, A.R., LIU, H.Q., BATCHILY, K. y VAN LEEUWEN, W.J.D. 1997. *A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS*. Remote Sensing of Environment, 59, 440-451.

LOBELL, D.B., LESCH, S.M., CORWIN, D.L., ULLMER, M.G., ANDERSON, K.A., POTTS, D.J., DOOLITTLE, J.A., MATOS, M.R. y BALTES, M.J. 2010. *Regional-scale assessment of soil salinity in the red river valley using multi-year MODIS EVI and NDVI*. Journal of Environmental Quality, 30, 35-41.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. y HARLAN, J.C. 1974. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Greenbelt, MD, NASA/GSFC (Type III, Final Report).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el INIA a través del proyecto RTA08-083-C02-00; por el DDRyMA (Gobierno de Navarra); y por el MICIIN y el Fondo Social Europeo (Programa Torres Quevedo, PTQ-08-03-07315).

Aplicación del método SEBAL para la estimación de la evapotranspiración de cultivos en una región árida (Atacama, Chile)

J.A. Azuela, S. García-López, J.P. Saavedra, M. Canepa y J.L. Molina

Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz. Campus Río San Pedro, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España). Tel: 956016430. Correos electrónicos: antonio.azuela@gmail.com, santiago.garcia@uca.es, jpsaavedra@sye.cl, mmcanepa@uc.cl, josluismol@gmail.com

RESUMEN

La evapotranspiración es una variable biofísica cuya estimación es difícil y costosa mediante métodos convencionales, pero su conocimiento es esencial para determinar el requerimiento hídrico de un cultivo, especialmente en regiones áridas. En este estudio, se estima la evapotranspiración por el método SEBAL utilizando imágenes Landsat 7 ETM+, en un área de cultivo de extrema aridez en la región de Atacama, Chile. En la resolución del balance energético en superficie se utilizan radiancias espectrales, datos meteorológicos e información topográfica. Se obtiene la distribución espacio-temporal de la variable, con valores que se ajustan a los datos de validación disponibles, obtenidos por el método de Penman-Monteith.

Palabras clave: Landsat, evapotranspiración, regiones áridas, SEBAL.

ABSTRACT

Evapotranspiration is a biophysical variable, hard and expensive to estimate by conventional methods, however it is essential to determine the irrigation water requirements, especially in arid regions. For this study, a pilot crop area in the extreme arid region of Atacama Chile was selected to estimate it by the SEBAL method. Spectral radiances plus routine weather data and topographic information were used to solve the energy balance at the earth's surface. A spatially-temporally distributed data were obtained, similar to the available validation data estimated by Penman-Monteith.

Keywords: *Landsat, evapotranspiration, arid regions, SEBAL.*

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración es una de las variables hidrológicas de más difícil evaluación cuando se aborda el balance hídrico de una cuenca. Incluye todos los mecanismos por los que el agua retorna a la atmósfera, bien directamente mediante proceso físico de cambio de estado, bien indirectamente por la actividad metabólica vegetal. La estimación de la cantidad de agua evapotranspirada (ETR) es fundamental para conocer los requerimientos hídricos de los cultivos y optimizar el uso del agua. Una mayor exactitud en su estimación, contribuye a un mejor conocimiento del reparto de los recursos hídricos, posibilitando una gestión más eficiente de los mismos. Esto es especialmente relevante en regiones con déficit hídrico y fuerte demanda. Dada la naturaleza del fenómeno, la medida instrumental directa de la ETR es complicada y en todo caso está limitada a un ámbito espacial concreto y a unas condiciones ambientales controladas. El empleo de métodos empíricos o semiempíricos viene a suplir estas limitaciones, si bien habitualmente se desconoce su validez y resulta difícil su extrapolación a la totalidad del territorio. La teledetección espacial constituye una herramienta complementaria que puede arrojar luz acerca de la distribución espacio-temporal de esta variable. En este trabajo se expone un caso de aplicación a la estimación de la ETR en cultivos de regadío bajo clima árido. Para ello se ha implementado el método SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land, Bastiaanssen *et al*.1998), basado en la resolución de un balance de energía a partir del tratamiento multitemporal de imágenes Landsat.

ÁMBITO DE ESTUDIO

La cuenca del río Copiapó, de 18.400 km^2, está situada en la Región de Atacama, al N de Chile. Presenta una fuerte orografía con altitudes entre 6.040 m en el sector E (Cordillera de los Andes) y el nivel del mar en la desembocadura (Océano Pacífico). Esta cuenca reúne una serie de características que le confieren interés especial en

cuanto a recursos hídricos: (i) clima extremadamente árido, con precipitación media anual <20 mm. (ii) desarrollo de una floreciente agricultura de regadío, vid fundamentalmente, abastecida tanto de agua superficial de la cuenca alta, como de agua subterránea de un importante acuífero aluvial, (iii) fuerte demanda hídrica por parte de la minería, que tiene en el agua uno de los principales factores limitantes y (iv) sobreexplotación del acuífero, cifrada según las fuentes entre 43 y 110 hm^3/año (Burt, 2008).

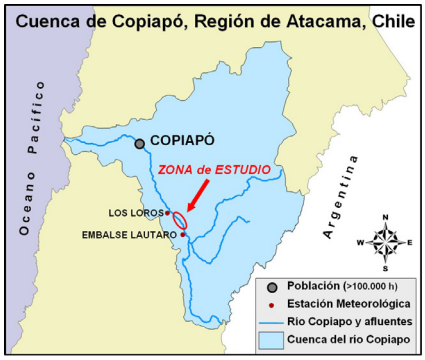


Figura 1: Localización del área de estudio.

En esta cuenca, que presenta pues una compleja problemática hídrica, ha sido seleccionada un área piloto de 20 km^2 de extensión para la evaluación de la ETR desde satélite. El área, parcialmente ocupada por cultivos de regadío (vid), fue seleccionada en el sector central de la cuenca, a 1.000 m de altitud, entre 2 estaciones meteorológicas (Los Loros y Embalse de Lautaro).

DATOS DE PARTIDA

Se han utilizado datos de tres tipos: imágenes de satélite, Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y datos meteorológicos. Las imágenes de satélite utilizadas, una para cada mes del año 2000, fueron adquiridas por el sensor Landsat 7 ETM+ y conseguidas gratuitamente de EROS (Earth Resources Observation and Science Center). El MDE utilizado es el ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) descargado gratuitamente de ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). La información meteorológica fue obtenida de DGA (Dirección General de Aguas de Chile); para aplicar SEBAL, sólo se requiere: (1) velocidad del viento a la hora de adquisición de la imagen y (2) radiación solar diaria promedio. Dado que datos de esta última variable no estaban disponibles, fueron estimados con el software libre SOLARCALC (Depto. de Agricultura de EEUU).

METODOLOGÍA

La Figura 2 muestra el modelo esquemático del Método SEBAL. Su aplicación exige la previa corrección de las radiancias espectrales de longitud de onda corta (bandas 1-5 y 7 de Landsat), para lo que utilizó el algoritmo propuesto por Morse *et al.* (2000), que considera el ángulo de incidencia solar, la orientación y la pendiente del terreno, ambas extraídas del MDE.

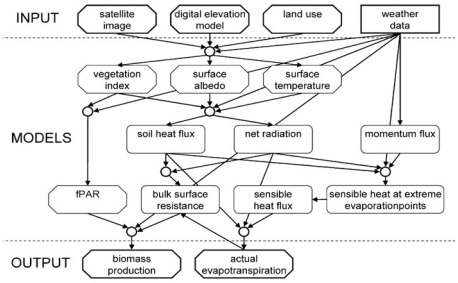


Figura 2: Modelo esquemático del método SEBAL (Zwart & Bastiaanssen, 2007).

La ETR instantánea se determinó a partir del flujo de calor latente, λE, de acuerdo con la siguiente ecuación de balance de energía:

$$\lambda E = R_n - G_0 - H \qquad (1)$$

en donde, λE es el flujo de calor latente (W/m^2), R_n la radiación neta (W/m^2), G_0 el flujo de calor en el suelo (W/m^2) y H el flujo de calor (W/m^2).

La radiación neta (R_n) se calculó resolviendo vía píxel la ecuación (Bastiaanssen *et al.* 1998):

$$R_n = (1-\alpha_0)K_{in} + (L_{in} - L_{out}) - (1-\varepsilon_0)L_{in} \quad (2)$$

en donde α_0 es el albedo (adimensional), ε_0 la emisividad en $IR_{térmico}$ (adimensional), K_{in} radiación incidente de λ corta (W/m^2), L_{in} la radiación incidente de λ larga (W/m^2) y L_{out} la radiación reflejada de λ larga (W/m^2).

El albedo (α_0) fue calculado a partir de las reflectancias espectrales de las bandas 1-5 y 7 (R_{BANDA}), y de la transmitancia atmosférica en ambos sentidos (τ_{sw}^2), obtenida a partir del MDE, de acuerdo con Morse *et al.* (2000). A su vez, R_{BANDA} fue calculada a partir del coseno del ángulo de incidencia solar horizontal-equivalente obtenido en el proceso de corrección de imágenes satelitales. La emisividad de la superficie en el infrarrojo térmico (ε_0) fue estimada a partir del NDVI, de acuerdo con Morse *et al.* (2000).

En el cálculo de las radiaciones incidentes de λ corta *(K_{in})* y larga *(L_{in}),* están involucradas: la constante solar (G_{sc}), la constante de Stefan Boltzmann *(σ),* la transmitancia atmosférica en un solo sentido *(τ_{sw}),* el inverso de la distancia relativa entre la Tierra y el Sol *(d_r),* el *cos(θ)$_{x\text{-}eq,}$* y una temperatura de referencia asociada a un píxel representativo de una zona bien irrigada *($T_{0\text{-}ref}$).*

Para obtener la radiación reflejada de λ corta *(L_{out}),* es necesario calcular previamente la temperatura de la superficie *(T_0)* a partir de la emisividad *(e_0)* y de la respuesta espectral original (niveles digitales) de la banda 6.

Una vez estimada *Rn,* se calculó el flujo de calor en el suelo *(G_0)*, según la siguiente ecuación empírica (Morse *et al.* 2000):

$$G_0 = 0.30(1-0.98NDVI^4)R_n \quad (3)$$

en donde R_n es la radiación neta (W/m^2).

La estimación del flujo de calor sensible *(H)* es el punto crítico del método SEBAL, pues incorpora decisiones de parte del analista. La ecuación de partida es la siguiente:

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot Cp_{air} \cdot dT}{rah} \quad (4)$$

en donde ρ_{air} es la densidad del aire (kg/m^3), Cp_{air} es la capacidad calorífica del aire a 20°C (1004 J/kg·K), *rah* es la resistencia aerodinámica al transporte de calor (s/m) y *dT* es la diferencia de temperatura entre las alturas que definen la capa de intercambio calorífico entre el aire y la superficie. A su vez, *(rah)* fue estimada a partir de la rugosidad de la superficie *(z_{0m})* y de velocidades de viento obtenidas de la estación meteorológica Los Loros. Para estimar z_{0m} se asumió una altura de referencia de cultivo de 2 metros, de acuerdo don observaciones in situ; *dT* fue estimada según Morse *et al.* (2000) y *H* mediante un proceso iterativo, corrigiendo para inestabilidad atmosférica por medio de la longitud de Monin-Obukhov. Una vez calculados los valores de *H,* se obtuvo la fracción evaporativa, *Λ* (Morse *et al.* 2000):

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} = \frac{R_n - G_0 - H}{R_n - G_0} \quad (5)$$

en donde: R_n, G_0 y *H* son valores instantáneos de las imágenes procesadas (W/m^2). Finalmente, se determinó la ETR para un período de 24 horas con (Morse *et al.* 2000) según:

$$ETR = \frac{86400 \cdot \Lambda \cdot R_{n\text{-}24}}{\lambda} \quad (6)$$

en donde, Λ es la fracción evaporativa (adimensional), $R_{n\text{-}24}$ la radiación neta diaria (W/m^2) y λ el calor latente de vaporización (J/kg). A su vez, la radiación neta diaria *($R_{n\text{-}24}$),* se calculó con la ecuación (7), asumiendo nubosidad nula:

$$R_{n\text{-}24} = (1 - \alpha_0)R_{a\text{-}24} \cdot \tau_{sw} - 110\tau_{sw} \quad (7)$$

en donde, α_0 es el albedo, τ_{sw} la transmitancia atmosférica en un solo sentido y $R_{a\text{-}24}.\tau_{sw}$ la radiación solar diaria promedio.

Finalmente, el calor latente de vaporización, λ, se calculó a partir de la temperatura de la superficie, T_0 (K) (Morse *et al.* 2000):

$$\lambda = (2.501 - 0.00236(T_0 - 273)) \times 10^6 \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras el tratamiento realizado, fue obtenida la distribución espacial de la ETR a nivel diario en el área piloto, para cada escena. En la figura 3 se presentan cuatro de las cartografías producto. En ellas se observa cierta homogeneidad para los campos de cultivo sometidos a prácticas de riego, que se diferencian claramente de los viales y terrenos baldíos, especialmente en la época de cultivo. Así mismo, se observa una clara evolución de la ETR a lo largo del año, conforme al calendario fenológico de los cultivos. En los meses invernales (abril-septiembre), la ETR disminuye notablemente a raíz de la disminución de riegos y escaso crecimiento de los cultivos. En la figura 4 se representan los valores de ETR obtenidos mediante SEBAL a nivel mensual (asumiendo que la ETR es igual para todos los días del mes), como promedio para todos los píxeles que comprenden la zona de cultivo, junto con valores de referencia (ET_o y ETR) obtenidos en estudios previos por el método de Penman-Monteith (DGA, 1996).

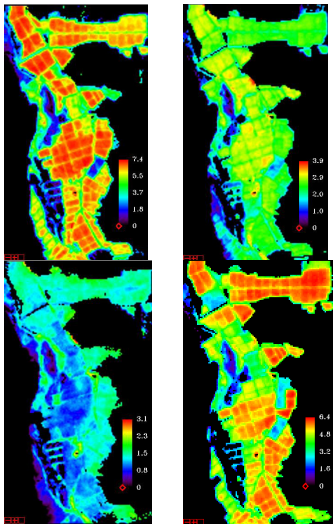


Figura 3: Mapas de ETR diaria obtenidos en los meses de enero, abril, julio y octubre de 2000. La escala se expresa en mm/día.

Hay que advertir la ET_o se define como la máxima cantidad de agua que puede transferirse a la atmósfera por evaporación y transpiración, desde un suelo cubierto completamente por un cultivo de referencia (alfalfa) en óptimas condiciones de desarrollo, asumiendo que no existen limitaciones en la disponibilidad de agua y que por tanto es un valor próximo, pero mayor que la ETR en la mayoría de las situaciones. Los valores obtenidos por SEBAL resultan muy próximos a la ET_o, lo que a falta de mejores datos de validación indicaría cierta sobrevaloración.

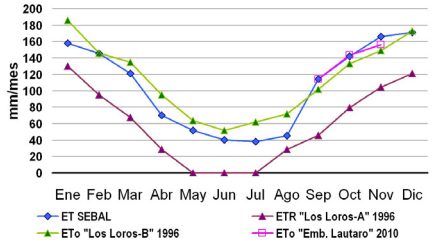


Figura 4: Resultados de SEBAL y comparación con valores de referencia tomados de DGA, 1996

Hay que subrayar un aspecto crítico en la estimación del flujo de calor sensible: la valoración de la rugosidad, que depende del grado de desarrollo foliar del cultivo. En este trabajo se hizo de forma indirecta a partir del NDVI, si bien estudios de campo habrían aportado información valiosa. Por otra parte, el no disponer de valores de radiación solar ha obligado a soslayar este déficit mediante la modelización con datos indirectos.

CONCLUSIONES

El método SEBAL ha permitido determinar la distribución espacio-temporal de la ETR en el área de estudio, con resultados que se ajustan razonablemente a los datos de validación disponibles. Los volúmenes mensuales evapo-transpirados calculados por el método SEBAL para el área de estudio, varían entre 138.000 m^3 en la época de mayor crecimiento vegetativo de los cultivos (Diciembre) y 31.000 m^3 en la época de menor crecimiento (Julio), lo que equivale a dotaciones medias de 12.650 m^3/ha·año. SEBAL proporciona resultados razonables a bajo coste, si las entradas del modelo estén bien determinadas. Los resultados del método se verían mejorados si se dispusiera de información in situ relativa a dos aspectos específicos: radiación solar y rugosidad. Por tanto, es recomendable la monitorización de la primera variable e investigar la relación entre la segunda y la cobertura vegetal. Por otra parte, para la validación de los resultados, es conveniente disponer de instalaciones en los que se mida de forma directa la ETR (lisímetros).

BIBLIOGRAFÍA

BASTIAANSSEN, W.G.M., MENENTI, M., FEDDES R.A., HOLTSLAG, A.A.M. 1998: *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1 Formulation.* Journal of Hydrology, 212-213, 198-212.

BURT, C.M. 2008: *Recursos hídricos Cuenca del Río Copiapó.* Informe técnico. Disponible en: http://ciperchile.cl/wp-content/uploads/informe-de-charles-m-burt.pdf. Acceso 29/03/2011.

DGA. 1996: *Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile.* Disponible en: http://bibliotecadigital.ciren.cl. Acceso 29/03/11.

MORSE, A., TASUMI, M., ALLEN, R., KRAMBER, W. 2000: *Application of the SEBAL Methodology.* Idaho DWR. Acceso 29/03/2011: http://www.idwr.idaho.gov/GeographicInfo/Publications/PDFs/phase_1_final_report.pdf .

ZWART, S.J. SANDER J., BASTIAANSSEN, W.G.M. 2007: *SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems.* Agricultural Water Management 89, 287-296.

Análisis de Espectroscopía Derivativa para la aplicación de un Modelo Automático de Gaussianas Modificadas a datos hiperespectrales Hymap de una zona contaminada por drenaje ácido de mina (Río Odiel, Huelva, España)

J. Buzzi[1], V. Carrère[2], A. Riaza[1], E. García-Meléndez[3] y M. Bachmann[4]

[1] IGME – Instituto geológico y Minero de España. C/ La Calera, 1. 28760 Tres cantos (Madrid, España). Correo electrónico: j.buzzi@igme.es

[2] Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, 2 rue de la Houssinière BP 92208, 44322 Nantes CEDEX 3, Francia.

[3] Universidad de León, Facultad de Ciencias Ambientales, Campus de Vegazana s/n. 24071 (León, España).

[4] DLR_ Agencia Aeroespacial Alemana, Centro de Datos de Teledetección, P.O. Box 1116 D-82234 Weßling, Alemania.

RESUMEN

En este trabajo se aplica un Análisis de Espectroscopía Derivativa al estudio de imágenes hiperespectrales Hymap de una zona que alberga numerosos yacimientos minerales de sulfuros masivos sobre cuyos residuos se desarrollan procesos de oxidación de pirita, y que originan drenaje ácido de mina. El estudio está enfocado hacia el diagnóstico mineral de los productos contaminantes que precipitan sobre los sedimentos fluviales, a partir de imágenes hiperespectrales, utilizando una espectroteca de referencia desarrollada en laboratorio. De esta manera, se pueden extraer absorciones espectrales características según la forma del espectro, a partir de la eliminación del continuo, y la aplicación de curvas Gaussianas para extraer parámetros espectrales que ayudan a refinar el diagnóstico mineralógico. El uso combinado de varias secuencias de algoritmos de tratamiento hiperespectral de imágenes permite realizar un mapa geológico de los sedimentos fluviales, utilizando las pátinas de sulfatos de hierro precipitados a partir de agua ácida, que facilita la evaluación ambiental en entornos con residuos mineros.

Palabras clave: Espectroscopía de imágenes, Modelo Automático de Gaussianas Modificadas (AMGM), Análisis de Espectroscopía Derivativa, residuos mineros, drenaje ácido de mina.

ABSTRACT

The Spectroscopic Derivative Analysis (SDA) is applied to the analysis of hyperspectral Hymap imagery over an area hosting massive sulphide deposits, with pyrite oxidation processes and acid mine drainage generation in order to get the necessary parameters for the Automated Modified Gaussian Model (AMGM). The study aims to a mineralogical diagnosis of contaminating weathering products precipitating over river sediments using hyperspectral airborne data. This model allows the extraction of diagnostic spectral absorptions based on the shape of the spectra through Gaussian curves and enabling an accurate mineral mapping on a geologically qualified context.

Keywords: *imaging spectroscopy, Automated Modified Gaussian Model (AMGM), Spectroscopic Derivative Analysis (SDA), mine waste, acid mine drainage.*

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Odiel (Huelva) se encuentra en la Faja Pirítica Ibérica, un extenso Complejo Vulcanosedimentario que alberga numerosos depósitos de sulfuros masivos.

Las tareas mineras que se han desarrollado durante más de 5000 años en esta área han generado grandes cantidades de residuos mineros, cuya meteorización genera una serie de sulfatos de hierro y otros minerales secundarios (Nordstrom y Alpers, 1999) que generan aguas ácidas y la dispersión de metales pesados en el medio ambiente. La evolución geoquímica de estos productos está controlada por el clima, de

tipo semiárido (Riaza y Müller, 2009).

La aplicación del Modelo Automático de Gaussianas Modificadas al análisis de datos espectrales tiene su origen en la caracterización de piroxenos (Sunshine *et al*., 1993) y el análisis de microfotobentos (Verpoorter *et al*., 2009), pero la aplicación de esta técnica es relativamente reciente en la cartografía geológica de zonas afectadas por drenaje ácido de mina.

DATOS

Se han estudiado imágenes aeroportadas Hymap del cauce del río Odiel tomadas el 17 de junio de 2005. HyVista corrigió los datos hiperespectrales brutos con calibraciones radiométricas de laboratorio y fuentes de calibración en vuelo. La Agencia Aeroespacial Alemana (DLR) realizó las correcciones atmosféricas y topográficas.

Los residuos mineros han sido ampliamente estudiados mediante teledetección, y se ha desarrollado una espectroteca de laboratorio (Crowley *et al*., 2003) de los minerales producto de la oxidación, disolución y reprecipitación de piritas.

MÉTODO

Cartografía Hymap

Se ha generado un mapa geológico a partir de datos Hymap siguiendo una serie conocida de algoritmos de tratamiento de imágenes hiperespectrales (Riaza y Müller, 2010; RSI 2000). Posteriormente, se exploraron algunas de las unidades geológicas cartografiadas con el Modelo de Análisis Derivativo Espectral (SDAM), una serie de rutinas escritas en IDL para análisis derivativo (Verpoorter *et al*., 2009). La rutina ya conocida de tratamiento de imágenes hiperespectrales comienza aislando el cauce del río mediante las Transformadas de Ruido Mínimo (MNF) (RSI, 2000) y eliminando el agua mediante máscaras. El algoritmo Pixel Purity Index (PPI) (RSI, 2000) se aplica a la imagen MNF para seleccionar los píxeles más puros, que se introducen en el visualizador n-dimensional (RSI, 2000). Las poblaciones de pixeles resultantes se usan como miembros extremos en el Cartógrafo de Ángulos Espectrales (SAM) (RSI, 2000). Finalmente, se genera un mapa geológico de los sedimentos del río, a cuyos datos que se aplica posteriormente el Modelo Automático de Gaussianas Modificadas.

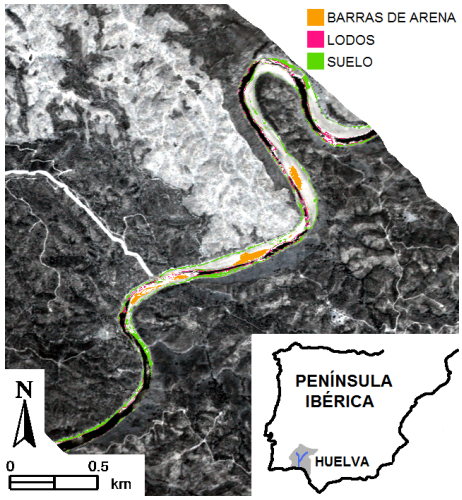


Figura 1: Unidades geológicas cartografiadas con datos Hymap (rio Odiel, Huelva, España).

Análisis de Espectroscopía Derivativa y Modelo Automático de Gaussianas Modificadas

Se ha aplicado un Análisis de Espectroscopía Derivativa (SDAM) a las imágenes Hymap de las tres unidades geológicas seleccionadas (Figura 1). Se han usado los 19 canales en el intervalo de longitudes de onda del visible, por su mejor relación señal/ruido.

SDAM es una serie de rutinas diseñadas para deconvolucionar el resultado de eliminar el continuo en los espectros de una imagen en una serie de curvas Gaussianas, que permiten analizar fácilmente la forma del espectro original mediante técnicas de análisis derivativo. Este análisis permite determinar la longitud de onda de los principales rasgos de absorción y extraer varios parámetros que definen las curvas Gaussianas: profundidad de la absorción, anchura del espectro a la mitad del valor máximo (FWHM) y factor de asimetría.

PARÁMETROS ESPECTRALES CON SDA

La primera etapa de tratamiento de imágenes ha dado lugar a una serie de unidades geológicas en los sedimentos del cauce del río, de las cuales se seleccionaron tres: barras de arena, lodos y

suelo regional (Figura 1). El diagnóstico mineralógico de las pátinas que cubren los sedimentos del río con la espectroteca de minerales producto de la oxidación de piritas (Crowley *et al*., 2003; RSI, 2000) revela la presencia de sulfatos y óxidos e hidróxidos de hierro. Las barras de arena aparecen cubiertas de jarosita, schwertmanita y goetita. El lodo que rodea las barras está cubierto por alunita, copiapita y szmolnokita. En el suelo que se desarrolla sobre las rocas por las que circula el cauce del río, domina la schwertmanita, goetita y jarosita (Figura 2 A y B).

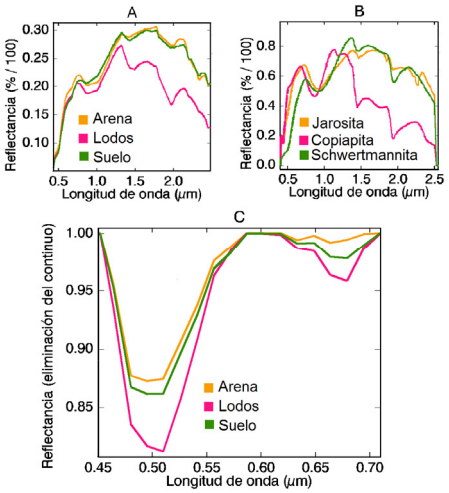


Figura 2: **A**: Espectros de las unidades cartografiadas extraídos de la imagen Hymap. **B**: Espectros de los minerales diagnosticados para las unidades geológicas en la espectroteca de referencia en minerales producto de oxidación y meteorización de piritas (Crowley et al, 2003). **C**: Curva al eliminar el continuo en el espectro Hymap de las unidades geológicas seleccionadas.

Las tres unidades geológicas muestran una tendencia similar al eliminar el continuo en el espectro (Figura 2C), con una absorción profunda y estrecha en 0.50 µm y otra más suave en 0.67 µm. Ambas corresponden a las absorciones características del ión férrico Fe^{3+} presente en los sulfatos de hierro (Hunt *et al*., 1976). Las absorciones espectrales de los minerales dominantes en las pátinas de los sedimentos del río aparecen en 0.6 µm.

En los parámetros calculados sobre las absorciones espectrales (profundidad de la absorción, FWHM y asimetría) se observa:

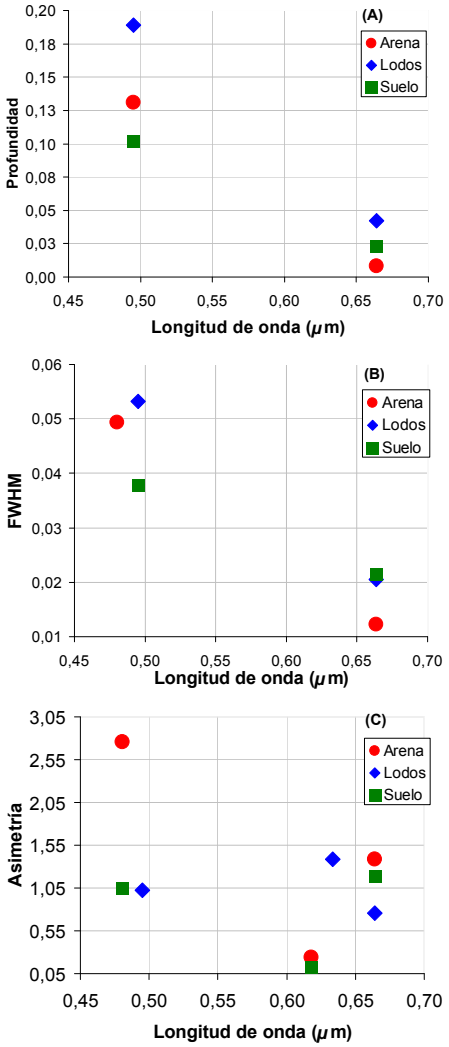


Figura 3: Longitudes de onda de las absorciones espectrales de los espectros Hymap de las unidades geológicas seleccionadas, respecto a su valor correspondiente en los parámetros de absorción generados con análisis derivativo.

La profundidad de la absorción coincide en las tres regiones seleccionadas en los 0.4952 µm y los 0.6638 µm (Figura 3A), por la presencia de cationes férrico Fe^{3+}. La absorción en los espectros de los lodos en 0.4952 µm es más profunda que en las otras unidades geológicas. En cambio, la absorción en 0.6638 µm en los espectros de los lodos es más débil que en las otras unidades geológicas.

Los picos más notables de la Anchura del Espectro a la Mitad del Valor Máximo (FWHM) para las unidades geológicas seleccionadas (Figura 3B) aparecen hacia los 0.49 µm y los 0.66 µm. La posición del FWHM de los espectros de las barras de arena aparece ligeramente desplazada hacia longitudes de onda cortas, además de presentar menor profundidad de absorción en 0.6638 µm

Los valores de la asimetría de las absorciones aparecen alrededor de 0.485 µm, 0.63 µm y en los 0.6638 µm (Figura 3C). En las barras de arena la asimetría presenta un valor alto alrededor de los 0.485 µm. En los suelos, el valor de la asimetría está próximo al de las arenas. Para los espectros de lodos, el valor de la asimetría de las absorciones difiere respecto a las otras unidades geológicas en los 0.63 µm y los 0.6638 µm.

CONCLUSIONES

Una cartografía mineral precisa de las unidades geológicas y de las pátinas de contaminantes fácilmente solubles, aporta una información valiosa para realizar una evaluación ambiental de los procesos geológicos asociados al drenaje ácido de mina.

La aplicación del Análisis de Espectroscopía Derivativa a las imágenes Hymap permite destacar espectralmente los sulfatos hidratados de las cuñas de lodo que envuelven las barras de cantos y arenas, y del resto de las unidades geológicas. La aplicación de esta técnica de análisis espectral permite obtener más información que los algoritmos más conocidos de tratamiento hiperespectral de imágenes, y perfeccionar la cartografía geológica.

Las propiedades espectrales de las unidades geológicas se describen combinando técnicas de espectroscopía de imágenes basadas en la extracción de espectros miembros extremos (*endmembers)* y en el análisis derivativo de los espectros. Así, las propiedades físico-químicas de los minerales presentes en áreas afectadas por drenaje ácido de mina se ponen en valor mediante el Análisis de Espectroscopía Derivativa y el Modelo Automático de Gaussianas Modificadas.

BIBLIOGRAFÍA

CROWLEY, J.K.; WILLIAMS, D.E.; HAMMARSTROM, J.M.; PIATAK, N.; CHOU, I-M y MARS, J.C., 2003. *Spectral refectance properties (0.4-2.5 µm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes.* Geochemistry: Exploration, Enmvironent, Analysis, 3-3, pp. 219-228(10).

HUNT, G.R. y SALISBURY, J.W., 1976. *Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: XI. Sedimentary rocks*. Modern Geology, 5 pag. 211-217.

NORDSTROM, D.K. y ALPERS, C.N., 1999. *Geochemistry of acid mine waters*. In: Plumbee, G.S., Logsdom, M.J. (eds.), *The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, techniques and health issues*. Reviews in Economic Geology, 6A, pp. 133-160.

RIAZA, A. y MÜLLER, A., 2010. *Hyperspectral remote sensing monitoring of pyrite mine wastes: a record of climate variability (Pyrite Belt, Spain)*. Environmental Earth Sciences 61-3, pp. 575-594. DOI:10.1007/s12665-009-0368-y

RSI, 2000. *Envi User's Guide*. Research Systems, Inc. Publications.

SUNSHINE, J.M. y PIETERS, C.M., 1993. *Estimating modal abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixtures using the Modified Gaussian Model*. Journal of Geophysical Research, 98 (E5), pp. 9075-9078.

VERPOORTER, C.V., CARRÈRE, V., COMBE, J.-P., 2009. *Sediment characterization in the intertidal zone of Bourgneuf Bay (France) using the Automated Modified Gaussian Model (AMGM)*. EGU General Assembly. Vienna, Austria.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el Plan Nacional de Investigación (proyectos CGL2005-02462, CGL2006-01544/CLI y CGL2007-60004/CLI) y el Programa de Formación de Personal Investigador (BES-2008-003648). La Universidad de Nantes (Francia) acogió la formación en técnicas de análisis espectral (EEBB SES1000I001495XVO). La Junta de Andalucía facilitó la entrada a las industrias.

Estudio de recursos nivales mediante imágenes Landsat en cuencas andinas, Región de Atacama, Chile

M. Canepa, S. García-López, J.P. Saavedra, J.A. Azuela y J.L. Molina

Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz. Campus Río San Pedro, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España). Tel: 956016430. Correos electrónicos: mmcanepa@uc.cl, santiago.garcia@uca.es, jpsaavedra@sye.cl, antonio.azuela@gmail.com; josluismol@gmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se utilizan técnicas de teledetección espacial para estudiar la dinámica de la cobertura nival en dos subcuencas andinas de alta montaña tributarias del río Copiapó, en la región de Atacama (Chile). La estimación de la superficie ocupada por la cobertura nival es obtenida a través de la aplicación del índice NDSI, utilizando imágenes Landsat TM y ETM. Los resultados de este proceso fueron comparados con datos foronómicos relativos a los cursos principales de ambas cuencas, para analizar la relación entre la fusión nival y la escorrentía superficial. La escasa relación encontrada plantea diversas hipótesis que son indicadas en el trabajo.

Palabras clave: Landsat, regiones áridas, nieve, NDSI, hidrograma de caudales.

ABSTRACT

This paper reviews the use of remote sensing techniques to study the snow cover dynamic in two high mountain Andean basins, both tributaries of the Copiapó river, in the Atacama region (Chile). The estimation of snow cover is obtained by applying the NDSI index, using Landsat TM and ETM imaginary. The results of this process were compared and contrasted with phoronomic data from the area of study, in order to analyze the relationship between snowmelt and surface run-off.

***Keywords**: Landsat, arid areas, snow, NDSI, flow hydrograph.*

INTRODUCCIÓN

En Chile, debido a su cercanía a la Cordillera de los Andes, el funcionamiento de los sistemas hidrológicos está muy condicionado por la cobertura nival. Especialmente en las regiones áridas, la escorrentía provocada por la fusión es la principal fuente de alimentación de cauces superficiales y embalses subterráneos. Este trabajo se centra en la cuenca alta del río Copiapó (III Región de Atacama), en particular, se estudia la cubierta nival y el comportamiento de dos subcuencas de cabecera, Jorquera y Pulido, de 4.200 km^2 y 2.200 km^2 de extensión, respectivamente (Figura 1). La región se caracteriza por una grave problemática asociada a los recursos hídricos, dado su carácter árido y al progresivo aumento de la demanda asociada a las principales actividades: la Agricultura y la Minería.

El estudio de la cobertura nival en zonas andinas es una tarea muy difícil por métodos convencionales. La aplicación de técnicas de teledetección es una alternativa muy útil.

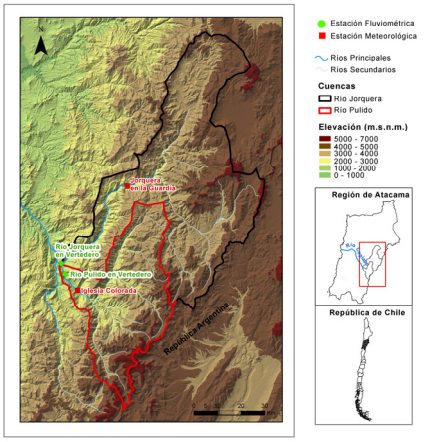


Figura 1: Situación de la zona de estudio.

En este trabajo se utilizan imágenes Landsat, que por su resolución espacial (30 m), se adaptan bien al grado de detalle requerido de acuerdo con el ámbito geográfico estudiado. La identificación de la nieve se basa en su diferente respuesta

espectral respecto del resto de las cubiertas, especialmente en el espectro visible e infrarrojo, utilizándose para ello el índice NDSI. (Normalizad Difference Snow Index).

DATOS DE PARTIDA

El estudio se ha realizado para dos años hidrológicos 2000/01 y 2005/06. Para ello se utilizaron imágenes Landsat 5TM y 7ETM+ de archivo, disponibles de forma gratuita en dos centros de distribución: USGS (United States Geological Survey) y IMPE-DSR (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -Divisao de Sensoriamento Remoto). Tras eliminar las imágenes defectuosas o con nubosidad, fueron seleccionadas un total de 26 fechas distribuidas en los dos años considerados. Además, se ha considerado: (a) información topográfica contenida en el ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model), (b) datos foronómicos diarios registrados en estaciones de aforos situadas a la salida de cada subcuenca y c) datos de precipitación diaria en tres estaciones pluviométricas de la cuenca.

METODOLOGÍA

Procesamiento de las imágenes

La fase de pretratamiento fue iniciada con la generación de mosaicos para cada fecha, con objeto de cubrir la totalidad del área de estudio. Fueron confeccionados un total de 26 mosaicos, a partir de las escenas con path/row 233/79 y 233/80. Posteriormente se procedió a la georeferenciación de los mismos por el método de puntos de control, considerando el sistema UTM (huso 19S), datum WGS84.

La fase propiamente de tratamiento comenzó con la corrección radiométrica y conversión a parámetros físicos (reflectancia). El método seguido para ello ha sido el modelo COST (Chaves, 1996), que en un mismo paso incluye la calibración del sensor, el efecto atmosférico y la corrección de las condiciones de iluminación.

$$\rho = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \left(L_{\lambda\, Sat} - L_{\lambda\, Atm}\right)}{E_{Sun} \cdot \cos\theta \cdot \tau} \qquad (1)$$

donde:
ρ = reflectancia
$L_{\lambda\ sat}$ = radiancia espectral obtenida mediante la expresión ($L_{\lambda\, sat} = C_1 + C_2 \cdot ND$)
$L_{\lambda\, atm}$ = radiancia atmosférica
d = Distancia normalizada Tierra-Sol
E_{Sun} = Irradiancia solar exoatmosférica
τ = Transmitancia atmosf., expresada como cosθ
θ = Angulo cenital solar

Los coeficientes de calibración utilizados fueron obtenidos de Chander y Markham (2003) y Chander et al. (2009), para las imágenes del año 2005 y 2000 respectivamente. La influencia de la atmósfera fue establecida a partir de los valores mínimos de los histogramas.

Para la identificación de la nieve ha sido utilizado el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), que constituye uno de los procedimientos más robustos y ampliamente utilizados para este fin. Este índice está diseñado para discriminar la nieve de otras cubiertas, especialmente nubes; es insensible a las diferencias en las condiciones de iluminación y, por estar normalizado, minimiza los efectos de la topografía (Silverio y Jaquet, 2005). El cálculo del NDSI se realiza con el siguiente algoritmo:

$$NDSI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5} \qquad (2)$$

donde: ρ_2 y ρ_5 son las reflectancias en las bandas 2 y 5, respectivamente.

El umbral considerado para el índice ha sido 0.4, de forma que valores superiores se identifican como nieve (Dozier, 1989). Sin embargo, con este único criterio ciertas celdillas (ocupadas por agua, o zonas de sombra) pueden sufrir errores de identificación, por lo que se han considerado dos criterios adicionales, basados en las reflectancias en las bandas 2 y 4, quedando por tanto las siguientes condiciones para la consideración de que un pixel está ocupado por nieve (Gómez-Landesa y Rango, 2001): (i) NDSI ≥ 0.4; (ii) $\rho_2 \geq 0.1$ y (iii) $\rho_4 \geq 0.11$.

Una vez identificada las celdillas ocupadas por nieve en cada fecha, se obtiene una máscara y se cuantifica la superficie.

Análisis en entorno SIG y comparación con variables hidrológicas

A partir de las cubiertas niveles obtenidas para cada fecha y considerando del MDE de la zona, se ha analizado la influencia de algunas variables geográficas (básicamente altitud y orientación) en el fenómeno de fusión y la repercusión de ésta sobre los caudales circulantes por los cauces principales de cada cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, el análisis de las cubiertas nivales obtenidas para cada año evidencia que la fase de acumulación ocurre entre los meses de Abril y Agosto. Durante este período la cobertura nival tienen un comportamiento fluctuante, con distintos episodios de precipitación sólida, según el año. La superficie total de nieve en la cuenca del Copiapó difiere notablemente entre los dos años: 4.250 km^2 (2000/01) y 2.500 km^2 (05/06). La fase de deshielo se identifica a partir del mes de Agosto para el primer año y de Octubre para el segundo, alcanzando mínimos durante los meses Diciembre a Febrero (verano austral).

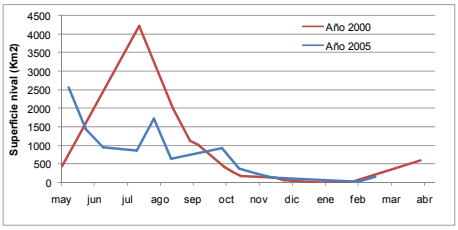
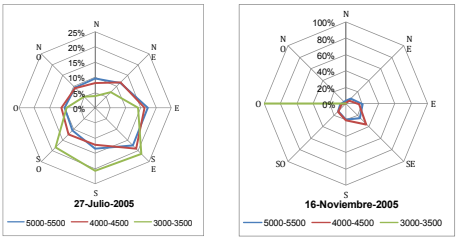


Figura 2: Evolución de la superficie nival a lo largo de los dos años hidrológicos considerados.

El patrón espacial de deshielo indica, como era previsible, que la altitud y la orientación son las variables más influyentes. Las laderas orientadas al S y al SE son las superficies en las que perdura mayor tiempo el manto nival, tal y como se aprecia en la Figura 3 para el año 05/06. En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de los sucesivos mantos nivales para ese mismo año.

Figura 3: Orientación de la cobertura nival por



rangos de altitud en dos momentos del año 05/06.

En cuanto a la relación entre la variación de superficie nival y la escorrentía superficial, en principio cabría esperar que la disminución de aquélla produzca, con más o menos retraso, un aumento de los caudales, tanto mayor cuanto mayor sea la extensión que sufre la fusión. Sin embargo, esto no parece suceder en el caso en estudio (Figura 5). Así, la disminución de la extensión nival, que puede llegar a ser de varios centenares de km^2, no conlleva aumentos apreciables en la escorrentía superficial, sino a veces, lo contrario. Esto es especialmente evidente en la cuenca del Jorquera, en ambos años analizados. Respecto a la cuenca del Pulido, que presenta un comportamiento claramente distinto, se produce un incremento sostenido de caudal en los meses estivales, dos meses después de la fusión de la mayor parte del manto nival. En este caso, las diferencias de superficie nevada entre los años 00/01 y 05/06 (1224 km^2 frente a 635 Km^2) no parece tener una respuesta clara en el comportamiento de los caudales ya que el caudal de la crecida estacional alcanza valores semejantes, para ambos años hidrológicos

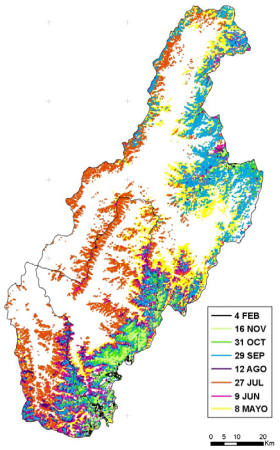


Figura 4: Distribución espacial de las sucesivas cubiertas nivales en la cuenca alta del río Copiapó para el año 05/06.

Un hecho significativo es la perduración de extensiones significativas de nieve a fines de verano. Las dos cuencas parecen tener en este aspecto un comportamiento también diferente. Mientras que la cuenca del Jorquera presenta extensiones inferiores a 2 km^2 al final del verano la del Pulido presenta extensiones próximas a 15 km^2 para ambos años hidrológicos. Esto induce a pensar que la crecida de caudales observada en la segunda subcuenca tiene su origen, más que en la fusión de amplias extensiones de nieve de pequeño espesor, en la fusión de masas más permanentes de nieve, acumuladas en forma de glaciar. En cualquier caso, para justificar la escasa relación observada entre la variación de la superficie de nieve y los caudales medidos en las dos subcuencas consideradas, se han analizado otros mecanismos que potencialmente pueden intervenir en el proceso, a saber: (1) regulación natural a cargo del acuífero aluvial situado aguas arriba de los puntos de aforo, en el que se infiltran las aguas de fusión. (2) fenómenos de sublimación de la nieve debido al elevado poder

evaporante del atmósfera (3) Actividad antrópica relacionada con derivaciones agrícolas y captaciones mineras aguas arriba de los aforos.

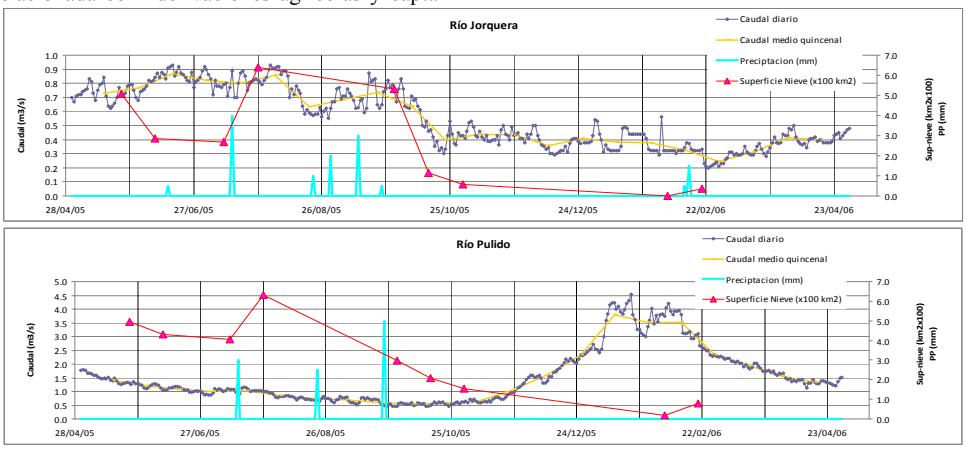


Figura 5: Evolución a lo largo del año hidrológico 2005/06 de la superficie nival, caudal diario, caudal medio quincenal y precipitación en las cuencas del río Jorquera y Pulido, tributarios del Copiapó.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio, en un contexto árido y muy montañoso, las imágenes Landsat en combinación con el índice NDSI han proporcionado muy buenos resultados en lo relativo a identificación de la cubierta nival, incluso en zonas de sombra. La resolución espacial del sensor se adapta bien a estudios a nivel de cuenca y, a diferencia de sensores de mayor resolución temporal (MODIS, AVHRR-NOAA), permite identificar cubiertas nivales de pequeña extensión, propias del final del estiaje. No obstante, la resolución temporal de Landsat puede resultar insuficiente cuando se suceden varias adquisiciones defectuosas. Se ha obtenido la evolución temporal de la cubierta nival para los dos años hidrológicos considerados en el estudio (2000/01 y 2005/06) lo que ha permitido analizar el proceso de fusión y su repercusión sobre los caudales circulantes aguas abajo. En este sentido, el análisis realizado señala que las dos cuencas consideradas (Jorquera y Pulido) presentan un comportamiento claramente diferente, lo que pondría de manifiesto ciertas diferencias respecto a los mecanismos que pueden intervenir en el proceso de generación de caudales. Las hipótesis barajadas apuntan a la importancia de la fusión de acumulaciones permanentes de nieve, tipo glaciar, en la cuenca del Pulido, frente a la escasa importancia de la fusión de grandes extensiones de nieve, que no se traducen en aumento del caudal. A este último hecho debe de contribuir sin duda el efecto regulador del acuífero aluvial situado aguas arriba en los fondos de los valles y los procesos de sublimación directos. Por último, parece conveniente densificar y extender en el tiempo el estudio realizado, al objeto de profundizar los mecanismos de generación de caudales.

BIBLIOGRAFÍA

CHANDER, G. y MARKHAM, B. 2003: *Revised Landsat-5 Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Rangers.* Trans. on Geosciencie and Rem. Sensing, 41, 11, 2674-77.

CHANDER, G., MARKHAM, B. y HELDER, D. 2009: *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors.* Remote Sensing of Environment 113, 893–903.

CHAVEZ, P.S. 1996: Image-Based Atmospheric Corrections. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62, 9, 1025-1036.

DOZIER, J. 1989: *Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper*. Remote Sensing of Environment, 28, 9-22.

GOMEZ-LANDESA, E. y RANGO, A. 2000: *Improved snow cover remote sensing for snowmelt runoff forecasting.* Remote Sensing and Hydrology. Proceedings of a Symp. Publ 267. New Mexico, USA.

SILVERIO, W & JAQUET, J. 2005: *Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery.*Remote Sensing of Environment, 95, 342-350.

Detección de cambios en zonas forestales para la actualización de SIOSE-Andalucía 2005 a 2009 con imágenes SPOT-5 (REDIAM)

I.R. Carpintero[2], L. Granado[2], E. Méndez[2], G. Montoya[2], I. Pino[2], R. Prieto[2], J.J. Vales[2], F. Giménez de Azcarate[2], F. Cáceres[1] y J. M. Moreira[1]

[1] DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO SOSTENIBLE E INFORMACIÓN AMBIENTAL. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Avda. Manuel Siurot, 50, 41071. Sevilla (España). Telf: 955003429, Fax. 955003795. Correo electrónico: {josem.moreira, francisco.caceres}@juntadeandalucia.es

[2] DEPARTAMENTO DE COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN. Agencia de Medio Ambiente y Agua, Johan Gutenberg, 1 (Isla de la Cartuja), 41092 Sevilla (España). Telf: 955044529, Fax. 955625140. Correo electrónico: {fgimenezdeazcarate, jvales, emendez, gmontoya, icarpintero, ipino, lgranado, rprieto}@agenciademediambienteyagua.es

RESUMEN

Para la actualización de la zona forestal de SIOSE-Andalucía 2005 al año de referencia 2009 se ha visto imprescindible el uso de técnicas de teledetección de detección de cambios con imágenes SPOT-5. El desarrollo metodológico se ha basado en el uso de las diferencias entre las imágenes de ambas fechas como indicador de cambio, y la clasificación no supervisada como herramienta para su identificación. Los resultados alcanzados presentan errores mínimos por omisión, reduciendo considerablemente la superficie a revisar en la actualización, y con errores por comisión muy bajos en relación al beneficio aportado por el método.

Palabras clave: clasificación no supervisada, análisis de cambios, SIOSE, actualización cartográfica, mapa de usos, SPOT-5, Plan Nacional de Teledetección.

ABSTRACT

The update of the SIOSE 2005 Forest area, with the reference data from 2009, has been performed with remote sensing techniques for changes detection by using SPOT-5 imagery. The methodology is based in the use of differences between images from both periods as a change index, and the non supervised classification as an identification tool. The results achieved have minimal omission errors and it has significantly reduced the surface to be reviewed in this update, with a few commission errors in relation to the benefit achieved by implementing this methodology.

Keywords: *non supervised classification, change detection, SIOSE, map updating, land use map, SPOT-5, National Plan of Remote Sensing (PNT).*

INTRODUCCIÓN

SIOSE-Andalucía es el Sistema que integra toda la información referente a los usos y coberturas del suelo de la región andaluza a escala 1:10.000. Para su ejecución en 2005 se procedió principalmente a la fotointerpretación por barrido de todo el territorio, además de llevar a cabo la integración de cartografía y bases de datos existentes hasta la fecha. Como información de referencia se utilizó la cobertura de imágenes SPOT-5 del año 2005 procedentes del Plan Nacional de Teledetección (PNT), y la cobertura de ortofotografías (PNOA) de los años 2004 (Sur) y 2005 (Norte) (Gil, Y. *et al.,* 2010).

En la nueva etapa SIOSE-Andalucía se pretende obtener no sólo una actualización cartográfica, sino la obtención de la consecuente capa de cambios que proporciona una información mucho más completa del territorio (Romero, D. *et al.,* 2010). Dado que se estima que gran parte de la superficie no ha sufrido ningún cambio que suponga una modificación de su clase de leyenda SIOSE, se ha desarrollado una metodología basada en técnicas de teledetección, equiparando los cambios a diferencias, y trabajando con la diferencia entre las dos fechas de referencia (2005 y 2009).

El desarrollo metodológico establece el punto de partida en la detección de cambios tanto de tipo como de forma y textura, para lo que se trabaja conjuntamente con las bandas multiespectrales y pancromáticas de las imágenes SPOT-5. Se trabaja asimilando los cambios a diferencias, y utilizando la clasificación no supervisada para su identificación.

El resultado de este procedimiento es una capa de cambios por unidad de trabajo (Andalucía se divide en 42 unidades) que minimiza los errores por omisión y reduce los errores por comisión hasta niveles muy asumibles en el ámbito del proyecto, dirigiendo al fotointérprete a las zonas de cambio de manera que se reduce en más del 75% el número de polígonos a revisar, y por lo tanto se reducen considerablemente los tiempos de ejecución y el presupuesto del proyecto.

ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE PARTIDA

El área de estudio de este proyecto es la parte dedicada a uso forestal de Andalucía, que supone aproximadamente un 52% del total de la superficie (4.543.591,34 ha).

La información de partida consta de dos coberturas de 42 imágenes SPOT-5, procedentes del Plan Nacional de Teledetección (PNT), tomadas del 15 de junio al 15 de septiembre de 2005 y 2009. La captura se realizó en modos multiespectral y pancromático, y posteriormente se corrigieron geométricamente usando como remuestreo la convolución bicúbica.

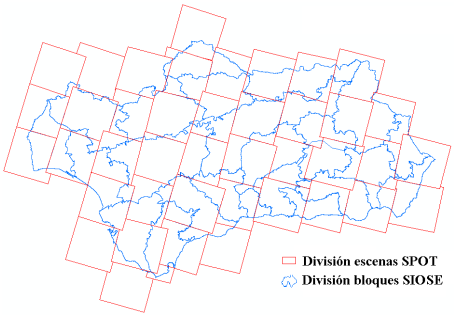


Figura 1: Distribución de las unidades de trabajo por escenas SPOT y bloques SIOSE.

También se parte de SIOSE 2005, del que se extrae la máscara forestal, que delimita la zona de trabajo y supone la referencia para determinar los cambios.

Dada la dimensión del área de estudio y la distribución de las escenas, se hace imprescindible la fragmentación del territorio, como se muestra en la figura 1.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se centra en la detección de cambios tanto de "tipo" de cobertura como de "forma y textura" de la misma. El fundamento metodológico es la definición de un cambio como una diferencia entre las dos imágenes. Este principio funciona bastante bien en las zonas forestales, siempre que las imágenes sean aproximadamente de la misma fecha y la climatología haya seguido unos patrones cercanos a la normalidad, lo que se traduce en que la vegetación natural se encuentre en el mismo estado fenológico.

Las fases metodológicas se dividen en tres:

Fase 1

La primera fase consiste en un exhaustivo preprocesado y normalización de las imágenes para eliminar las diferencias entre ambas fechas debidas a las condiciones propias de captura (efecto atmosférico, iluminación, etc.). Esta fase comprende dos etapas de trabajo bien definidas:

Transformación de nivel digital (ND) a reflectividad

Las imágenes están en ND y para poder utilizarlas de forma comparativa en el tiempo hay que transformarlas a valores de reflectividad. Para ello, en primer lugar se hace la conversión de ND a valores físicos de radiancia, para lo que se aplican los datos de ganancia propios de cada imagen (G. Chander and B. Markham, 2003).

Para las imágenes pancromáticas se ha optado por la transformación a reflectividad en el techo de la atmósfera (TOA), en lugar de reflectividad de superficie, porque la banda PAN es muy ancha y los efectos atmosféricos se difuminan mucho. La relación utilizada es la dada por Vermote *et al.,* 1997.

Sin embargo, con las imágenes multiespectrales sí es imprescindible eliminar el efecto atmosférico, por lo que se trabaja con reflectividad de superficie, aplicando una corrección atmosférica con un algoritmo basado en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN-4 (Modtran Users Manual, 1998 y L. Alados-Arboledas *et al.,* 2008). Dadas las condiciones atmosféricas de humedad y temperatura de la

Región, principalmente se han utilizado dos modelos de atmósfera: latitudes medias de verano y tropical; y dado que la zona de estudio es de uso forestal, casi siempre se ha usado el modelo de aerosol rural (L. Alados-Arboledas, 2009).

Normalización de las imágenes

Para la normalización entre ambas fechas se ha decidido tomar como referencia la cobertura de 2009, dado que las imágenes tienen mayor nitidez porque han sido capturadas con menor ángulo que en 2005. El procedimiento se basa en la selección de entre 250 y 300 puntos de control por escena, en los que las imágenes de ambas fechas son iguales, y posteriormente extraer el valor de la imagen en todos esos puntos. Con esa información se calculan las ecuaciones de regresión de cada banda, tomando la imagen de 2005 como variable independiente y 2009 como dependiente: 2009=A*2005+B

Los coeficientes de regresión en las 24 escenas tratadas hasta el momento dan muy buenos resultados, con un R^2 medio total de 0.93, y por bandas: B1 0.929; B2 0.939; B3 0.924; B4 0.933; PAN 0.90.

Por último se aplican las ecuaciones de regresión a las 5 bandas de 2005, obteniéndose una imagen normalizada a 2009.

Fase 2

La segunda fase se centra en la elaboración de una imagen a la que llamamos "diferencia", que procede del cálculo de la diferencia entre ambas fechas (09-05). Para incidir sobre los cambios de "tipo" de cobertura del suelo, se ha utilizado la parte multiespectral de la imagen, dando mucho peso a la relación existente entre la reflectividad en el rojo y el infra-rojo próximo, usando para ello el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), pero sin dejar de lado otro tipo de coberturas que se identifican mejor con el verde o el infra-rojo medio, realizando también la diferencia de ambas bandas.

Este estudio se ha apoyado en el análisis textural y estructural de la imagen diferencia de las bandas pancromáticas (a 2,5m de resolución), permitiendo así definir con claridad los objetos y sus bordes (parcelas, árboles, construcciones, infraestructuras, etc.), proporcionando mejores resultados a la hora de distinguir un cambio.

Como resultado, la imagen "diferencia" de cada escena está constituida por 7 bandas: diferencia B1, diferencia B4, diferencia NDVI, diferencia PAN, media (dif. PAN), homogeneidad (dif. PAN), filtro de paso alto (dif. PAN), todas a 10m de resolución.

Fase 3

La última fase metodológica consiste en una clasificación automática no supervisada de la imagen diferencia, limitando las zonas de análisis mediante máscaras. El algoritmo de clasificación utilizado es el ISODATA (Tou, J. T. and R. C. Gonzalez, 1974), que calcula las medias de cada clase uniformemente distribuidas en el espacio e iterativamente agrupa los píxeles restantes usando técnicas de mínima distancia. Cada iteración recalcula las medias y reclasifica los píxeles con respecto a las nuevas medias. Esta fase requiere un conocimiento profundo de la zona y de lo que se quiere obtener con la clasificación, para poder definir correctamente los umbrales de tolerancia y los sucesivos pasos de reclasificación encaminados a agrupar o disgregar clases de cambio.

Por último se procede al postprocesado de la imagen, agrupando todas las clases de cambio en una sola y eliminando el efecto de "sal y pimienta" mediante un filtro de moda (ventana de 3x3). El resultado se vectoriza y se le integra la máscara de nubes, si la hubiera.

RESULTADOS Y VALIDACIÓN

El resultado obtenido para cada una de las escenas es una capa vectorial que indica los cambios ocurridos entre las dos fechas de referencia (05 y 09) y que son susceptibles de cambio en la leyenda SIOSE asignada (Figura 2). A esta capa se le eliminan los polígonos menores de 2000m^2 para evitar guiar al fotointérprete a puntos que no supongan un cambio real y considerable en la leyenda SIOSE asignada.

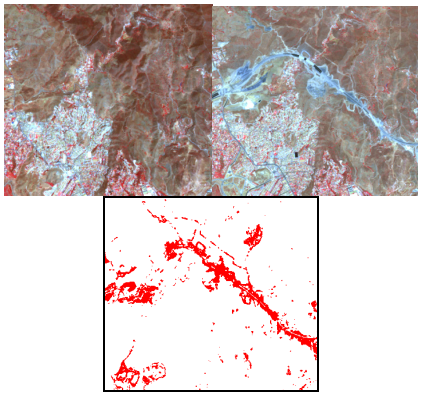


Figura 2: Detalle de zona de cambio. *a) Iz. 2005, b) Dcha. 2009, c) capa de cambio.*

De los resultados obtenidos hasta la fecha (procesadas 24 escenas) se deduce que la reducción de superficie media de los polígonos a revisar por el equipo de fotointerpretación es del 53%, con superficie media de cambio del 7,4%.

Estos resultados suponen que la media del número de polígonos forestales de SIOSE afectados por cambio sea del 24,7%, contando con algunas escenas en que los valores descienden incluso hasta el 8.5%.

Respecto a la validación de resultados, con la metodología desarrollada se ha conseguido que los errores por omisión (cambios no detectados) sean prácticamente nulos y aceptables en el ámbito del proyecto. Sin embargo, para conseguir esto se ha tenido que admitir una capa de cambios con ciertos errores por comisión (falsos cambios) que se asemejan bastante a cambios reales que no podían quedar fuera de la capa resultante. Este tipo de errores es variable dependiendo del tipo de escena, siendo más altos en los casos en que la zona tiene un relieve muy abrupto o que las imágenes de ambos años tienen condiciones de captura muy diferentes. Aún así, finalizadas 3 zonas, sólo el 12,5% de la superficie indicada como cambio es un error por comisión, es decir que el 6,9% de los polígonos indicado como cambio, no lo es realmente.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con este trabajo suponen una herramienta de grandísima utilidad porque proporcionan una capa de información idónea para la fotointerpretación dirigida, con un porcentaje de fiabilidad muy alto, reduciéndose de forma considerable los tiempos de ejecución del proyecto.

Teniendo en cuenta la diversidad de tipos de cobertura del suelo que tiene Andalucía, es muy importante el hecho de haber desarrollado una metodología común para todos ellos, que reduce extensamente los errores no sistemáticos.

BIBLIOGRAFÍA

ALADOS-ARBOLEDAS L., 2009, *Informe final para la Consejería de Medio Ambiente: Determinación y evaluación de parámetros atmosféricos para la corrección atmosférica de las imágenes de la REDIAM.* Univ. de Granada.

ALADOS-ARBOLEDAS L. y GIL J. E., 2008, *Informe técnico del desarrollo de Modelos para el Pretratamiento y tratamiento de las imágenes de satélite de la REDIAM*, Universidad de Granada.

CHANDER G. AND MARKHAM B. *Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration. Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, VOL. 41, NO. 11, november 2003

GIL, Y., ROMERO, D., ORTEGA, E., DOMÍNGUEZ, M.C., NAVAS, P., PATIÑO, M., VICENT, C., SANTOS, M., QUIJADA, J., GIMÉNEZ DE AZCÁRATE, F., CÁCERES, F. Y MOREIRA, J.M. (2010): *SIOSE Andalucía, experiencia de integración y actualización de bases cartográficas multiescala.* En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 116-134. ISBN: 978-84-472-1294-1

MODTRAN USERS MANUAL, Versions 3.7 and 4.0, Air Force Res. Lab., Hanscom AFB, MA, 1998.

ROMERO, D., GIL, Y., ORTEGA, E., DOMÍNGUEZ, M.C., NAVAS, P., PATIÑO, M., VICENT, C., SANTOS, M., QUIJADA, J., GIMÉNEZ DE AZCÁRATE, F., CÁCERES, F. Y MOREIRA, J.M. (2010): *Actualización SIOSE en Andalucía 2009*. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos.* Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 348-361. ISBN: 978-84-472-1294-1.

TOU, J. T. AND R. C. GONZALEZ, 1974. *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

VERMOTE E.F., TANRÉ D., DEUZÉ J.L., HERMAN M., MORCRETTE J.J., 1997, *Second Simulation of the Satellite Signal in the solar Spectrum: an overview,* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35, 3, 675-686.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen todo su apoyo y colaboración al equipo de SIOSE Andalucía y al equipo REDIAM de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

Mapas de composición de suelos utilizando imágenes Landsat-Thematic Mapper

E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Facultad de Física, Universidad de Valencia. E-46100 Burjassot (Valencia, España). Correo electrónico: eduardo.caselles@uv.es

RESUMEN

Para determinar la composición del suelo, normalmente, se usan análisis granulométricos y mineralógicos; utilizando para ello la toma de muestras de suelos y la realización de perfiles. Esta forma de proceder requiere, aproximadamente, la toma de una muestra por ha, lo que alarga y encarece enormemente este tipo de estudios. Sin embargo, las correlaciones entre los datos de reflectividad espectral nos permiten obtener la composición del suelo. Así, en este trabajo, para determinar las características del suelo (contenidos en arena, arcilla y materia orgánica), hemos utilizado las reflectividades en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 del Thematic Mapper (Nanni y Dematte, 2006) del Landsat (TM1 a TM7):

$Arena^{1/2} = 13'54 + 0'934\ TM1 - 0'228\ TM5 + 0'663\ TM7$
$Arcilla^{1/2} = 27'03 - 1'260\ TM1 + 0'363\ TM3 - 0'301\ TM4 + 0'305\ TM5 - 0'848\ TM7$
$Materia\ Orgánica^{1/2} = 7'084 - 0'109\ TM7 - 0'102\ TM2$

Como zona de estudio hemos elegido una isla del Danubio, situada en las proximidades de la población de Roseti, en el partido judicial de Calarasi, en Rumania. Las coordenadas geográficas de la isla son: entre 44º 07' y 44º 13' de latitud Norte y entre 27º 19' y 27º 34' de longitud Este. Los contenidos medios de arena, arcilla y materia orgánica, durante el periodo 2007-2010, para la zona de estudio fueron del 21 %, 69 % y 5 %, respectivamente. Estos resultados se validaron mediante la toma de muestras "in situ" y las diferencias entre los valores medidos y determinados fueron inferiores al 2 %. Lo que da validez a la técnica propuesta en esta comunicación.

Palabras clave: materia orgánica, contenido en arena, contenido en arcilla, Thematic Mapper

ABSTRACT

To determine the soil composition, normally, granulometric and mineralogical analyses are used; therefore routine soil testing and profiling are used. This way of procedure requires, approximately, to take a sample per ha, which is expensive and time-consuming. However, remote sensing constitutes an ideal tool for determining soil composition. A correlation between the different bands of the electromagnetic spectrum and the soil properties permits us to know the soil attributes. Then, in this communication the reflectances of Thematic Mapper in bands 1, 2, 3, 4, 5 and 7 (TM1 to TM7) are used to determine the soil characteristics (sand, clay and organic matter contents) (Nanni y Dematte, 2006):

$Sand^{1/2} = 13'54 + 0'934\ TM1 - 0'228\ TM5 + 0'663\ TM7$
$Clay^{1/2} = 27'03 - 1'260\ TM1 + 0'363\ TM3 - 0'301\ TM4 + 0'305\ TM5 - 0'848\ TM7$
$Organic\ Matter^{1/2} = 7'084 - 0'109\ TM7 - 0'102\ TM2$

As study area we have selected an island of the Danube, located near the Roseti village, Calarasi district, in Romania. The geographical coordinates of the island are: between 44º 07' and 44º 13' N latitude and between 44º 07' and 44º 13' E longitude. The sand, clay and organic matter average contents of the island for the period 2007-2010 were 21 %, 69 % and 5 %, respectively. These results were validated using "in situ" measurements and an agreement between the measured and calculated values lower than 2 % was obtained. That gives validity to the proposed technique in this communication.

Keywords: *organic matter, sand content, clay content, Thematic Mapper.*

INTRODUCCIÓN

La toma rutinaria de muestras de suelos utiliza los análisis granulométricos y mineralógicos como técnicas básicas para determinar la composición del suelo. Estos métodos de diagnóstico han sido aceptados como consecuencia de la investigación básica llevada a cabo y el ingente número de pruebas que se han hecho desde su establecimiento. Una gran mayoría de los planes medioambientales y agrícolas requieren análisis de suelos. Las muestras de suelo son normalmente el resultado de promedios de 15 a 20 muestras individuales que se han tomado en zonas de 12 a 20 ha. En algunos casos, como en zonas en las que se realiza agricultura de precisión, se recomienda tomar una muestra cada ha. Sin embargo, y aunque los análisis de suelos son muy necesarios, son muy costosos y laboriosos a la vez.

La teledetección es un método alternativo para determinar los atributos del suelo. Correlaciones entre los datos de reflectividad espectral nos permiten obtener la composición del suelo (Rowan y Mars, 2002; Vaughan et al., 2005; Frazier and Cheng, 1989).

El objetivo de este artículo es proporcionar mapas de composición del suelo (contenidos en arena, arcilla y materia orgánica) utilizando técnicas de teledetección para una isla del Danubio.

METODOLOGIA Y RESULTADOS

Se utilizaron para ello imágenes Landsat-TM de la isla. Las cuentas digitales se transformaron en radiancias a nivel de satélite, después se convirtieron en reflectividades, y finalmente en reflectividades a nivel del suelo siguiendo la metodología propuesta por Caselles y López-García (1989), que hemos resumido en la Figura 1.

Mapa de contenido de arena

El mapa de contenido de arena de la isla fue estimado a través de la expresión (Nanni y Dematte, 2006):

$$\text{Arena}^{1/2} = 13'54 + 0'934\ \text{TM1} - 0'228\ \text{TM5} + 0'663\ \text{TM7} \quad (1)$$

donde TM1, TM5 y TM7 son las reflectividades a nivel del suelo de los canales 1, 5 y 7 del Thematic Mapper del Landsat.

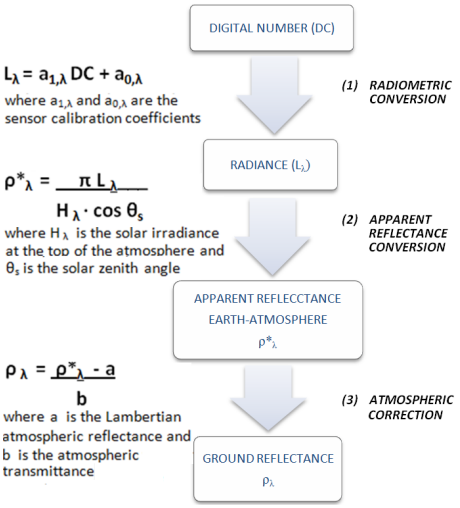


Figura 1: Resumen de la metodología usada.

La Figura 2 representa el mapa de contenido de arena de la isla del Danubio en junio de 2007. Podemos observar que los valores varían entre 19 y 23 % y que los valores máximos se localizan en la parte noreste de la isla.

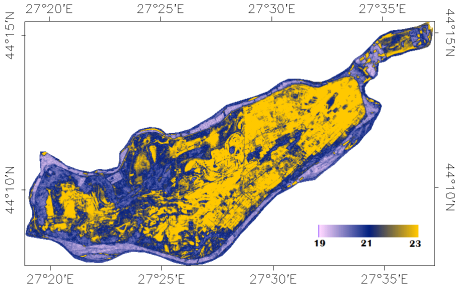


Figura 2: Contenido en arena de la isla en junio de 2007. Los valores están expresados en porcentajes.

Mapa de contenido en arcilla

El contenido en arcilla de la isla se estimó a través de la expresión (Nanni y Dematte, 2006):

$$\text{Arcilla}^{1/2} = 27'03 - 1'260\ \text{TM1} + 0'363\ \text{TM3} - 0'301\ \text{TM4} + 0'305\ \text{TM5} - 0'848\ \text{TM7} \quad (2)$$

donde TM1, TM3, TM4, TM5 y TM7 son las reflectividades a nivel del suelo de los canales 1, 3, 4, 5 y 7 del sensor Thematic Mapper del satélite Landsat.

La Figura 3 representa el mapa de contenido en arcilla de la isla del Danubio en junio de 2007.

Podemos observar que los valores están entre el 67 y el 71 %. Los valores máximos se localizan en la parte oeste de la isla.

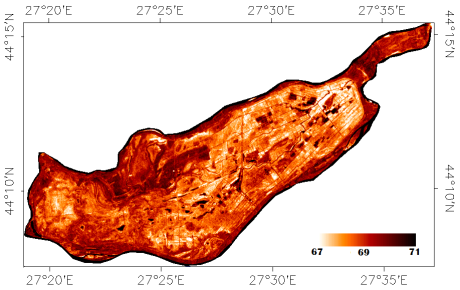


Figura 3: Mapa del contenido en arcilla de la isla para junio de 2007. Los valores vienen dados en porcentajes.

Mapa de contenido en materia orgánica

El contenido en materia orgánica se estimó a través de la expresión (Nanni y Dematte, 2006):

$$\text{Materia Orgánica}^{1/2} = 7'084 - 0'109\ TM7 - 0'102\ TM2 \quad (3)$$

donde TM2 y TM7 son las reflectividades a nivel del suelo medidas en los canales 2 y 7 del Thematic Mapper del satélite Landsat.

La Figura 4 representa el mapa de contenido en materia orgánica de la isla en junio de 2007. Podemos observar que los valores oscilan entre 4,5 y 4,9 %. Localizándose los valores máximos en las partes central y oriental de la isla.

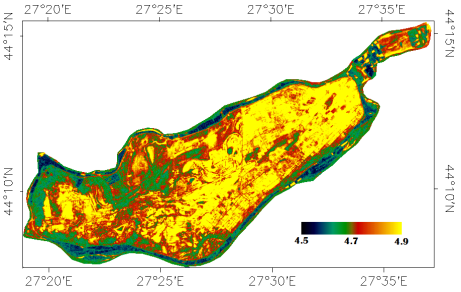


Figura 4: Mapa de contenido en materia orgánica de la isla para junio de 2007. Los valores vienen dados en porcentajes.

Validación de resultados

Para validar los resultados obtenidos, hemos realizado un estudio de los parámetros propuestos (contenidos en arena, arcilla y materia orgánica) para el periodo 2007 a 2010.

Se ha obtenido las imágenes correspondientes a los distintos años. Los resultados a los que hemos llegado los hemos representado en las Figuras 5a, 5b y 5c para los contenidos en arena, arcilla y materia orgánica, respectivamente.

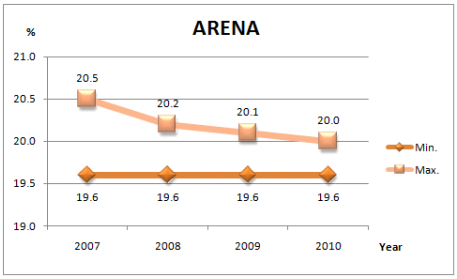


Figura 5a: Evolución del contenido en arena.

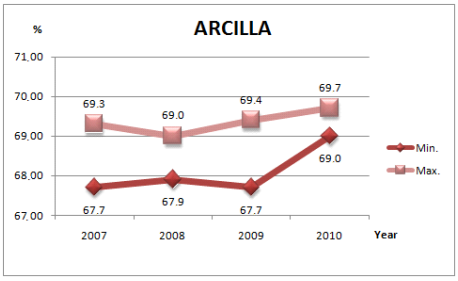


Figura 5b: Evolución del contenido en arcilla.

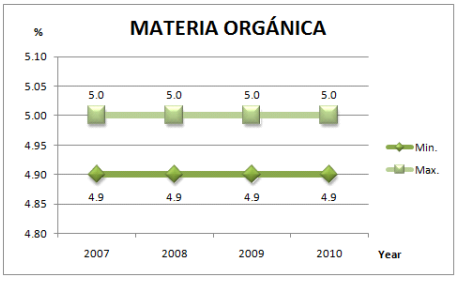


Figura 5c: Evolución del contenido en materia orgánica.

Para observar la evolución durante el periodo 2007 a 2010, en las figuras 5 se han representado dos series de datos en cada gráfica: una para los valores máximos y otra para los valores mínimos. Se observa un porcentaje estable para la materia orgánica, una ligera disminución en el valor máximo de la arena (de 20,5 a 20,0) y un aumento no significativo para los valores máximos y mínimos de los porcentajes de arcilla (de 67,7 a 69,0 y de 69,3 a 69,7). Por tanto, podemos concluir que, en líneas generales, los valores

permanecen constantes para el período estudiado, como debe de ser para el caso de una isla. Lo que significa que el método de Danni y Dematte (2006) es un método adecuado para determinar los contenidos en arena, arcilla y materia orgánica de los suelos.

Los contenidos medios de arena, arcilla y materia orgánica, durante el periodo 2007-2010, para la zona de estudio fueron del 21 %, 69 % y 5 %, respectivamente. Los resultados se validaron mediante la toma de muestras "in situ" y las diferencias entre los valores medidos y determinados fueron inferiores al 2 %. Lo que da validez a la técnica propuesta en esta comunicación.

CONCLUSIONES

Para determinar la composición del suelo, normalmente, se usan análisis granulométricos y mineralógicos; utilizando para ello la toma de muestras de suelos y la realización de perfiles. Esta forma de proceder requiere, aproximadamente, la toma de una muestra por hectárea, lo que alarga y encarece enormemente este tipo de estudios.

Sin embargo, la teledetección constituye una herramienta ideal para determinar la composición del suelo. Correlaciones entre las distintas bandas del espectro electromagnético y las propiedades del suelo nos permiten conocer los atributos del mismo. Así, en este trabajo, para determinar las características del suelo (contenidos en arena, arcilla y materia orgánica), hemos utilizado las reflectividades en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 del Thematic Mapper (Nanni y Dematte, 2006) del Landsat (TM1 a TM7):

$$\text{Arena}^{1/2} = 13'54 + 0'934\ TM1 - 0'228\ TM5 + 0'663\ TM7$$

$$\text{Arcilla}^{1/2} = 27'03 - 1'260\ TM1 + 0'363\ TM3 - 0'301\ TM4 + 0'305\ TM5 - 0'848\ TM7$$

$$\text{Materia Orgánica}^{1/2} = 7'084 - 0'109\ TM7 - 0'102\ TM2$$

Como zona de estudio hemos elegido una isla del Danubio, situada en las proximidades de la población de Roseti, en el partido judicial de Calarasi, en Rumania. Los contenidos medios de arena, arcilla y materia orgánica, durante el periodo 2007-2010, para la zona de estudio fueron del 21 %, 69 % y 5 %, respectivamente. Estos resultados se validaron mediante la toma de muestras "in situ" y las diferencias entre los valores medidos y determinados fueron inferiores al 2 %. Los óxidos presentes en los suelos se tratarán en un trabajo futuro.

BIBLIOGRAFÍA

CASELLES, V. and LÓPEZ-GARCÍA, M. J., 1989. *An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies.* International Journal of Remote Sensing, 10, 1127-1134.

FRAZIER, B. E. and CHENG, Y., 1989. *Remote sensing of soils in the eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper*. Remote Sensing of Environment, 28, 317-325.

NANNI, M. R. and DEMATTE, J. A. M., 2006. *Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis.* Soil Science Society American Journal, 70, 393-406.

ROWAN, L. C. and MARS, J. C., 2002. *Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) data*. Remote Sensing of Environment, 84,350-366.

VAUGHAN, R. G., HOOK, S. J., CALVIN, W. M. and TARANIK, 2005. *Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multiwave length thermal infrared images.* Remote Sensing of Environment, 99, 140-158.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Generalitat Valenciana (proyecto PROMETEO/2009/086) y al Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto CGL2010-17577) la financiación recibida.

Determinación del nivel freático del agua subterránea de una isla mediante imágenes del altímetro ASTER

E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Facultad de Física, Universidad de Valencia. 46100 Burjassot (Valencia, España). Correo electrónico: eduardo.caselles@uv.es

RESUMEN

Para determinar el nivel freático del agua subterránea se usan, normalmente, medidas tomadas desde avión, determinaciones mediante resistímetros o realizando perforaciones. Esta forma de proceder requiere, aproximadamente, la toma de una muestra por hectárea, lo que alarga y encarece considerablemente este tipo de estudios. Sin embargo, la teledetección espacial constituye una herramienta ideal para determinar el nivel freático del agua subterránea. Así, en este trabajo, hemos utilizado las medidas obtenidas por el altímetro del satélite ASTER. El nivel freático del agua subterránea de una isla viene determinado, de forma aproximada, por la diferencia entre el nivel de cada punto de la isla y el que tenga el agua del río en ese momento. Así, el nivel freático del agua subterránea de una isla será, por tanto, variable a lo largo del año. Como zona de estudio hemos elegido una isla del Danubio, situada en las proximidades de la población de Roseti, en el partido judicial de Calarasi, en Rumania. Las coordenadas geográficas de la isla son: entre 44º 07' y 44º 13' de latitud Norte y entre 27º 19' y 27º 34' de longitud Este. El nivel freático del agua subterránea para la zona de estudio, determinado el 30 de junio de 2008, resultó tener un valor variable entre 1 y 8 m. Estos resultados se validaron mediante un mapa topográfico de la zona y la toma de muestras "in situ" realizando algunas perforaciones y las diferencias entre los valores medidos y determinados fueron inferiores a 1 m.

Palabras clave: nivel freático, agua subterránea, altímetro, ASTER, isla, Danubio.

ABSTRACT

To determine the water table depth it can be used normally plane measurements, resistimeters determinations or perforation analyses. This way of procedure requires, approximately, to take a sample per hectare, which is expensive and time-consuming. However, remote sensing constitutes an ideal tool for determining water table depth. Then, in this work we have used the measurements carried out by the altimeter of satellite ASTER. The water table depth of an island can be approximately determined by means of the difference between the altitude of each point in the island and the altitude of the river in this moment. So, the water table depth of an island is variable trough the year. As study area we have selected an island of the Danube, located near the Roseti village, Calarasi district, in Romania. The geographical coordinates of the island are: between 44º 07' and 44º 13' N latitude and between 44º 07' and 44º 13' E longitude. The water table depth, measured on 30 June, 2008, was variable between 1 and 8 m. These results were validated using a topographical map of the area and making some in situ perforations and an agreement between the measured and calculated values lower than 1m were determined.

Keywords: *water table depth, ground water, altimeter, ASTER, island, Danube.*

INTRODUCCIÓN

La toma rutinaria de muestras del nivel freático del agua subterránea utiliza vuelos de avión, análisis con resistímetros o simplemente perforaciones. Estos métodos de diagnóstico han sido aceptados como consecuencia de la investigación básica llevada a cabo y el ingente número de pruebas que se han hecho desde su establecimiento. Una gran mayoría de los planes medioambientales y agrícolas requieren análisis del nivel freático. Las muestras de suelo son normalmente el resultado de promedios de 15 a 20 muestras individuales que se han tomado en zonas de 12 a 20 ha.

En algunos casos, como en zonas en las que se realiza agricultura de precisión, se recomienda tomar una muestra cada hectárea. Sin embargo, y aunque los análisis del nivel freático son muy necesarios, son muy costosos y laboriosos a la vez.

La teledetección es un método alternativo para determinar el nivel freático del agua subterránea (Rodell and Famiglietti, 2002; Becker, 2006; Rodell et al., 2007; Strassberg, et al., 2007; Abbel-Hady an Karbs, 1971; Reutov and Shutko, 1992).

El objetivo de este artículo es proporcionar mapas de nivel freático para una isla del Danubio.

METODOLOGIA Y RESULTADOS

No se disponía de mapas geológicos ni de mapa de usos de suelos, por ello se utilizaron imágenes ASTER de la isla. El nivel freático en una isla viene altamente afectado por el nivel de agua del río, en nuestro caso por el nivel de las aguas del Danubio.

En el peor de los escenarios, el nivel freático sería el mismo que el del río (Boluda, 2010). Así determinando la diferencia entre la altura de un punto cualquiera y la altura de las aguas del Danubio podemos conocer fácilmente el nivel freático de las aguas en ese punto. La Figura 1 ilustra esto mismo de manera más clara.

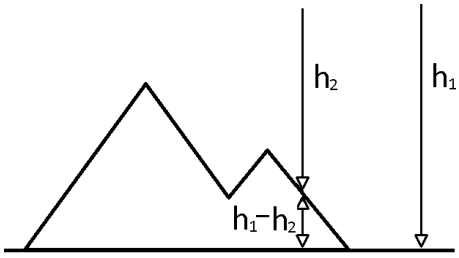


Figura 1: Esquema seguido para determinar el nivel freático de las aguas subterráneas de una isla de río cualquiera.

Mapa del nivel freático del agua subterránea de la Isla del Danubio

El mapa del nivel freático del agua subterránea de la isla del Danubio viene dado en la Figura 2. Así, tenemos 8.279 ha con un nivel freático de 2 metros o menos. 1.504 ha con un nivel freático de 3 metros, 1.095 con un nivel freático de 4 metros, 812 ha con un nivel freático de 5 metros, 649 ha con un nivel freático de 6 metros, 506 ha con un nivel freático de 7 metros y 976 ha con un nivel freático de 8 o más metros.
Como la altura de la superficie de la isla se ha medido utilizando un altímetro localizado a bordo de un satélite, ha sido necesario filtrar las medidas para eliminar los datos erróneos.

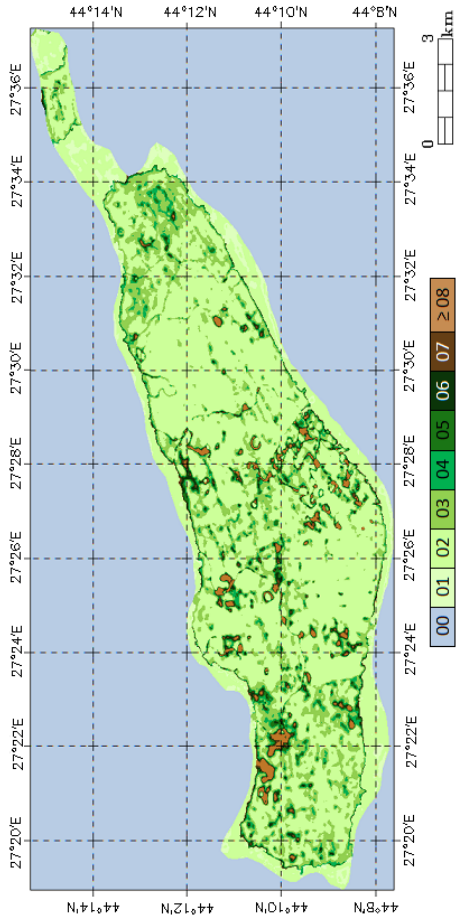


Figura 2: Mapa del nivel freático del agua subterránea de la isla del Danubio obtenido con el altímetro del ASTER. Este mapa se finalizó el 30 de Junio de 2008. Las unidades son metros.

En nuestro caso los errores en alturas fueron causados por grupos de álamos situados en los bordes de la isla.

Validación de resultados

Para validar los resultados obtenidos, hemos usado un mapa topográfico del Servicio Topográfico de la Unión Soviética que nos ha gentilmente proporcionado el Instituto Cartográfico de Cataluña. A partir de éste hemos obtenido, siguiendo el mismo procedimiento, un nuevo mapa del nivel freático del agua subterránea de la isla del Danubio (Figura 3).

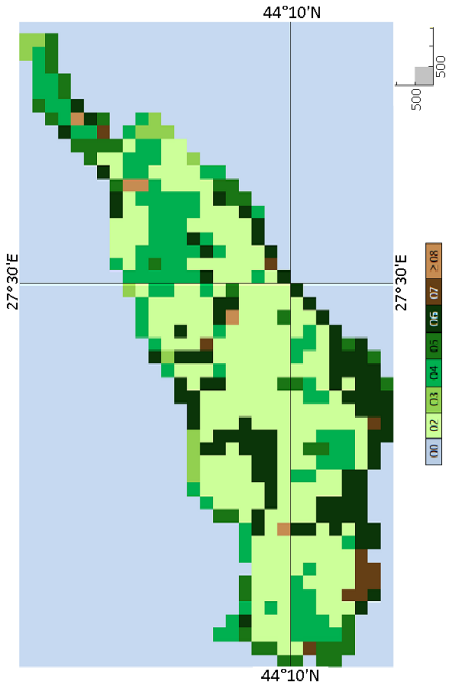


Figura 3: Mapa del nivel freático obtenido a partir del mapa topográfico de la Unión Soviética de 1991. Las unidades son metros.

Se observa una buena correspondencia entre ambos mapas salvo en la parte sur situada alrededor de los 44º9'N y 27º26'E donde los valores de la figura 2 son mayores que los de la figura 3. Ello puede ser debido a trabajos realizados en la isla durante el periodo transcurrido entre las fechas de los dos mapas.

El nivel freático del agua subterránea para la zona de estudio, determinado el 30 de junio de 2008, resultó tener un valor variable entre 1 y 8 m. Estos resultados se validaron además con la toma de muestras "in situ" realizando algunas perforaciones y las diferencias entre los valores medidos y determinados fueron inferiores a 1 m.

CONCLUSIONES

Para determinar el nivel freático del agua subterránea se usan, normalmente, medidas tomadas desde avión, determinaciones mediante resistímetros o perforaciones. Esta forma de proceder requiere, aproximadamente, la toma de una muestra por hectárea, lo que alarga y encarece considerablemente este tipo de estudios. Sin embargo, la teledetección espacial constituye una herramienta ideal para determinar el nivel freático del agua subterránea. Así, en este trabajo, hemos utilizado las medidas obtenidas por el altímetro del satélite ASTER.

El nivel freático del agua subterránea de una isla viene determinado, de forma aproximada, por la diferencia entre el nivel de cada punto de la isla y el que tenga el agua del río en ese momento. Por tanto, dicho nivel freático será variable a lo largo del año.

Como zona de estudio hemos elegido una isla del Danubio, situada en las proximidades de la población de Roseti, en el partido judicial de Calarasi, en Rumania. El nivel freático del agua subterránea para la zona de estudio, determinado el 30 de junio de 2008, resultó tener un valor variable entre 1 y 8 m. Estos resultados se validaron mediante un mapa topográfico de la zona y la toma de muestras "in situ" realizando algunas perforaciones y las diferencias entre los valores medidos y determinados fueron inferiores a 1 m.

BIBLIOGRAFÍA

ABDEL-HADY, M., and KARBS , H. H., 1971. *Depth to ground-water table by remote sensing.* Journal of the Irrigation and Drainage Division, 97,355-367.

BECKER, M. W., 2006. *Potential for Satellite Remote Sensing of ground Water.* Ground Water, 44, 306-318.

BOLUDA, R., 2010. *Personal Communication*.

REUTOV, E., A., and SHUTKO, A. M., 1992, *Estimation of the depth to a shadow water –table using microwave radiometry.* International Journal of Remote Sensing, 13, 2223-2232.

RODELL, M. and FAMIGLIETTI, J. S., 2002. *The potential for satellite-based monitoring of ground water storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US.* Journal of Hydrology 263, 245-256.

RODELL, M., CHEN, J., KATO, H., FAMIGLIETTI, J. S., NIGRO, J. and WILSON, C. R., 2007. *Estimating ground water storage canges in the Mississipi River basin (USA) using GRACE.* Hydrogeology Journal 15, 159-166.

STRASSBERG, G., SCANLON, B. R., and RODELL, M., 2007. *Comparison of seasonal*

terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater-level measurements from the High Plains Aquifer (USA). Geophysical Research Letters, 34, LI4402, doi:10.1029/2007GL030139

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la GV (proyecto PROMETEO/2009/086) y al MICINN (proyecto CGL2010-17577) la financiación recibida.

Utilidad del NDVI para la discriminación de fases salinas en parcelas con cebada

M A. Casterad[1], C. Portero[1], Y. Berkane[1], I. Barinagarrementeria[2], V. Urdánoz[2], L. Albizua[2] y E. Amezketa[2]

[1] Unidad de Suelos y Riegos (asociada a EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Avda. Montañana, 930. 50059 Zaragoza (España). acasterad@aragon.es

[2] TRACASA. C/ Cabárceno, 6. 31621 Sarriguren (Navarra, España), eamezketa@tracasa.es

RESUMEN

En los suelos de la cuenca media del Ebro con problemas de salinidad edáfica predominan los cereales de invierno, principalmente la cebada, cultivo tolerante a sequía y salinidad. En este trabajo se estudia la utilidad del NDVI derivado de imágenes Landsat para discriminar fases salinas del suelo en parcelas de cebada, como posible herramienta para identificación y vigilancia de la salinidad edáfica. En nueve parcelas de cebada de Huesca y Navarra con diferente grado de afección por salinidad edáfica, se analiza la evolución del NDVI medio ($\overline{\text{NDVI}}$) a lo largo del ciclo de cultivo y el $\overline{\text{NDVI}}$ en cuatro categorías salinas: superficies no salinas (conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada, CEe < 4 dS m^{-1}), ligeramente salinas (4 dS m^{-1} ≤ CEe ≤ 8 dS m^{-1}), moderadamente salinas (8 dS m^{-1} < CEe < 16 dS m^{-1}) y fuertemente salinas (CEe ≥ 16 dS m^{-1}). Las mayores diferencias entre el $\overline{\text{NDVI}}$ de parcelas salinas y no salinas se detectan principalmente en abril. Se corrobora que el NDVI disminuye conforme aumenta la salinidad edáfica. Prácticamente no hay diferencias significativas entre el $\overline{\text{NDVI}}$ de superficies no salinas y ligeramente salinas; se detecta una cierta disminución, más o menos acusada según parcelas, en el $\overline{\text{NDVI}}$ en superficies moderadamente salinas, y una disminución relevante y significativa en superficies fuertemente salinas.

Palabras clave: salinidad, fases salinas, cebada, Landsat, NDVI

ABSTRACT

In the central basin of the Ebro River salt-affected soils are predominantly occupied with winter cereals, mainly barley, which is a crop tolerant to drought and salinity. This work studies the utility of NDVI derived from Landsat images for discriminating soil salinity phases in barley fields, as a possible tool for identification and surveillance of soil salinity. The evolution of mean NDVI ($\overline{\text{NDVI}}$*) along the growing season and the* $\overline{\text{NDVI}}$ *in four soil salinity classes (non-saline, electrical conductivity of the soil saturation extract, ECe < 4 dS* m^{-1}*; slightly saline, 4 dS* m^{-1} *≤ ECe ≤ 8 dS* m^{-1}*; moderately saline, 8 dS* m^{-1} *<ECe < 16 dS* m^{-1}*; and strongly saline, ECe ≥ 16 dS* m^{-1}*) were analyzed in nine barley fields with different degree of soil salinity, located in Huesca and Navarra. The highest differences between* $\overline{\text{NDVI}}$ *of saline and non-saline fields are detected in April. It is corroborated that* $\overline{\text{NDVI}}$ *decreases as soil salinity increases. Practically, there are not significant differences between* $\overline{\text{NDVI}}$ *of non saline and slightly saline areas; a certain decrease, more or less marked depending on parcels, is detected on* $\overline{\text{NDVI}}$ *for moderately saline areas, and a relevant and significant decrease on* $\overline{\text{NDVI}}$ *for strongly saline areas.*

Keywords: *soil salinity, salinity phases, barley, Landsat, NDVI*

INTRODUCCIÓN

La cebada es el cultivo más tolerante a salinidad (Ayers y Westcot, 1985), por ello, es uno de los cultivos predominantes en las áreas salinas del centro del valle del Ebro ya que es una buena alternativa para rentabilizar los suelos salinos. La detección y vigilancia de la salinidad edáfica, una de las principales amenazas en la "Estrategia Temática para la Protección del Suelo" de la Unión Europea, requiere el desarrollo de metodologías operativas, sencillas y que suministren información actualizable de forma ágil.

Los índices espectrales son una de las herramientas de la teledetección que más se han explorado y utilizado para la detección de la

salinidad, siendo el NDVI el más aplicado en zonas de cultivo (Eldeiry y García, 2008). En parcelas de cebada del centro del valle del Ebro (España) Amezketa *et al.* (2011) han encontrado correlaciones significativas entre la salinidad (CEe) y algunos índices espectrales obtenidos a partir de imágenes Landsat, señalando al NDVI como índice apropiado para caracterizar la salinidad edáfica en parcelas con este cultivo.

En este trabajo se estudia la utilidad del NDVI derivado de imágenes Landsat para discriminar fases salinas del suelo en zonas del centro del valle del Ebro cultivadas con cebada.

METODOLOGÍA

Como área de estudio se han elegido nueve parcelas de cebada (Tabla 1) con tamaños entre 1,7 ha y 41,2 ha una vez descontados los píxeles de borde. Cinco parcelas están localizadas en secanos de Navarra (SEC-1 a 5) y cuatro en regadíos de Huesca (REG-1 a 4).

Para cada parcela se ha elaborado un mapa de salinidad en 2009 a partir de lecturas de un sensor electromagético georreferenciado (Amezketa *et al.*, 2011) expresándolo en las siguientes fases salinas establecidas según la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe) a 25ºC: superficies *no salinas* (NS, CEe < 4 dS m^{-1}), *ligeramente salinas* (LS, 4 dS m^{-1} ≤ CEe ≤ 8 dS m^{-1}), *moderadamente salinas* (MS, 8 dS m^{-1} < CEe < 16 dS m^{-1}) y *fuertemente salinas* (FS, CEe ≥ 16 dS m^{-1}). En la Tabla 1 se indica para cada parcela la superficie en las distintas fases salinas que presenta.

Se han obtenido los NDVI correspondientes al periodo enero-julio de 2009. Para ello se han utilizado imágenes Landsat TM y ETM+ correspondientes a las escenas 200/30 y 200/31 para Navarra y 199/031 para Huesca que previamente se habían corregido geométrica y radiométricamente y remuestreado a un tamaño de píxel de 25 m × 25 m. En Navarra la nubosidad de la Landsat ETM+ de abril no permitió obtener el NDVI de la parcela SEC-5.

Finalmente, se ha cruzado el mapa de salinidad en formato ráster con los NDVI derivados de cada imagen y se ha generado una base de datos en la que para cada píxel se tiene: parcela a la que pertenece, fase salina y NDVI de cada fecha. A partir de estos datos se ha calculado por parcela y fase salina, el NDVI medio ($\overline{NDVI}$) y la desviación típica.

	Nº de píxeles de 25m x 25m en cada fase salina				
Parcela	NS	LS	MS	FS	Total
SEC-1	38	21			59
SEC-2	2	147	163	25	337
SEC-3		9	10	8	27
SEC-4	61	7			68
SEC-5	47				47
Secano	148	184	173	33	538
REG-1	1	361	239	51	652
REG-2		6	49	4	59
REG-3	47	122	4		173
REG-4	233	2	0	0	235
Regadío	281	491	292	55	1119
Total	429	675	465	88	1657

Tabla 1: Superficies no salina (NS), ligeramente salina (LS), moderadamente salina (MS) y fuertemente salina (FS) en las parcelas de estudio y en el conjunto de parcelas de secano y de regadío.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las parcela de estudio con superficies *no salinas* y *ligeramente salinas* las curvas de evolución del $\overline{NDVI}$ son muy similares y generalmente presentan los mayores $\overline{NDVI}$. Por el contrario, las superficies *fuertemente salinas* presentan siempre los menores $\overline{NDVI}$ y unas curvas de evolución de $\overline{NDVI}$ algo diferentes al resto. Los valores de $\overline{NDVI}$ de las superficies *moderadamente salinas* tienden, en las parcelas de regadío, a estar más próximos a los de las superficies *no salinas* y *ligeramente salinas* que a los de las *fuertemente salinas*. Debe tenerse en cuenta que el rendimiento de la cebada comienza a verse afectado a partir de una CEe de 8 dS m^{-1}, descendiendo su producción un 10%, 25% y 50% para valores de CEe superiores a 10, 13 y 18 dS m^{-1} respectivamente (Ayers y Westcot, 1985).

En la Figura 1 se muestra como ejemplo algunas curvas de evolución de $\overline{NDVI}$ a lo largo del desarrollo del cultivo.

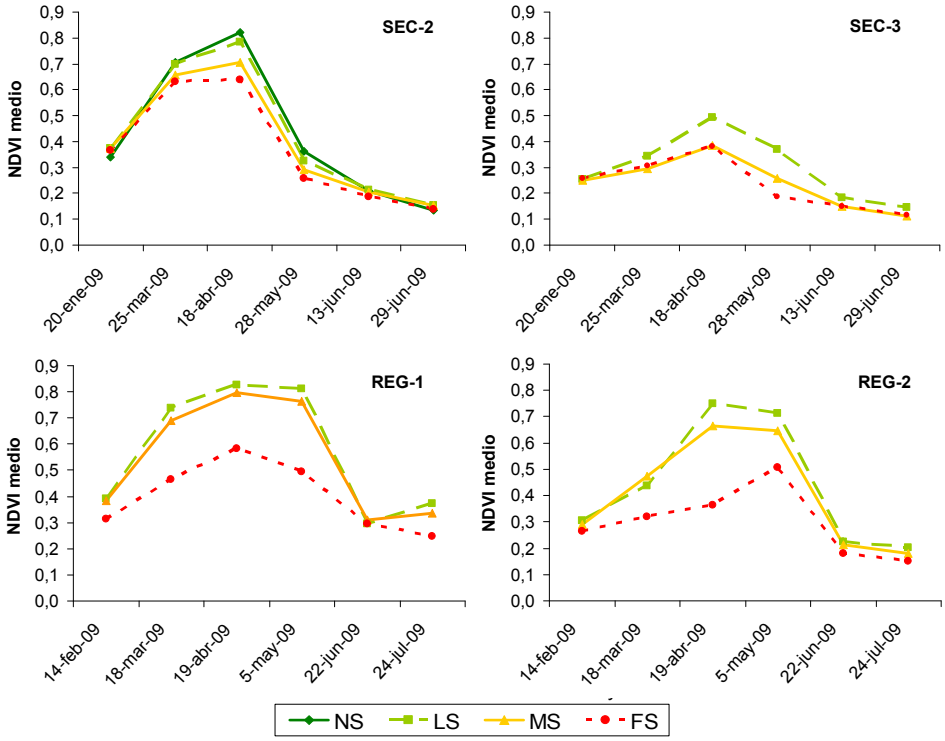


Figura 1: Evolución del NDVI medio en las fases salinas del suelo en algunas de las parcelas de cebada estudiadas. NS-*no salina* (CEe < 4 dS/m), LS-*ligeramente salina* (4 dS m^{-1} ≤ CEe ≤ 8 dS m^{-1}); MS- *moderadamente salina* (8 dS m^{-1} < CEe < 16 dS m^{-1}) y FS-*fuertemente salina* (CEe ≥ 16 dS m^{-1}).

Estas curvas de evolución del $\overline{NDVI}$ (Figura 1) muestran así mismo que de mediados de marzo a finales de mayo las diferencias de desarrollo de la cebada entre las distintas fases salinas se hacen más notables.

Es sobre todo en este periodo donde se observa claramente que existe relación entre NDVI y grado de afección por salinidad, de forma que el $\overline{NDVI}$ disminuye conforme aumenta la salinidad (Figura 2). Así en abril, fecha que se considera más adecuada para la detección y seguimiento con imágenes de satélite de la salinidad edáfica en el centro del valle del Ebro, el $\overline{NDVI}$ de las parcelas de estudio oscila entre 0,70 y 0,82 para las superficies *no salinas* (sin considerar el único píxel de la parcela REG-1, cuyo valor es 0,86); entre 0,66 y 0,82 para las *ligeramente salinas*; entre 0,67 y 0,80 para las *moderadamente salinas*; y entre 0,37 y 0,64 para las fuertemente salinas. Únicamente la parcela SEC-3 presenta en superficies *ligeramente* y *moderadamente salinas* valores más bajos de los indicados (0,5 y 0,4 respectivamente).

El valor inferior de los rangos de $\overline{NDVI}$ indicados para cada superficie salina tiende a disminuir conforme aumenta la salinidad. La disminución del $\overline{NDVI}$ es particularmente relevante en las superficies *fuertemente salinas*, donde los $\overline{NDVI}$ son, en general, inferiores a 0.58, excepto para la parcela SEC-2 con valor de 0, 64 (Figura 2). Las desviaciones típicas son muy variables tendiendo a aumentar conforme aumenta la salinidad (Figura 2).

El mismo estudio realizado para las parcelas agrupadas en regadío y en secano corrobora los resultados anteriores. Una comparación de los $\overline{NDVI}$ de abril mediante test de Tukey muestra que en el regadío los $\overline{NDVI}$ de las superficies *no salinas*, *ligeramente salinas* y *moderadamente salinas* no difieren significativamente (P > 0,05) mientras que en secano, el $\overline{NDVI}$ de las superficies *moderadamente salinas* es significativamente menor (P < 0,05) que en las *no salinas* y *ligeramente salinas* (Figura 2). Tanto en secano como en regadío el $\overline{NDVI}$ de las superficies *fuertemente salinas* es significativamente inferior al de las fases salinas restantes.

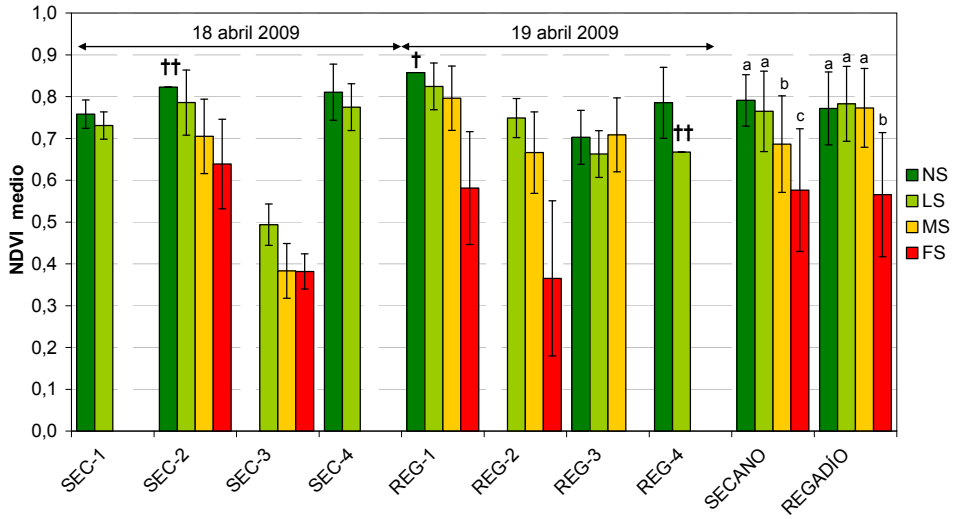


Figura 2: Distribución del NDVI medio de abril y su desviación típica para cada fase salina en las parcelas de cebada estudiadas y en el secano y regadío. NDVI medios con letras diferentes dentro de los grupos secano y regadío son significativamente diferentes (P<0,05). NS-*superficie no salina* (CEe < 4 dS/m), LS-*ligeramente salina* (4 dS m^{-1} ≤ CEe ≤ 8 dS m^{-1}); MS-*moderadamente salina* (8 dS m^{-1} < CEe < 16 dS m^{-1}) y FS-*fuertemente salina* (CEe ≥ 16 dS m^{-1}). † fase salina con 1 píxel, †† fase salina con 2 píxeles.

CONCLUSIONES

En parcelas de cebada del centro del valle del Ebro, el NDVI medio de las superficies fuertemente salinas es significativamente inferior al del resto de clases salinas. Prácticamente no hay diferencias significativas entre el NDVI medio de superficies no salinas y ligeramente salinas, y se detecta una cierta disminución, más o menos acusada según parcelas, en el NDVI medio de superficies moderadamente salinas.

Son necesarios estudios complementarios con mayor número de parcelas y superficies de cada fase salina para poder determinar si el NDVI permite discriminar las zonas moderadamente salinas.

BIBLIOGRAFÍA

AMEZKETA, E., URDANOZ, V., BARINAGARREMENTERIA, I., ALBIZUA, L., BERKANE, Y., PORTERO, C., y CASTERAD, M.A.., 2011. *Validación de índices espectrales para detectar salinidad edáfica en cebada mediante sensores electromagnéticos terrestres*. XIV Congreso Nacional de la Asociación Española de Teledetección (AET). Mieres del Camino (Asturias), 21-23 de septiembre de 2011. 4pp.

AYERS, R.S. y WESTCOT, D.W., 1985. *Water quality for agriculture*. Irrigation and Drainage. Paper nº 29. FAO. Rome, 97 pp.

ELDEIRY, A. y GARCÍA, L., 2008. *Spatial modelling of soil salinity using remote sensing, GIS, and field data.* VDM Verlag Dr. Müller, 97 pp.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el INIA a través del proyecto RTA08-083-C02-00; por el DDRyMA (Gobierno de Navarra); y por el MICIIN y el Fondo Social Europeo (Programa Torres Quevedo, PTQ-08-03-07315).

Evaluación temporal del humedal de Arreo a partir de Imágenes Landsat y datos de campo

Y. Chao Rodríguez[1], A. el Anjoumi[2], J.A. Domínguez[1,3], E. Rico[2], D. Rodríguez Pérez[1]

[1] Depto. Física Matemática y de Fluidos, Facultad de Ciencias, UNED, c/Senda del Rey 9, 28040 Madrid.

[2] Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Ecología, c/ Darwin, 2, 28049 Madrid.

[3] Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, Paseo bajo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid.

RESUMEN

El lago de Arreo está compuesto por una pequeña zona lacustre profunda, rodeada de varias hectáreas de zona palustre, de menos de 4 metros de profundidad, en la que hay vegetación macrófita, principalmente *Chara hispida* (90%), ausente en la zona profunda. A través de las imágenes del sensor TM del satélite Landsat-5, hemos determinado la concentración de clorofila-a debida a los macrófitos. Así mismo hemos estudiado la evolucion de su vigorosidad calculando el índice de vegetación normalizado a partir del espectro corregido. El estudio ha incluido el cálculo de la temperatura superficial del lago de Arreo. El comportamiento estacional ha sido comparado con los datos de una extensa campaña de campo.

Palabras clave: macrófitos, temperatura superficial, Landsat-TM, clorofila-a, vegetación palustre.

ABSTRACT

Arreo Lake consists of a small lentic area of deep water, surrounded by acres of marsh area less than 4 meters deep with macrophyte vegetation, mainly Chara hispida (90%), absent in the deep zone. Using Landsat-TM5 satellite images, we have determined the chlorophyll-a concentration due to macrophytes. Furthermore, we have used the normalized vegetation index computed from the corrected spectrums to study seasonality of the macrophytes. Surface temperature of Arreo Lake has also been determined. All seasonal series have been compared with data from an extensive field campaign.

Keywords: *macrophytes, surface temperature, Landsat-TM, chlorophyll-a, marsh vegetation.*

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudia el humedal del Lago de Arreo (LArr), en Álava, usando el archivo de imágenes del sensor Thematic Mapper (TM) del Landsat-5 y las medidas de campo de algunos de los principales parámetros limnológicos. En particular, la concentración de clorofila-a (entre la cual se encuentra la aportada por la vegetación sumergida) y la temperatura superficial. Por último, se ha estudiado la vigorosidad del importante componente formado por la vegetación acuática, a través del índice de vegetación normalizado.

DATOS DE PARTIDA

La serie de imágenes utilizadas son aquellas, libres de nubes en el lago de Arreo, existentes en el Plan Nacional de Teledetección (PNT) y en la librería de imágenes de la NASA. (tabla 1).

	Fecha de la imagen		Fecha de la Imagen
1	16-may-2002	**11**	20-ago-2008
2	17-jun-2002	**12**	23-oct-2008
3	07-ago-2003	**13**	19-may-2009
4	24-sep-2003	**14**	22-jul-2009
5	15-oct-2005	**15**	23-ago-2009
6	11-may-2006	**16**	08-sep-2009
7	11-mar-2007	**17**	24-sep-2009
8	11-jul-2007	**18**	20-abr-2010
9	19-jul-2008	**19**	22-may-2010
10	04-ago-2008	**20**	23-jun-2010

Tabla 1: Imágenes Landsat-TM5 utilizadas

METODOLOGÍA

Corrección de las imágenes

Las imágenes de la NASA, así como algunas del PNT ya se distribuyen georreferenciadas. Las

restantes se han georreferenciado usando un algoritmo lineal de imagen a imagen.

La corrección atmosférica se ha realizado con el método de Gilabert et al. (1994), por tratarse de un modelo hecho para el sensor TM del Landsat, adecuado para cubiertas de agua y espesores ópticos pequeños. Este método consiste en un algoritmo de inversion basado en un modelo de transferencia simplificado en el que las características de los aerosoles se obtienen a partir de la radiancia de dos bandas TM, en vez de suponerlas a priori. Para llevar a cabo la corrección es necesario conocer la elevación media del terreno, el ángulo solar a la hora de toma de la imagen, datos del satélite como la longitud de onda central o el espesor óptico del ozono de cada banda, el mínimo valor del histograma de las bandas TM1 y TM3, etc. Una vez aplicada la corrección a cada banda, excepto al infrarrojo térmico (TM6), se obtienen las imágenes en reflectancia.

Fechas de los datos de campo			
14-12-01	18-07-04	29-09-07	01-07-09
23-01-02	06-10-04	10-01-08	29-07-09
24-04-02	13-01-05	03-04-08	03-09-09
29-07-02	06-04-05	12-7-08	11-10-09
23-10-02	06-07-05	20-09-08	02-11-09
08-02-03	12-10-05	11-10-08	04-12-09
26-04-03	17-01-06	09-11-08	23-01-10
24-07-03	24-04-06	06-12-08	06-03-10
23-10-03	14-07-06	17-01-09	23-08-10
26-11-03	04-10-06	14-02-09	20-10-10
29-01-04	20-01-07	05-04-09	19-11-10
01-04-04	07-04-07	01-05-09	21-12-10
25-04-04	05-07-07	04-06-09	13-01-11

Tabla 2: Fechas de la toma de datos de campo

Discriminación de las zonas de agua

Las zonas de agua se individualizan a partir del infrarrojo cercano (TM4), a partir del cual el agua absorbe casi toda la radiación que recibe. Su histograma proporciona un claro umbral de separación entre el agua y las sombras con el resto de cubiertas. Sin embargo, en algunas imágenes de este estudio, la banda TM4 no proporciona un claro umbral de corte. En este caso, se ha empleado histograma de la diferencia de bandas TM2 (verde, máximo de reflectancia del agua) y TM5 (infrarrojo cercano, reflectancia del agua prácticamente nula). Este estudio se ha realizado individualmente para cada imagen, seleccionando el umbral obtenido para cada una de ellas, el cual varía entre 16 y 50.

Estudio de la clorofila-a

La concentración de clorofila-a ([Cla]) en el LArr se ha calculado a partir de su relación con la reflectividad de la banda TM2 establecida por Domínguez et al. (2009):

$$[Cla]_{mg/m^3} = 1.1668 R[TM2]_{\%}^{2.9986} \quad (1)$$

$[Cla]_{mg/m3}$= concentración de clorofila-a.
$R[TM2]_{\%}$ = Reflectividad de la banda TM2 en %.

Esta ecuación nos proporciona [Cla] en todo el lago: zonas lacustre y palustre. Para estudiar la fiabilidad de estos datos, se ha comparado el resultado con los datos de campo medidos en la zona de aguas profundas. A continuación, se ha seleccionado un píxel en dicha zona, libre de vegetación sumergida, y otro en la zona palustre, con ella, para comparar la [Cla] en ausencia o en presencia de vegetación macrófita. De este modo es posible calcular la contribución debida a la *Chara hispida* restando la [Cla] en la zona palustre de aquella en la zona lacustre.

Estudio de la vegetación sumergida

La reflectividad debida a la vegetación sumergida, se supone que afecta más a las bandas TM2 y TM4, correspondientes al verde e infrarrojo cercano respectivamente. Para corregir su reflectividad se ha eliminado, por un lado, el efecto de la transparencia (disco de Secchi) y la turbidez, usando las ecuaciones que relacionan los datos de campo con estas bandas (Domínguez et al., 2009):

$$R[TM2]_{sd} = \left(\frac{SD_{campo}}{4.0098} \right)^{\frac{-1}{1.3659}} \quad (2)$$

$$R[TM4]_{[TSS]} = \exp\left(\frac{[TSS]_{campo} - 16.631}{7.8772} \right) \quad (3)$$

$R[TM2]_{sd}$ y $R[TM4]_{[tss]}$ son la reflectividad en las TM2 y TM4, respectivamente.
SD_{campo} y $[TSS]_{campo}$ son el disco de Secchi y los sólidos en suspensión medidos en el campo, respectivamente.

El efecto de la columna de agua se eliminó a través de la ecuación (Maritorena et al., 1994):

$$R[TM] = R_{\text{sinfondo}} + (R_b - R_{\text{sinfondo}})\, e^{-2K_d Z} \quad (4)$$

R[TM] = reflectividad medida por el sensor TM
$R_{sinfondo}$ = reflectividad teórica en un medio de extensión (semi)infinita con el mismo tipo de agua
R_b = reflectividad del fondo o cubierta sumergida
K_d = coeficiente de atenuación difusa
Z = profundidad del fondo o la cubierta sumergida.

Eliminando ambas aportaciones a la reflectividad medida por el sensor, se obtiene la reflectividad de la vegetación sumergida en TM2 y TM4:

$$R_b[\mathrm{TM}\,2]_{\%} = 0.37 + (R[\mathrm{TM}\,2]_{landsat} - R[TM\,2]_{sd} - 0.37)e^{2k_d Z} \quad (5)$$

$R[TM2]_{landsat}$ = reflectividad medida en TM2.
$R[TM2]_{sd}$ = reflectividad corregida en TM2, originada sólo por los datos medidos en campo (2).
$R_{sinfondo}[TM2] = 0,370$ (Domínguez, 2002) .
$K_dZ[TM2]=1$ (primer espesor óptico).

$$R_b[\mathrm{TM}\,4]_{\%} = 0.069 + (R[\mathrm{TM}\,4]_{landsat} - R[TM\,4]_{[TSS]} - 0.069)e^{2k_d Z} \quad (6)$$

$R[TM4]_{landsat}$ = reflectividad medida en TM4.
$R[TM4]_{[tss]}$ = reflectividad corregida en TM4; originada sólo por los datos medidos en campo (3).
$R_{sinfondo}[TM4] = 0,069$ (Domínguez, 2002) .
$K_d[TM4] = 1,8043 m^{-1}$ (Domínguez, 2002).
$Z[TM4] = 0,46$m (calculada a partir de los datos de campo del disco de Secchi).

Corregidas estas dos bandas, el espectro resultante indica la presencia de vegetación sumergida. En base a ello, se realiza un estudio temporal de la vigorosidad a través del índice de vegetación normalizado (NDVI).

Estudio de la temperatura

La temperatura de brillo del agua se calcula a través de la ecuación de Planck calibrada para la banda en el infrarrojo térmico TM6 (según Markham and Barker, 1986):

$$T = K_2 / [\ln(K_1 /R) +1] \quad (7)$$

$K_2 = 1260,50K$, $K_1 = 60,776$ mW/cm^{2}srμm y R = radiancia espectral en la banda TM6, calculada según las ecuaciones de calibración del sensor TM: R = mDN[TM6]+d, m=0,0056322 mW/cm^{2}srμm, DN=radiancia TM6 y d=0,1238 mW/cm^{2}srμm.

Los datos de campo permiten realizar un estudio temporal de la variación de la temperatura y validar los resultados obtenidos con las imágenes.

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Zona acuática

La separación de las zonas de agua de las imágenes nos permite determinar el área de LArr, El valor promedio obtenido es de 6.11 ha ± 0.15 ha, mientras que sobre el terreno se han medido 6.73 ha. Esto se debe a que en la medida de campo se ha separado la vegetación del criptohumedal que rodea la zona palustre, mientras que en las imágenes no se está contabilizando esta parte.

Clorofila-a

Para evaluar la fiabilidad de la [Cla] obtenida con las imágenes Landsat-TM, se ha comparado su valor con los datos de campo en la zona lacustre. Debido a que los días de ambas medidas son distintos (tabla 1 y 2), se ha realizado una interpolación trigonométrica a partir del periodograma de los datos de campo, respecto al que se han establecido las comparaciones. El rango de valores medidos de ambas series coincide, aunque las diferencias de tiempos y frecuencias de muestreo hacen que no se de la coincidencia puntual. Se observa una discrepancia de 16 mg/m^3 en r.m.s. entre la serie de datos Landsat y la interpolada.

A partir de los datos de las imágenes, se ha calculado la variación de la [Cla] entre dos zonas del lago, una central, con mayor profundidad y sin vegetación, y otra periférica, más somera con vegetación sumergida todo el año (figura 1). Se observa un comportamiento estacional de la concentración de clorofila-a, con un aumento de julio a septiembre, debido a la vegetación macrófita, representada mayoritariamente por la *Chara hispida*.

NDVI de la vegetación macrófita

Corregidas las bandas TM2 y TM4, se obtienen espectros correspondientes a una cubierta vegetal sumergida. Según las observaciones de campo, se trata de vegetación macrófita, formada en un 90% por *Chara hispida*. Sin embargo, la baja resolución espectral, posibles errores del proceso de corrección, y la no disponibilidad del espectro de campo de esta especie no permiten afirmar más que la consistencia de esta hipótesis de trabajo.

Los espectros corregidos en todas las imágenes permiten calcular el NDVI de la vegetación macrofita, cuya vigorosidad es superior a 0.65 (figura 2).

Temperatura superficial

La serie temporal de temperaturas se interpola a partir de los datos de campo con un error cuadrático medio de 1,83ºC:

$$T(ºC) = 8,75\,\mathrm{sen}(2\pi t/52)+14,75 \quad (8)$$

T(ºC) = temperatura en grados centígrados.
t= tiempo en semanas.

Representando la ecuación (8) que interpola los datos de campo y la temperatura calculada a partir de la banda TM6 (figura 3), se observa que ambas serien coinciden con un error cuadrático medio de 4,65 ºC.

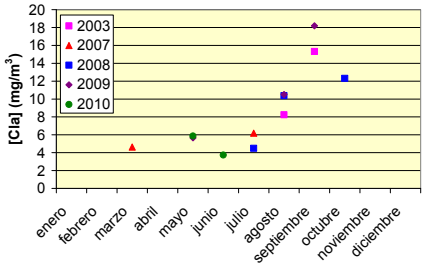


Figura 1: Concentración de clorofila-a debida a la *chara hispida* en el lago de Arreo

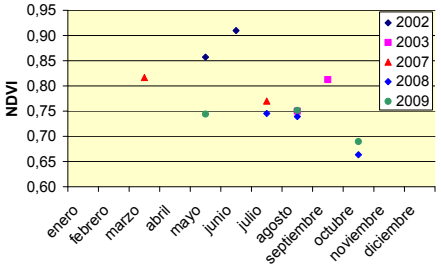


Figura 2: NDVI de la vegetación sumergida para las distintas imágenes.

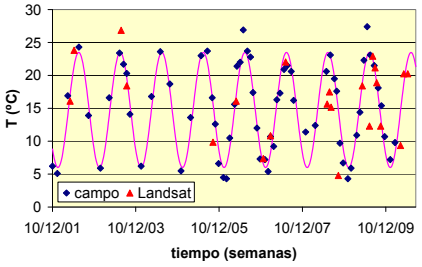


Figura 3: Datos de campo y satelitales de la temperatura frente al tiempo

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio limnológico del Lago de Arreo utilizando imágenes Landsat-TM, basado en la determinación de su geometría, así como de la concentración de clorofila-a y la temperatura superficial.

El área media del lago difiere poco de la medida sobre el terreno. Además, la variación modelada de la temperatura superficial, se halla en concordancia con los datos de campo y la temperatura derivada de la banda TM6. Así pues, las imágenes Landsat-TM permiten el seguimiento de la extensión y la temperatura del lago.

Se ha estudiado la concentración de clorofila-a en dos zonas: aguas profundas (sin vegetación y de la que se poseen datos de campo) y zona somera (que ocupa gran parte del lago). Los resultados en la zona profunda, obtenidos de las imágenes, no se ajustan bien a los datos de campo interpolados, aunque sí coincidan en rango. Sin embargo, la diferencia observada entre las dos zonas, debida a la vegetación sumergida, sí muestra una marcada estacionalidad a lo largo de los años del estudio. De ello se concluye que, si bien las imágenes Landsat adolecen de la resolución espectral y radiométrica necesarias para la determinación absoluta de la clorofila-a, sí permiten establecer comparaciones regionales en su concentración.

BIBLIOGRAFÍA

DOMINGUEZ, J. A. et al., 2009: *Monitoring transparency in inland water bodies using multispectral images*, International Journal of Remote Sensing, Vol. 30, No. 6, 20 March 2009, 1567–1586

DOMINGUEZ GOMEZ, J.A., 2002: *Tesis Doctoral del estudio de la calidad del agua de las lagunas de gravera mediante teledetección*, Universidad de Alcalá de Henares.

GILABERT, M. A., CONESE, C. and MASELLI, F., 1994: *An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 15, No. 10, 2065-2086.

GONZALEZ-MOZO et al., 2000: *Limnological characterization of an evaporite karstic lake in Spain (Lake Arreo)*, Limnética 18: 91-98

MARITONERA et al., 1994: *Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo*, Limnol. Oceanogr, 39(7), 1994,1689-1703.

MARKHAM, B.L., and BARKER, J.L., 1986: *Landsat MSS and TM Post Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectance, and At-satellite Temperatures*, EOSAT Landsat Technical Notes,1:3-8.

RICO, E., CHICOTE et al., 1995: *Batimetría y análisis morfométrico del lago de Arreo (N. España)*, Limnética 11(1): 55-5.

El proyecto SIOSE y sus aplicaciones en el Principado de Asturias

A. Colina[1], C. Fernández[1], M. Fernández[1], A. Finat[1] y M.A. Álvarez[1]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. Edificio de Investigación. 33600 Mieres (Asturias, España). Tel: 985458118, Fax: 985458110. E-mail: acvuelta@indurot.uniovi.es

RESUMEN

El SIOSE se define como un sistema a nivel nacional que integra la información de las bases de datos de ocupación del suelo de las CC.AA. y de la AGE. Su objetivo es "recoger la información una vez" y "utilizarla por todos", de acuerdo con los principios de la Directiva INSPIRE de la UE. La metodología de trabajo está orientada a la fotointerpretación asistida por ordenador utilizando para ello herramientas SIG. Todo el proyecto se basa en una producción descentralizada aplicando una metodología y un modelo de datos común y uniforme. Tanto el desarrollo del proyecto como el producto final resultante han generado cierto dinamismo en el ámbito de la cartografía de los usos del suelo y sus aplicaciones.

Palabras clave: SIOSE, usos del suelo, fotointerpretación, Sistemas de Información Geográfica.

ABSTRACT

SIOSE is a national information system which integrates information on land uses from both regional and national databases with the main purpose of "gathering the information at once" and "making it accessible to everyone". This goal is in line with the principles established by the EU INSPIRE Directive. The methodology is mainly focused on computer-aided photo-interpretation through the use of GIS tools. The project is based on a decentralized production process applying a common and uniform methodology and data specification structure. Both the project development and the final output have contributed to dynamize the land-use cartography field and its multiple applications.

Keywords: *SIOSE, land uses, photo-interpretation, Geographical Information Systems.*

INTRODUCCIÓN Y ANTEDEDENTES

En el año 2005 el IGN y las CC.AA. ponen en marcha el SIOSE, Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España, enmarcado en el Plan Nacional de Observación del Territorio. Se materializa así el compromiso de establecer una gran infraestructura de información geográfica sobre la ocupación del suelo en España que sea única, homogénea, actualizada periódicamente y de uso multidisciplinar. Se basa en aglutinar la información elaborada por las distintas Administraciones y la que aportan las imágenes SPOT5 y, de forma auxiliar, las ortofografías.

La cartografía de usos del suelo se realiza en España desde mediados del siglo XIX. El primer ejemplo son los bosquejos dasográficos de las provincias españolas. Les siguieron diversas series cartográficas de distinta temática como el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos o el Mapa Forestal Español, entre otros. En el caso de Asturias destaca la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (CTAPA) que aborda el inventario de diversas variables ambientales como la vegetación o la litología. Esta serie, elaborada por el INDUROT entre 1989 y 2001 a escala 1:25.000, ha sido la base fundamental de numerosos estudios ambientales y territoriales a lo largo de las últimas décadas.

Sin embargo el antecedente directo del SIOSE es el proyecto de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) Coordination of Information of the Environment (Corine Land Cover, CLC), editado por primera vez en 1990 y actualizado en 2000 y 2006. Se trata de una base de datos a escala 1:100.000 de toda Europa obtenida a partir de la fotointerpretación de imágenes multiespectrales procedentes de los Satélites de Observación de la Tierra.

CARACTERÍSTICAS GENERALES Y PARTICULARIDADES DE ASTURIAS

La Dirección Nacional obtuvo una cobertura completa del territorio con imágenes aeroespaciales y llevó a cabo la coordinación de los trabajos, elaborando la metodología y el modelo de datos, mientras que la producción se descentralizó. Se establecieron las referencias generales: año 2005 (actualización cada 5 años), escala 1:25.000, sistema geodésico ETRS89 y unidad mínima de superficie a representar entre 0,5 y 2 hectáreas en función de la ocupación.

Las imágenes SPOT5, tomadas en 2005 y 2006, de 2,5 m de resolución espacial, obtenidas por fusión de imágenes pancromáticas y multiespectrales fueron la base para delimitar los polígonos. Junto con ellas se utilizaron las imágenes LANDSAT, la Ortofotografía PNOA, las bases cartográficas BCN25 y CATASTRO y el resto de cartografía temática nacional y autonómica. En el caso de Asturias las fuentes de apoyo fueron las Ortofotografías SigPAC (2003), los Mapas Topográficos 1:25 000 y 1:5.000, los Oficiales de Carreteras, el Forestal (MFE50) y el de Cultivos y Aprovechamientos (MCA50), la Cartografía Temática y Ambiental y los Mapas Temáticos (suelo industrial y recursos sociales, sanitarios y formativos) o la cartografía del Sistema de Información de Zonas Inundables y de Avenida Torrencial del Principado de Asturias.

La capa de información resultante tiene una geometría única de polígono en formato SIG. Esta unidad espacial presenta una cobertura homogénea definida por dos superclases: *uso* (qué actividades socioeconómicas se desarrollan) y *cobertura* (tipo de superficie y elementos que alberga). El proyecto diferencia entre *cobertura simple* (única y ocupa todo del polígono) y *compuesta* (combinación de dos o más coberturas simples y/o una o varias coberturas compuestas predefinidas). Se establecieron 40 *coberturas simples* y 45 *coberturas compuestas predefinidas* (integradas por determinadas coberturas simples). A esto hay que sumar los *atributos* para caracterizar cada cobertura.

El proceso de producción se organizó en varias fases: integración de las bases de datos (raster y vectorial), edición (geométrica y temática), comprobación en campo, control de calidad (autonómico y nacional) y finalmente integración de datos y análisis estadístico. En el caso de Asturias, para abordar la edición se dividió el ámbito en bloques de hojas MTN25. Se procedió a la identificación de los polígonos con usos artificiales, trabajo desarrollado por geógrafos, y luego se editaron los polígonos con coberturas agro-forestales y naturales, acción llevada a cabo por ingenieros forestales con el asesoramiento de biólogos. En ambos casos la digitalización sobre las imágenes de satélite SPOT5 implicó usar distintas combinaciones de bandas y la comparación con la ortofoto PNOA (Figura 1).

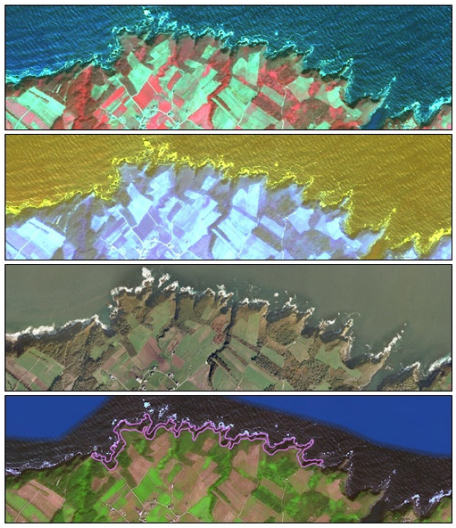


Figura 1: Ejemplo de imágenes y combinaciones de banda usadas en la fotointerpretación. *De arriba a abajo:* **a)** imagen SPOT5; RGB=321; **b)** imagen SPOT5; RGB=124, **c)** ortofotografía PNOA; y **d)** imagen SPOT5; color natural SIOSE con la delimitación del acantilado (línea morada).

El proyecto resultó ser muy complejo y más laborioso de lo previsto inicialmente, con fuentes de información numerosas y diversas. Además los criterios generales desglosaban en detalle los usos artificiales compuestos, pero no así los agrarios, en los que se reconocían dehesa, olivar o viñedo (no presentes en Asturias), pero no los mosaicos de cultivos, praderías y arbolado habituales en el norte peninsular. Por tanto fue necesario adaptar y complementar los conceptos generales a las particularidades de la región. Esto conllevó la elaboración de una serie de Instrucciones Técnicas Complementarias para definir e incorporar los elementos peculiares de la región: los *asentamientos agrícolas residenciales*, el *suelo desnudo*, la línea de costa, los mosaicos de prados y cultivos, el *roquedo* y los *canchales*, los *pastizales* y las presas.

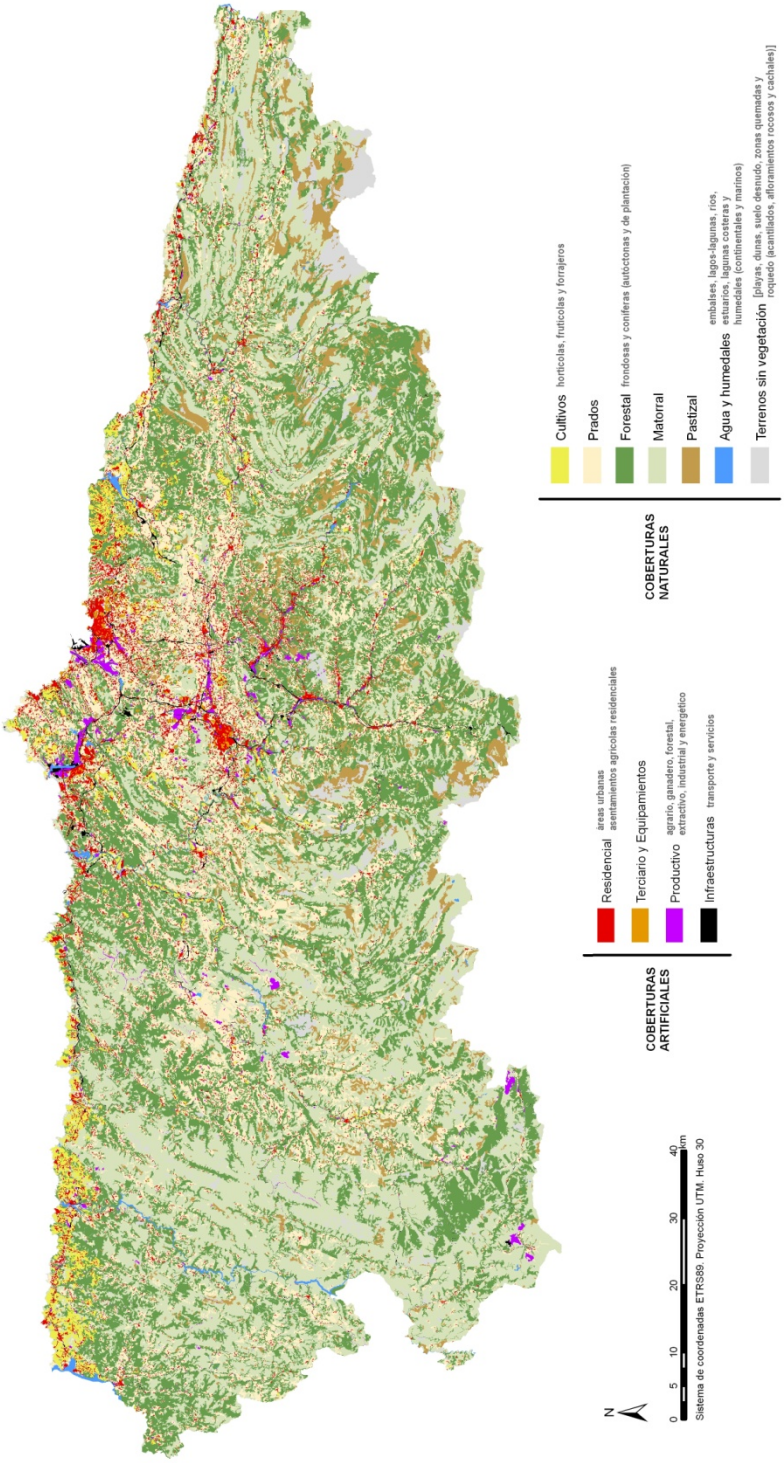


Figura 2: Cartografía del SIOSE (a partir de una simplificación de la información de la base de datos)

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El análisis estadístico preliminar (Tabla 1) presenta como uso más abundante el matorral, seguido de las frondosas y los prados. Sin embargo la distribución territorial (Figura 2) muestra la alta fragmentación del territorio, tanto de coberturas artificiales como agro-forestales y naturales. Se han identificado 69.714 polígonos para una superficie de 10.603,6 km^2, con una media de 15 hectáreas por polígono. Asimismo se plasma la multitud y variedad de usos de la extensa área metropolitana y la abundancia de enclaves residenciales en la región.

Clases		Ha.	%
Cultivos	Herbáceos	33.133,9	3,1
	Leñosos	9.719,9	0,9
	Prados	190.664.5	18,0
Pastizales		92.928,4	8,8
Arbolado forestal	Frondosas	254.757,3	24,0
	Coníferas	25.868,4	2,4
Matorral		364.434,7	34,4
Terrenos sin vegetación	Playas dunas arenales	746,6	0,1
	Roquedo	39.725,4	3,8
	Suelo desnudo	5.151,6	0,5
	Zonas quemadas	3.085,8	0.3
Coberturas artificiales	Edificación	12.322,0	1,2
	Zonas verdes	2.626,4	0.3
	Lám. de agua artificial	169,1	0,0
	Viales y áreas asfalt.	9.838,7	0,9
	Suelo no edificado	4.303,1	0,4
	Otras construcciones	1.477,1	0,1
	Zonas extrac./vertido	4.183,8	0,4
Coberturas húmedas	Humed. continentales	347,7	0,0
	Humedales marinos	407,2	0,0
Coberturas de agua	Aguas continentales	2.897,8	0,3
	Aguas marinas	1.923,3	0,2

Tabla 1: Resultados provisionales de la distribución de usos del suelo en Asturias.

Frente al Corine Land Cover, el SIOSE presenta un mayor grado de detalle, no solo por la escala, sino también por un mayor desglose de los usos a reconocer, sobre todo los de tipo artificial. De hecho a partir de esta experiencia y pensando en el desarrollo futuro de la cartografía de usos del suelo se puede establecer un sistema de producción descentralizado y multiescala. La base de datos más general es la del CLC 1:100.000, responsabilidad de los organismos europeos. El SIOSE 1:25.000 corresponde al ámbito estatal. Por último se debe desarrollar una versión a escala 1:5.000 y 1:10.000 de la que se haga cargo la Administración autonómica (hay ejemplos en Andalucía y Cataluña). Todos ellos deben de estar coordinados y poder integrar la información de uno en otro de forma automática.

Otro factor a destacar es la necesidad del tratamiento de las imágenes de referencias que permita una mejor caracterización de aspectos como la fracción de cabida cubierta en el ámbito forestal, o la identificación automática de usos.

APLICACIONES DEL SIOSE

La información resultante del proyecto SIOSE ha sido utilizada en el desarrollo de diversa cartografía temática y análisis territoriales en el Principado de Asturias. Permite conocer distribución, densidad, etc., de los distintos elementos identificados. Aplicando este principio ha sido una fuente destacada en el proceso de elaboración de las Cartografías del Viñedo, el Manzano y el Eucalipto para la Consejería de Medio Rural.

Otro aspecto muy útil del SIOSE es su expresión cartográfica en formato SIG. Esto permite realizar análisis directos y con diferente grado de detalle de áreas determinadas. Se ha aplicado en el análisis del impacto de las inundaciones en la actualización del Sistema de Información de Zonas Inundables del Principado de Asturias y en la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundaciones (EPRI). Del mismo modo se ha utilizado en el proceso de redelimitación de los Cotos de Caza y de las Zonas de Refugio y Reserva.

También es una fuente de información primordial a la hora de realizar el Mapa Forestal de España a escala 1:25.000. Tendrá una mayor definición de las coberturas aportadas por el SIOSE y resolverá algunas discrepancias existentes entre el Mapa Forestal y el de Cultivos y Aprovechamientos.

BIBLIOGRAFÍA

IGN, 2007. *Manual de Fotointerpretación*. Equipo Técnico Nacional SIOSE.

IGN, 2007. *Guía orientativa de color para composiciones en infrarrojo color*. Equipo Técnico Nacional SIOSE.

IGN, 2008. *Manual de Control de Calidad*. Equipo Técnico Nacional SIOSE.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del IGN y el Centro de Cartografía del Principado de Asturias.

Aplicación del método TDVI para la modelización de la humedad del suelo mediante imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ en una cuenca Mediterránea

J. Cristóbal[1], P. Llorens[3], C. Domingo[2] y J. Latron[3]

[1] Departmento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra. 08193 Cerdanyola del Vallès (Catalunya, España). Correo electrónico: Jordi.Cristobal@uab.cat

[2] Departmento de Geografía. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra. 08193 Cerdanyola del Vallès (Catalunya, España).

[3] Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDÆA). CSIC. C/ Jordi Girona, 18. 08034 Barcelona (Catalunya, España).

RESUMEN

La humedad del suelo es una variable con importantes implicaciones en el ciclo hidrológico y por tanto un parámetro de gran importancia en los modelos climáticos a escala regional. Este estudio presenta una estimación preliminar de la humedad del suelo durante el período 2003-2005 en las cuencas de investigación de Vallcebre, situadas en un área de montaña Mediterránea, a partir de un conjunto de 14 imágenes Landsat (Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+) y mediante la correlación entre el índice TVDI y las mediciones de humedad del suelo realizadas en el campo. Los primeros resultados obtenidos muestran una baja correlación para el todo periodo analizado (R^2 = 0.33). En cambio, en siete de las fechas analizadas se observa una correlación intermedia o alta (R^2 entre 0.44 y 0.78). Este primer análisis de los datos permitirá mejorar los resultados obtenidos a partir de la modificación del índice TDVI y la introducción de variables como la temperatura del aire.

Palabras clave: humedad del suelo, Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, región Mediterránea.

ABSTRACT

Soil moisture is a variable with important implications for the hydrological cycle and hence an initial parameter of great importance in the regional scale climate models. This study presents a preliminary estimate of soil moisture during the period 2003-2005 in the Vallcebre research catchments, located in a Mediterranean mountain area, through a set of 14 Landsat images (Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM +), by the correlation between the TVDI and soil moisture measurements.. The first results show a low correlation for the whole period analyzed (R^2 = 0.33). In contrast, seven analyzed days show intermediate or high accuracy (R^2 ranging between 0.44 and 0.78). This first analysis will allow the improvement of results by modifying the TDVI index and introducing variables such as air temperature.

Keywords: *soil moisture, Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Mediterranean region.*

INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es una variable con importantes implicaciones en el ciclo hidrológico y por tanto un parámetro de gran importancia en los modelos climáticos a escala regional. El contenido de agua del suelo presenta una heterogeneidad temporal y espacial elevada, por tanto su seguimiento es relevante para la evaluación del estrés ambiental que afecta a los ecosistemas, tanto forestales como agrícolas. En la actualidad, las mediciones radiométricas proporcionadas por sensores remotos son imprescindibles para la modelización de la humedad del suelo a escalas de cuenca y regional de una manera viable. En este estudio se presenta una estimación preliminar de la humedad del suelo durante el período 2003-2005, mediante un conjunto de 14 imágenes Landsat (9 Landsat-5 TM y 5 Landsat-7 ETM +), en varias localizaciones de las cuencas de investigación de Vallcebre, (42 º 12'N, 1 º 49'E). El contenido de agua del suelo se ha modelizado a través de una correlación simple con el *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) calcu-

lado siguiendo la metodología propuesta por Sandholt *et al.* (2002).

MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

Área de estudio

Las cuencas de investigación de Vallcebre (42 º 12 'N, 1 º 49' E) están situadas en el Prepirineo Oriental (NE de la Península Ibérica). El clima es sub-mediterráneo, con una temperatura media de 9º C y 862 mm de precipitación anual. El substrato es sedimentario (margas y calizas), lo que resulta en suelos franco-limosos. La vegetación climácica corresponde a la asociación *Buxo-Quercetum pubescentis sempervirentis*. La mayoría de las tierras fueron deforestadas y aterrazadas para el uso agrícola en el pasado, siendo progresivamente abandonadas durante la segunda mitad del siglo XX. El paisaje actual lo forma un mosaico de pastizales mesófilos del tipo *Aphyllantion* y parches de *Pinus sylvestris*, que colonizaron las antiguas terrazas agrícolas después de su abandono (Poyatos *et al.*, 2003).

Material

Para modelizar la humedad del suelo durante el periodo 2003-2005 se han usado un total de 14 imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ (Tabla 1). Para las mismas fechas se ha seleccionado el producto vapor de agua (MOD05) de TERRA MODIS. Todas las imágenes han sido seleccionadas en días claros intentando cubrir todos los meses del año. Los datos meteorológicos utilizados para modelizar la temperatura del aire se han descargado de la web del Servei Meteorològic de Catalunya (www.meteocat.com).

	Fecha de la Imagen	Misión Landsat
1	01/07/2003	L5
2	17/07/2003	L5
3	02/08/2003	L5
4	10/08/2003	L7
5	19/09/2003	L5
6	03/07/2004	L5
7	04/07/2004	L7
8	13/09/2004	L7
9	21/09/2004	L5
10	22/09/2004	L7
11	08/11/2004	L5
12	24/11/2004	L5
13	11/01/2005	L5
14	04/02/2005	L7

Tabla 1: Imágenes Landsat utilizadas: L7 es Landsat-7 ETM+ y L5 es Landsat-5 TM.

CÁLCULO DE LAS VARIABLES IMPLICADAS EN EL MODELO

Procesamiento general de las imágenes

Las imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ han sido corregidas geométricamente, a una resolución espacial de 100 m, mediante el uso de un MDE obteniéndose un RMSE inferior a un píxel de 30m (Palà y Pons, 1995), y radiométricamente (Pons y Solé-Sugrañes, 1994). Las imágenes TERRA MODIS se han reproyectado al sistema de coordenadas UTM-31N a una resolución espacial de 1 km.

Temperatura del aire (T_a)

La temperatura del aire instantánea, media y mínima se han calculado mediante técnicas de regresión múltiple y de interpolación espacial de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas, utilizando la metodología propuesta por Cristóbal *et al.* (2008), obteniéndose un RMSE entre 1.7, 1 y 1.7 K, respectivamente.

Emisividad terrestre (ε)

La emisividad terrestre (ε) se ha calculado según Sobrino y Raissouni (2000), estableciendo umbrales de NDVI entre píxeles de suelo desnudo, píxeles completamente recubiertos de vegetación y píxeles compuestos de suelo y vegetación (píxeles mixtos).

Temperatura de la superficie terrestre (TST)

La temperatura de la superficie terrestre (TST) se ha obtenido mediante la metodología propuesta por Cristóbal *et al.* (2009), que se sustenta en la ecuación de transferencia radiativa y tienen como principales variables de entrada el vapor de agua y la temperatura del aire. Su principal ventaja es la no dependencia de radiosondeos para la determinación de la TST. La metodología está pensada para la obtención de la TST en condiciones globales usando en el desarrollo de su algoritmo la base de radiosondeos TIGR-TOVS, representativa de la mayoría de condiciones atmosféricas a escala global. El algoritmo está diseñado para un rango de vapor de agua entre 0 y 8 $g \cdot cm^{-2}$. Se ha usado el producto de vapor de agua de TERRA MODIS como entrada en la obtención de la TST.

DESARROLLO DEL MODELO TDVI

Para modelizar la humedad del suelo se ha correlacionado el *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) calculado según Sandholt et al. (2002) con las mediciones de humedad del suelo realizadas en el campo. La Figura 1 muestra un esquema del modelo TDVI. En este modelo se combina la información de la TST y el NDVI para describir las condiciones de transpiración de la cubierta vegetal. Posteriormente, se correlaciona la información de este índice con datos de humedad del suelo. En este sentido un valor de TST bajo y NDVI alto, indica que la cubierta vegetal presenta una máxima transpiración y, por lo tanto, se le podrían asociar unas condiciones de humedad del suelo altas. Sandholt *et al.* (2002) utilizaron la siguiente ecuación para modelizar estas situaciones:

$$\mathrm{TDVI} = \frac{T_s - T_{s\,\min}}{a + bNDVI - T_{s\,\min}} \qquad (1)$$

donde:
Ts=temperatura de la superficie terrestre.
Tsmin: mínima temperatura de la superficie terrestre en el triángulo en función de un intervalo de NDVI.
NDVI= Normalized difference vegetation index.
*a y b=parámetros que definen el límite seco (*dry edge*) modelizado como un ajuste linear según:*

$$\mathrm{Ts}_{\max} = a + b\mathrm{NDVI} \qquad (2)$$

donde:
Ts_{max}=temperatura de la superficie terrestre máximo para un intervalo.

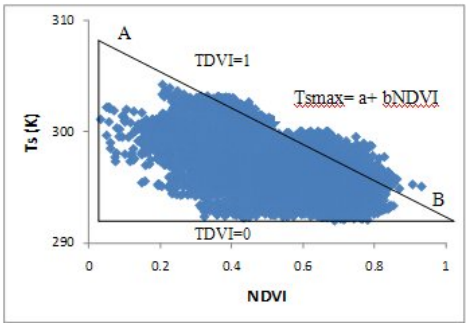


Figura 1: Esquema del modelo TDVI para la fecha 03/07/2004. A representa unas condiciones de no evaporación y B unas condiciones de máxima transpiración.

Para obtener los valores de los parámetros a y b se realiza un ajuste lineal entre los valores máximos de TST para un intervalo de NDVI. En nuestro caso se seleccionó un intervalo de 0.02 de NDVI (ver Figura 2).

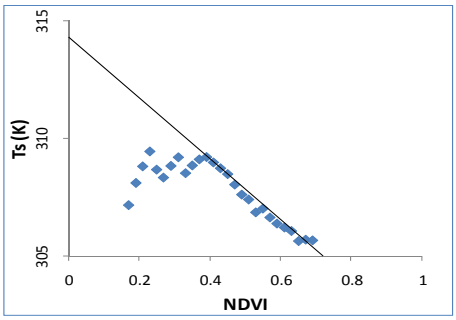


Figura 2: Ejemplo de ajuste lineal para la obtención de los parámetros a y b según los valores máximos de TST para un intervalo de NDVI de 0.02 (03/07/2004).

Una vez calculado el TDVI, se correlacionó con los datos de humedad superficial del suelo (0-20 cm) medidos (método TDR) en nueve localizaciones (separadas por una distancia media de unos 80m según el grupo de sondas), que cubren una amplia gama de condiciones topográficas y de cubierta vegetal (pastizales y pinares de pino silvestre). Las medidas se toman entre 7 y 10 días. Los días en que fueron realizadas las medidas de humedad no coinciden exactamente con las fechas de adquisición de las imágenes Landsat, la diferencia promedio entre ambas fechas es de 1.8 días.

RESULTADOS

Los primeros resultados obtenidos muestran una baja correlación entre el índice TDVI y las medidas de campo para el periodo analizado (R^2 = 0.33). En cambio, en siete de las fechas analizadas se observa una correlación intermedia o alta, R^2 entre 0.44 y 0.78 (ver Tabla 2). Además se observa una gran variabilidad en las correlaciones obtenidas entre los datos de TDVI y las medidas TDR. Se observa también que la precisión entre adquisiciones consecutivas de Landsat muestra patrones diferentes: consistencia el 21/09/2009 y el 22/09/2009 e inconsistencia el 03/07/2003 y el 04/07/2003. La baja correlación en alguna de las fechas podría explicarse por la comparación de un dato puntual de humedad del suelo con la estimación en un píxel de 60 o 120m. Otro factor explicativo podría ser la diferencia de días entre la adquisición de la imagen y la toma de medidas TDR.

Fecha de la Imagen	Misión Landsat	Dif. medidas	R^2	n
01/07/2003	L5	4	0.15	9
17/07/2003	L5	1	0.10	9
02/08/2003	L5	2	0.78	7
10/08/2003	L7	3	0.44	8
10/08/2003	L7	-2	0.48	8
19/09/2003	L5	0	0.48	8
03/07/2004	L5	-2	0.66	8
04/07/2004	L7	-1	0.22	9
13/09/2004	L7	3	0.56	7
21/09/2004	L5	1	0.00	8
22/09/2004	L7	2	0.00	8
08/11/2004	L5	2	0.32	7
24/11/2004	L5	0	0.08	9
11/01/2005	L5	3	0.60	7
04/02/2005	L7	1	0.09	8

Tabla 2: Correlaciones (R^2) entre los índices TDVI y las medidas de TDR. Dif. medidas es la diferencia en días entre la imagen y medición de humedad (TDR). n es el número de sondas TDR usadas.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados preliminares son modestos, obteniéndose una baja correlación entre el índice TDVI y las medidas de campo para todo el periodo y correlaciones intermedias o altas en siete de las fechas analizadas. Es importante remarcar que se ha comparado una medición puntual con modelos TVDI de 60 y 120 m de resolución espacial, en un área heterogénea.

Con el fin de mejorar los resultados obtenidos en la modelización de la humedad del suelo se procesará el índice TVDI con diferentes tamaños de área (desde un área local como la de medición de la humedad hasta todo el conjunto de la imagen) con la finalidad de obtener mejores resultados en la estimación del límite seco y la correlación TDVI-TDR. Además, se incluirán datos meteorológicos para obtener modelos más exactos de humedad del suelo (Moran *et al.*, 1994) o se usarán modelos de tipo SVAT (Gillies y Temesgen, 2000)

BIBLIOGRAFÍA

CRISTÓBAL J., M. NINYEROLA Y X. PONS, 2008. *Modelling air temperature through a combination of Remote Sensing and GIS data*. Journal of Geophysical Research, 13, D13106.

CRISTÓBAL, J., J. C. JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. A. SOBRINO, M. NINYEROLA y X. PONS, 2009. *Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapour and air temperature*. Journal of Geophysical Research. Journal of Geophysical Research, 114, 1-16.

LATRON, J., LLORENS, P., SOLER, M., POYATOS, R., RUBIO, C., MUZYLO, A., MARTÍNEZ-CARRERAS, N., DELGADO, J., REGÜÉS, D., CATARI, G., NORD, G., y GALLART, F., 2010. *Hydrology in a Mediterranean mountain environment—the Vallcebre research basins (northeastern Spain). I. 20 years of investigations of hydrological dynamics*. Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins), IAHS Publ. 336. IAHS Press: Wallingford, UK.

GILLIES, R. R., KUSTAS, W. P. y HUMES, K. S., 1997. *A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature*. International Journal of Remote Sensing, 18, 3145 – 3166.

GILLIES, R. R. y TEMESGEN, B., 2000. *Coupling thermal infrared and visible satellite measurements to infer biophysical variables at the land surface*. Land Surface Processes, editors D. Quattrochi and J. Luvall, pp. 205-253, CRC Press Boca Raton, Florida, USA.

MORAN, M. S., CLARKE, T. R., INOUE, Y., y VIDAL, A., 1994. *Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index*. Remote Sensing of Environment, 49, 246– 263.

POYATOS, R., LATRON, J., y LLORENS, P., 2003. *Land-Use and Land-Cover change after agricultural abandonment, The case of a Mediterranean Mountain Area (Catalan Pre-Pyrenees)*. Mt. Res. Dev., 23, 52–58.

SANDHOLT, I., RASMUSSEN, K. y ANDERSEN, J., 2002. *A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status*. Remote Sensing of Environment, 79, 213-224.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al proyecto Consolider-Ingenio Montes (CSD2008-00040), a la Generalitat de Catalunya (GRUMETS - 2009SGR1511) y a la Agència Catalana de l'Aigua su financiación para poder realizar este estudio.

Estimación de flujos de energía en una zona de sabinar de la Reserva Biológica de Doñana mediante el método TSEB e imágenes Landsat-5 TM

J. Cristóbal[1], W. P. Kustas[2], M. C. Anderson[2], J. M. Infante[3] y R. Díaz-Delgado[3]

[1] Departmento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra. 08193 Cerdanyola del Vallès (Catalunya, España). Correo electrónico: Jordi.Cristobal@uab.cat

[2] Hydrology and Remote Sensing Laboratory. United States Department of Agriculture. Agriculture Research Service. BARC-West. MD 20705. Beltsville (Maryland, USA).

[3] Laboratorio de SIG y Teledetección Estación Biólogica de Doñana LAST-EBD- Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/ Americo Vespucio, s/n. 41092 Sevilla (Andalucía, España).

RESUMEN

La determinación de los flujos de energía (evapotranspiración real, radiación neta, calor sensible y flujo de calor del suelo) son imprescindibles para mejorar el conocimiento del ciclo hidrológico, especialmente en cubierta de vegetación natural. En este trabajo se presentan los primeros resultados de la modelización de los flujos de energía mediante el modelo TSEB, usando cinco imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ durante el año 2010, en una parcela experimental de sabinar de la Reserva Biológica de Doñana y su validación con datos de una estación *Eddy-Covariance*. El método TSEB ha dado unos resultados aceptables en la medida de los diferentes flujos de energía teniendo en cuenta la elevada heterogeneidad que presenta este tipo de vegetación. En el caso de la evapotranspiración real, la radiación neta, el flujo de calor sensible y el flujo de calor del suelo se ha obtenido un RMSE promedio de 60, 42, 60 y 53 $W \cdot m^{-2}$, respectivamente. Futuras mejoras en la determinación del índice de área foliar y la inclusión de más imágenes y estaciones *Eddy-Covariance* ayudarán a implementar y mejorar el modelo en este tipo de vegetación.

Palabras clave: teledetección, evapotranspiración real, reservas naturales, flujos de energía, vegetación mediterránea.

ABSTRACT

Energy fluxes computing (actual evapotranspiration, net radiation, sensible heat and soil heat flux) are essential to improve the knowledge of the hydrological cycle, especially in natural vegetation covers. In this paper we present the first results of the energy fluxes modeling by means of the TSEB model and using five Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM + in 2010, in an experimental plot of juniper tree of the Doñana Biological Reserve and the validation with Eddy-Covariance data. TSEB method showed acceptable results in the measurement of the different energy fluxes taking into account the high heterogeneity of this type of vegetation. In the case of actual evapotranspiration, net radiation, sensible heat flux and soil heat flux was obtained an average RMSE of 60, 42, 60 and 53 $W \cdot m^{-2}$, respectively. Future improvements in leaf area index determination and the inclusion of more images and Eddy-Covariance stations would help implementing and improving the TSEB model in this type of vegetation.

Keywords: *remote sensing, actual evapotranspiration, natural reserves, energy fluxes, Mediterranean vegetation.*

INTRODUCCIÓN

El seguimiento de los flujos de energía (evapotranspiración real, radiación neta, calor sensible y flujo de calor del suelo) tiene importantes implicaciones en la modelización global y regional del clima y en el conocimiento del ciclo hidrológico, así como para asesorar sobre el estrés medioambiental que afecta los ecosistemas agrícolas y naturales. Hoy en día, la Teledetección es la única tecnología capaz de proporcionar las medidas radiométricas necesarias para el cálculo de los flujos de energía de una manera global y económicamente factible. Actualmente, gran parte de los algoritmos desarrollados para la determinación de los flujos de energía se han desarrollado y validado en zonas de cultivos, y su implementación en una zona de vegetación

natural representa un importante reto en el seguimiento de esta variable y en la mejora del conocimiento de los recursos hídricos, especialmente en zonas de vegetación mediterránea. En este sentido, la Estación Biológica de Doñana, como Infraestructura Científica y Tecnológica Singular (ICTS), ha puesto en marcha unas parcelas experimentales para llevar a cabo la validación y el seguimiento de la evapotranspiración y otros flujos de energía en una zona de sabinar, cubierta de alta importancia, tanto en la Reserva como en el Parque Nacional de Doñana, y de una elevada heterogeneidad.

En este trabajo se presentan los primeros resultados de la modelización de los flujos de energía durante el año 2010 en la parcela experimental del sabinar del Ojillo de la Reserva Biológica de Doñana mediante cinco imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ y su validación con datos *Eddy-Covariance*.

MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

Material cartográfico

Para modelizar los flujos de energía durante el periodo 2010 se han usado un total de 5 imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ (ver Tabla 1) en días claros con una resolución espacial de 120 y 60 m, respectivamente. Para las mismas fechas se ha seleccionado el producto vapor de agua (MOD05) de TERRA MODIS y el producto del índice de área foliar, LAI (MOD15).

Se ha usado también un vuelo lídar realizado en julio de 2007 de la Reserva Biológica de Doñana con una resolución espacial de 2m y una ortofotografía en color de 0.5m de resolución espacial tomada también en 2007.

Parcela experimental del sabinar del Ojillo (o del Corte)

La parcela experimental donde se ha desarrollado este estudio está ubicada en la Reserva Biológica de Doñana (coordenadas X: 187449 e Y: 4100357 con sistema de referencia UTM 30N y dátum Europeo de 1950), provincia de Huelva.

Esta parcela experimental consta de dos equipamientos, una subparcela de fisiología y una subparcela donde se ubica una estación *Eddy-Covariance* que recoge información aproximadamente de un *fetch* de una ha.

Esta parcela está situada en un sabinar compuesto principalmente por sabina (*Juniperus phoenicea ssp. turbinata*) y acompañada por especies arbóreas como el pino piñonero (*Pinus pinea*) y de diversas especies arbustivas bajas. La parcela presenta una fracción de cubierta vegetal de un 68%, calculada mediante al vuelo lídar, la ortofotografía en color, ambos de 2007, e información de la posición, altura y diámetro basal las sabinas presentes en la parcela. La fracción de cubierta no vegetal está compuesta por suelo arenoso con la presencia de recubrimiento de líquenes, que puede ser variable en función de la época del año y de las condiciones ambientales, y que puede alterar la el valor de la fracción de cubierta vegetal. El recubrimiento de la sabina confiere a la parcela, y al sabinar, un elevado grado de heterogeneidad espacial, siendo una mezcla entre suelo desnudo o semidesnudo y sabinar.

La estación *Eddy-Covariance* está operativa desde a mediados del año 2009 y dispone, principalmente, de sensores de humedad relativa y temperatura del aire (Vaisala), sensores de humedad del suelo (Decagon), sensor de radiación neta (Kipp & Zonen), flujo de calor del suelo, o geotérmico (Hukseflux), un anemómetro sónico y un sensor de vapor de agua y dióxido de carbono (Licor). Adicionalmente a los sensores estándar de una estación *Eddy-Covariance*, se han instalado dos sensores de temperatura radiométrica (Apogee) sobre sabina y suelo desnudo, y un albedómetro sobre suelo desnudo (Kipp & Zonen).

	Fecha de la Imagen	Plataforma y sensor
1	06/02/2010	Landsat-5 TM
2	16/07/2010	Landsat-5 TM
3	01/08/2010	Landsat-5 TM
4	25/08/2010	Landsat-7 ETM+
5	10/09/2010	Landsat-7 ETM+

Tabla 1: Imágenes utilizadas para la modelización de los flujos de energía.

EL MODELO TSEB

El modelo TSEB (*Two-Source Energy Balance Model*) fue desarrollado por Norman *et al.* (1995) y modificado posteriormente por Kustas y Norman (1999). Este modelo se basa en la partición de la temperatura radiométrica de la superficie (Trad) en la temperatura aparente del suelo (T_s) y de la cubierta (T_c), basado en la cubierta de la fracción de cubierta vegetal y el ángulo de visión del sensor térmico, f(θ):

$$\text{Trad}= \left\{ f(\theta)T_C^4 + (1-f(\theta)T_S^4) \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

Con esta información, TSEB evalúa el balance energético de suelo y de la cubierta por separado, calculando los flujos de energía totales y por componentes. De tal manera que:

$$Rn=Rn_c+Rn_s \quad (2)$$

$$H=H_c+H_s \quad (3)$$

$$\lambda E=E_c+E_s \quad (4)$$

donde:
Rn= radiación neta.
H= flujo de calor sensible.
λE= flujo de calor latente.
subíndices c y s= cubierta y suelo, respectivamente.

El flujo de calor del suelo (G) se obtiene mediante:

$$Rn=H+\lambda E+G \quad (5)$$

$$Rn_s=H_s+\lambda E_s+G \quad (6)$$

$$Rn_c=H_c+\lambda E_c \quad (7)$$

Los flujos de calor sensible de la cubierta y del suelo se evalúan mediante un gradiente de temperatura a través de un modelo de resistencias en serie donde se obtiene T_c, T_s y T_a (estimación de la temperatura del aire sobre la cubierta). La extinción de la Rn dentro de la cubierta (Rn_c) se aproxima a partir del LAI, mientras que G se fija como una fracción (0.31) de la Rn_s. Mediante una modificación de la formulación de Priestley-Taylor se calcula una estimación inicial de la evapotranspiración de la cubierta (λE_c), la cual es reducida si se detectan signos de estrés vegetal en la componente térmica suelo-superficie. Finalmente, la tasa de evapotranspiración del suelo (λE_s) se calcula como residuo del balance energético (Anderson *et al.*, 2007).

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Las imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ han sido corregidas geométricamente, a una resolución espacial de 120 m i 60 m, respectivamente, obteniéndose un RMSE inferior a un píxel de 30m, y radiométricamente (Pons y Solé-Sugrañes, 1994). Las imágenes TERRA-MODIS se han reproyectado al sistema de coordenadas UTM-30N a una resolución espacial de 1 km.

La temperatura de la superficie terrestre (TST) se ha obtenido mediante la metodología propuesta por Cristóbal *et al.* (2009), que se sustenta en la ecuación de transferencia radiativa y tienen como principales variables de entrada el vapor de agua (producto de vapor de agua de TERRA-MODIS) y la temperatura del aire (promedio de la temperatura del aire de las estaciones meteorológicas de la Reserva Biológica de Doñana). La emisividad terrestre (ε) usada en la obtención de la TST, se ha calculado según Sobrino y Raissouni (2000), estableciendo umbrales de NDVI entre píxeles de suelo desnudo, píxeles completamente recubiertos de vegetación y píxeles compuestos de suelo y vegetación (píxeles mixtos).

RESULTADOS

En la figura 1 se puede ver la correlación entre los datos de los diferentes flujos de energía modelizados mediante el método TSEB y los flujos observados en la estación *Eddy-Covariance* a la hora de paso del satélite (aproximadamente entre las 10:30 y las 11:00 UTC). Como se observa en esta figura la correlación entre los valores observados y los valores modelizados presenta una buena tendencia. En la tabla 2 se pueden ver las medidas de error promedio para las cinco fechas analizadas. En el caso de la λE, la Rn, H y G se ha obtenido un RMSE promedio de 60, 42, 60 y 53 $W \cdot m^{-2}$, respectivamente, y un R^2 de 0.04, 0.91, 0.86, 0.91, respectivamente. La correlación que presentan los resultados en el caso de λE es baja, R^2 igual a 0.04. Esto es debido a que la tasa de λE en el periodo estudiado presenta un rango muy estrecho de variación. En cambio en el caso de los otros flujos de energía la correlación es alta.

Finalmente, remarcar, que estos son los primeros resultados y que se tendrán que mejorar algunas de las variables del modelo como es el índice de área foliar (LAI) que sólo se ha podido aproximar mediante imágenes TERRA-MODIS ya que no se tenían datos de campo. Esto puede estar introduciendo error en el modelo, ya que el LAI una variable importante para la partición de la temperatura radiométrica de la superficie y para el posterior cálculo de los flujos de energía. En un futuro se tiene pensado llevar a cabo mediciones en campo de esta variable para ver su evolución anual y así poder mejorar los resultados del modelo.

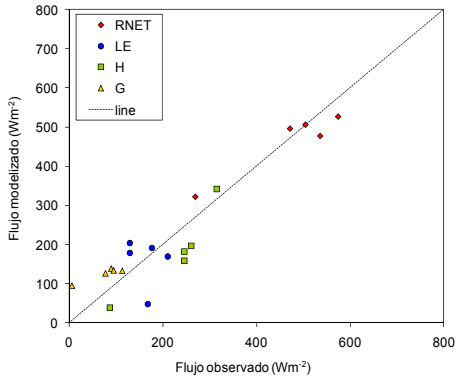


Figura 1: Resultado del método TSEB en la zona de sabinar. RNET es la radiación neta, LE es el flujo de calor latente, H es el flujo de calor sensible y G es el flujo de calor del suelo.

	RNET	LE	H	G
R^2	0.91	0.04	0.86	0.91
RMSE	42	69	62	51

Tabla 2: Medidas promedio de error del método TSEB en la zona de sabinar. R^2 es el coeficiente de determinación. RMSE en $W \cdot m^{-2}$.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se enmarca en un proyecto más amplio que es la cartografía de los flujos de energía, no sólo en la cubierta de sabinar sino de toda la reserva de Doñana a partir de una serie temporal más extensa. Los resultados obtenidos son prometedores y presentan una tendencia temporal con unos R^2 altos, 0.91, 0.86, 0.91 en el caso de la Rn H y G, respectivamente. En el caso de la evapotranspiración su R^2 es bajo, de 0.04, debido su estrecho rango de variación en la cubierta de sabinar. Conjuntamente con los datos que actualmente se obtienen de la estación *Eddy-Covariance* sobre la cubierta de sabinar y los datos de las estaciones que se instalarán a corto plazo, ayudarán a mejorar los resultados y a parametrizar de una forma más precisa el modelo. Una de las variables en la que se incidirá es el LAI. Se tiene pensado tomar datos de campo mediante un ceptómetro compararlo con el LAI obtenido mediante imágenes Landsat-5 TM o TERRA/AQUA MODIS. La inclusión de tres nuevas torres de *Eddy-Covariance* en la Reserva Biológica de Doñana ubicadas en monte blanco, monte negro y marisma permitirá implementar también el modelo ALEXI/disALEXI (Anderson *et al.*, 1997) para el cálculo de los flujos a escala regional y diarios.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, M.C., KUSTAS, W.P. y NORMAN, J.M., 2007. *Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing*. Agronomy Journal. 99:240-254.

CRISTÓBAL, J., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SOBRINO, J. A., NINYEROLA M. y PONS, X., 2009. *Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapour and air temperature*. Journal of Geophysical Research, 114, 1-16.

NORMAN, J. M., KUSTAS, W. P., y HUMES, K., 1995. *A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperatura*. Agr. Forest Meteorol., 77, 263−293.

KUSTAS, W. P., y NORMAN, J. M., 1999. *Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover*. Agricultural and Forest Meteorology, 94, 13-29.

PONS, X. y SOLÉ-SUGRAÑES, L., 1994. *A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data*. Remote Sens. Environ., 47, 1-14.

SOBRINO, J. A. y RAISSOUNI, N., 2000. *Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Moroco*, Int. J. Remote Sens., 21, 353-366.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado gracias a la beca de estancias de investigación financiada por la Generalitat de Catalunya (Talència) con referencia 2009BE2 00188 y GRUMETS (2009SGR1511) y gracias a la financiación del Programa para el Acceso a la Infraestructura Científico y Tecnológica Singular: Reserva Científica de Doñana (ICTS-RBD) concedida el año 2010.

Control del estado de eutrofización de masas de agua continentales empleando imágenes Deimos-1

C. Doña[1], J. M. Sánchez[2], A. Ferri[1], V. Caselles[1] y A. Camacho[3]

[1] Dpto. de Física de la Tierra y Termodinámica. Facultad de Física. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner, nº 50. 46100 Burjassot (Valencia, España). Correo electrónico: Carolina.Dona@uv.es

[2] Dpto. de Física Aplicada. Escuela de Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla-La Mancha. Av. España, s/n. 02071 Albacete (Albacete, España).

[3] Dpto. de Microbiología y Ecología e Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva. Edificio de Investigación "Jeroni Muñoz" Campus de Burjassot. Universidad de Valencia. E-46100 Burjassot (Valencia, España).

RESUMEN

En este trabajo se pretende mostrar el potencial de las imágenes del sensor Deimos-1 para estudiar la calidad de aguas continentales superficiales. Para ello, se ha aprovechado su equivalencia espectral con Thematic Mapper (TM) para extender la aplicación de modelos ya existentes elaborados para TM. Se ha realizado una campaña de campo en la Albufera de Valencia para validar, en primer lugar, los diferentes modelos a partir de 2 imágenes TM. Finalmente, se han aplicado estos modelos a una serie de 6 imágenes Deimos-1 y se han obtenido mapas de concentración de clorofila-a, seston y transparencia de la Albufera para diferentes periodos del año.

Palabras clave: estado trófico, teledetección, Deimos-1, Albufera.

ABSTRACT

This work pretends to show the potential of the imagery of the Deimos-1 sensor to study the lakes and reservoirs water quality. For this, advantage was taken from its spectral equivalence with Thematic Mapper (TM) to expand the application of existing models developed for TM. A field campaign was carried out in the Albufera lake in Valencia to firstly validate the different models using 2 TM images. Finally, these models were applied to a set of 6 Deimos-1 images and maps of chlorophyll-a, seston and transparency of the Albufera were obtained for different times of the year.

Keywords: *trophic state, remote sensing, Deimos-1,Albufera.*

INTRODUCCIÓN

El estado trófico de lagos y embalses ha sido objeto de estudio a lo largo de los años. Esto se debe a que la calidad de sus aguas se puede ver deteriorada por el fenómeno de la eutrofización.

La directiva Marco del Agua 2000/60/CE, establece que todos los países miembros de la Unión Europea deben aplicar las medidas necesarias para prevenir el deterioro, mejorar y regenerar el estado de las masas de agua superficiales con objeto de alcanzar un buen estado ecológico.

Las técnicas de teledetección son útiles para la determinación de variables indicadoras del estado trófico de las masas de agua superficiales, como la concentración de clorofila-*a*, seston y la transparencia. En los últimos años se han utilizado diferentes sensores para su estudio, como el histórico Thematic Mapper (TM) a bordo de Landsat (Doña *et al*. 2011).

El objetivo del presente trabajo es aprovechar la equivalencia espectral entre los sensores TM y el reciente Deimos-1 para extender la aplicación de los modelos ya existentes a este último, y de esa forma incrementar la resolución temporal de las imágenes a tan solo 3-4 días y la resolución espacial a 22 m.

ZONA DE ESTUDIO

La Albufera de Valencia (39º 20´N, 0º 20'W) está situada en la costa mediterránea, 10 km al sur de la ciudad de Valencia. La comunicación de la Albufera con el mar se lleva a cabo mediante

tres canales o "golas", donde el flujo de agua es regulado por compuertas que mantienen su nivel en los valores más adecuados para el cultivo de arroz, al que se dedica la mayor parte de la extensión de la zona. La Albufera es un sistema hipertrófico, pero a diferencia de otros sistemas así catalogados es posible la renovación del agua mediante un sistema de compuertas, reguladas por la Junta de Desagüe. Estos flujos de entrada de agua al lago condicionan la evolución anual del sistema (Doña *et al*. 2011).

Se han realizado diversos estudios para intentar mejorar el estado de calidad de las aguas de la Albufera, incluso a nivel gubernamental mediante el Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar, aunque sin alcanzar todavía los objetivos propuestos en la Directiva Marco del Agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos verdad-terreno

Con el fin de validar los algoritmos utilizados en este trabajo, se registraron datos *in situ* en una campaña de campo realizada en la Albufera de Valencia (Tabla 1).

Campaña	Landsat-TM	Deimos-1
20/07/2010	20/07/2010	19/07/2010
05/08/2010	05/08/2010	07/08/2010
-	-	19/10/2010
-	-	04/11/2010
-	-	09/12/2010
-	-	23/01/2011

Tabla 1: Fechas de la campaña experimental, y de las imágenes Thematic Mapper y Deimos-1 utilizadas en el estudio.

En 15 puntos repartidos por la totalidad del lago se realizó un muestreo de clorofila-*a*, [Chl-*a*], (mg/m^3), transparencia (SD, cm) y concentración de seston, [Seston], (mg/l). Estas muestras se tomaron coincidiendo con el paso del sensor TM y próximas en el tiempo al paso de Deimos-1 (Tabla 1).

La determinación cuantitativa de [Chl-*a*] se realizó mediante el método tricromático de Strickland y Parsons (1968). Para estimar la [Seston] las muestras de agua se filtraron mediante un filtro de fibra de vidrio estándar, y posteriormente se midió el peso final en relación al volumen de la muestra inicial (APHA/AWWA/WEF 1995). En cuanto a la medida de la transparencia, se realizó *in situ* mediante un disco de Secchi (SD).

Análisis de las imágenes

Los sensores utilizados en este trabajo son TM y Deimos-1. Las características más relevantes de ambos se muestran en la Tabla 2, y las imágenes utilizadas se recogen en la Tabla 1.

Característica		Landsat-TM	Deimos-1
Resolución temporal		16 días	3 días
Resolución espacial		30 m	22 m
Bandas comunes (nm)	Green	528-609	520-600
	Red	626-693	630-690
	Near Infrared	776-904	770-900

Tabla 2: Características de Landsat-TM y Deimos-1.

Primero se convirtieron los valores digitales de las imágenes a radiancias aplicando la ecuación de calibración con las constantes especificas para cada uno de los sensores (Chander *et al.,* 2009, Deimos Imaging). A continuación se aplicó a las diferentes imágenes un umbral en la banda del infrarrojo cercano con el fin de discriminar los pixeles de agua de los de tierra. Después, se corrigieron las imágenes del efecto de la atmosfera aplicando el método del objeto oscuro desarrollado por Chavez (1996), de acuerdo con el primer borrador realizado para el Plan Nacional de Teledetección (PNT) sobre el tratamiento de imágenes de media resolución, con la colaboración de la Universidad de Alcalá (Chuvieco *et al*., 2010).Estudiaron diferentes métodos de corrección atmosférica así como su aplicación en diferentes superficies invariantes, entre ellas el agua, dando el método de Chavez mejores resultados. A parte, en este método no es necesario que el sensor tenga una banda espectral en el azul para poder aplicarlo. Finalmente se aplicaron los modelos propuestos por Fena *et al*., (2011):

$$[\text{Chl-}a] = [(1.06\pm0.14)\cdot \ln(G) + (1.80\pm0.22)]^3 \ (\text{mg/m}^3) \quad (1)$$

$$[\text{Seston}] = [(2.28\pm0.14)\cdot \ln(\text{NIR}) + (4.97\pm0.15)]^2 \ (\text{mg/l}) \quad (2)$$

$$\text{Transparencia} = [(4.59\pm1.09)\cdot (G)^{(-1.53\pm0.05)}] \ (\text{m}) \quad (3)$$

donde G es la banda perteneciente al verde y NIR la del infrarrojo cercano.

RESULTADOS

En la Tabla 3 se resume el análisis estadístico de la comparación entre los resultados obtenidos al aplicar los modelos a las dos imágenes TM, con las medidas *in-situ* coincidentes. Se muestran el Biased Estimator (BIAS), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Difference

(MAD) y Mean Absolute Porcentual Difference (MADP). Los resultados obtenidos son aceptables, con errores relativos que en la mayoría de los casos son inferiores al 25%.

20/07/10	BIAS	RMSE	MAD	MADP
[Chl-a](mg/m^3)	10	17	14	0.23
SD (cm)	0.01	0.04	0.04	0.27
[Seston] (mg/l)	-5	12	10	0.10
05/08/10	**BIAS**	**RMSE**	**MAD**	**MADP**
[Chl-a](mg/m^3)	10	17	14	0.23
SD (cm)	0.007	0.05	0.06	0.21
[Seston] (mg/l)	-3	11	10	0.18

Tabla 3: Resultados estadísticos de la aplicación de los algoritmos a las imágenes Landsat-TM coincidentes con campañas de campo.

A continuación se aplicaron los algoritmos de estimación de [Chl-*a*], [Seston] y SD a las imágenes Deimos-1, obteniendo así mapas de estos tres parámetros para las distintas fechas de estudio (Figuras 1-3). En las Figuras 1 y 2 se aprecia que los valores de [Chl-*a*] están inversamente relacionados con los valores de transparencia, ya que a mayores valores de [Chl-*a*] se obtienen menores valores de transparencia. El aumento repentino en la [Chl-a] entre los días 19 y 20 de Julio, podría estar causado por la ausencia de viento durante esos días, ya que en este caso los organismos presentes tenderían a subir a la superficie de la masa de agua.

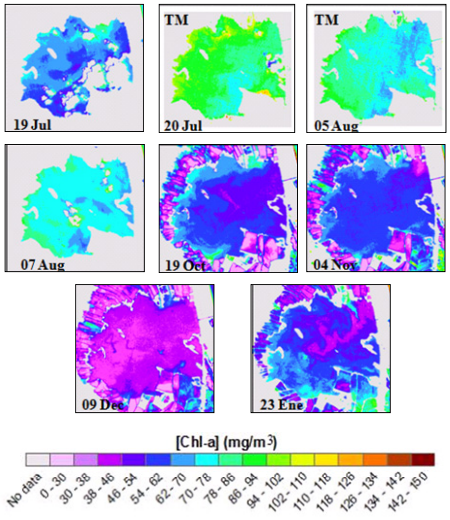


Figura 1: Mapas de concentración de clorofila-*a* en la Albufera de Valencia.

En la Figura 1 se observa que en los meses de verano se presentan los valores máximos de [Chl-*a*], lo que se puede deber a la escasa renovación del agua del lago durante esa estación.

En el caso de la transparencia (Figura 2), también se puede observar que los valores más bajos se presentan en las imágenes de verano, con valores comprendidos entre 10 y 20 cm en el mes de Agosto. En cambio, para los meses de otoño e invierno se llegan a alcanzar valores mayores a 40 cm.

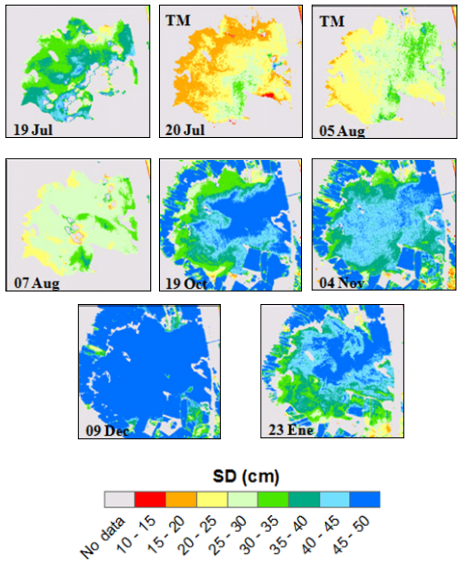


Figura 2: Mapas de transparencia, en la Albufera de Valencia.

En la Figura 3 se puede ver que la variabilidad espacial de [Seston] es menor, a lo largo del año, que para las otras variables de estudio. De nuevo, los mayores valores se presentan en los meses de verano, como en los casos anteriores.

En un próximo trabajo procederemos a validar los algoritmos aplicados a imágenes Deimos-1 mediante la realización de campañas de campo coincidentes con la adquisición de las imágenes del satélite.

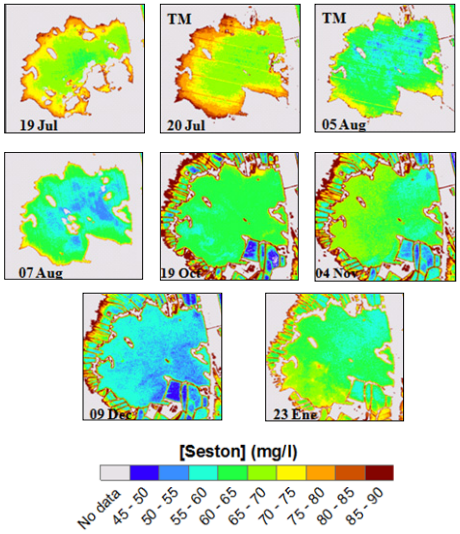


Figura 3: Mapas de concentración de seston, en la Albufera de Valencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos aprovechado la equivalencia espectral entre los sensores TM y Deimos-1 para extender a este último la aplicación de modelos ya existentes, y previamente elaborados para TM, destinados a la determinación de variables indicadoras del estado trófico de agua.

En cuanto a la aplicación de los modelos propuestos por Fena *et al*., 2011, para la determinación de de variables indicadoras del estado trófico como la [Chl-a], SD y [Seston], se han obtenido resultados aceptables para la zona de estudio, con errores relativos, en la mayoría de los casos, inferiores al 25%.

En un futuro próximo se necesitaría validar los algoritmos aplicados a imágenes Deimos-1 mediante la realización de campañas de campo coincidentes con la adquisición de las imágenes del satélite.

Una de las ventajas de utilizar el sensor Deimos-1, es su resolución temporal, que permite obtener imágenes cada 3 días con una resolución espacial de 22m.

BIBLIOGRAFÍA

APHA/AWWA/WEF, 1995, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, (Washington, DC: American Public Health Association, APHA).

CHANDER, G., MARKHAM, B. L., and HELDER, D. L., 2009. *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors*, Remote Sens. Environ., vol. 119, pp. 893-903.

CHAVEZ, P. S. Jr., 1996, *Image-Based atmospheric corrections- revisited and improved.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing., vol. 62,nº9, pp. 1025-1036.

CHUVIECO, E., and HANTSON, S., 2010, *Estudio de los tratamientos a realizar sobre las imágenes de sátelite de media resolución adquiridas para el PNT.*

DOÑA, C., SÁNCHEZ, J. M., CASELLES, V., and DOMINGUEZ, J.A., 2011, *Towards a unique relationship for the study of the trophic state of lakes and reservoirs with Thematic Mapper*. Int. Journal of Remote Sensing (Aceptado).

EUROPEAN COMMISSION 2000, *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities, 327, pp. 1-72.

FENA, A., DOÑA, C., SÁNCHEZ, J. M., CASELLES, V., and CAMACHO, A., 2011, *Herramientas para el estudio del estado de eutrofización de masas de agua continentales*. Revista Española de Teledetección (En revisión).

STRICKLAND, J.D.H. & PARSONS, T.R., 1968. *A practical Handbook of seawater analysis*. Bul. Fish. Res. Bd. Of Canada, Otawa, 167: 311.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia por la ayuda concedida (Proyecto CGL2010-17577 y contrato Juan de la Cierva del Dr. J. M. Sánchez) y a la Generalitat Valenciana (Proyecto PROMETEO/2009/086). Así como la ayuda en el tratamiento de las muestras por parte de C. Rochera del Dpto. Ecología y Microbiología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad de Valencia.

Cartografía histórica del helecho acuático invasor *Azolla filiculoides* en la marisma de Doñana

R. Díaz-Delgado, I. Ameztoy, D. Aragonés y J. Bustamante

LAST-EBD. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Estación Biológica de Doñana (CSIC). Avda. Américo Vespucio, s/n. 41092 Sevilla (Andalucía, España). Tel: 954232340, Fax: 954621125. Correo electrónico: rdiaz@ebd.csic.es

RESUMEN

En este trabajo se detalla el procedimiento de cartografiado anual de un "target" de difícil detección, el helecho acuático invasor *Azolla filiculoides*, en la marisma de Doñana desde su aparición en este espacio natural protegido. El objetivo por tanto consistió en refinar los métodos de detección de esta especie mediante el empleo de imágenes Landsat TM y ETM+ y cartografiar su distribución máxima anual desde el año 2001 con objeto de determinar la superficie afectada y evaluar los factores que determinan la selección de hábitat de esta especie invasora.

Palabras clave: Azolla filiculoides, especie invasora, marismas de Doñana, Landsat TM y ETM+, Target Detection Finder, AUC.

ABSTRACT

This paper describes the procedure for yearly mapping a difficult target to detect, the alien aquatic fern *Azolla filiculoides*, in Doñana marshlands since its first record. The aim therefore was to choose the best method of detection of this species by using Landsat TM and ETM + and to map the maximum distribution area yearly since 2001 to determine the area affected and assess the factors determining habitat selection of this invasive species.

Keywords: *Azolla filiculoides, alien species, Doñana marshlands, Landsat TM and ETM+, Target Detection Finder, AUC*

INTRODUCCIÓN

El helecho acuático *Azolla filiculoides* es una pequeña planta flotante originaria de América y naturalizada en amplias zonas de Europa templada. Su forma y fisiología de crecimiento limitan el acceso a la luz a la vegetación sumergida. *Azolla* tiende a agotar el fósforo, genera anoxia por debajo de los densos tapices que forma, y termina impidiendo el desarrollo de otra vegetación sumergida o flotante (García Murillo et al. 2004). Este helecho fue detectado por primera vez en la marisma de Doñana en el año 2000, y se ha encontrado de manera recurrente durante la época de inundación ocupando, aparentemente, extensiones cada vez mayores. En Doñana invade áreas de marisma abierta (masas de agua libre), marisma cubierta por helófitos y macrófitos, lucios y caños. Es por tanto difícil de cartografiar mediante métodos convencionales dado que la marisma de Doñana, con una extensión de 25000 ha es de difícil acceso cuando está inundada. El helecho crece y se extiende cuando comienza la inundación (a partir de enero) para acabar muriendo a lo largo del proceso de secado (meses de mayo a junio). Esto significa que existe un momento a lo largo de su ciclo hidrológico (del 1 de Septiembre al 31 de Agosto del año posterior) en el que su distribución anual es máxima dependiendo del ciclo de inundación correspondiente.

Azolla aparece en la marisma como cubierta dominante (*Azolla* densa) o como cobertura mixta (*Azolla* mixta) por debajo de los helófitos, tales como la castañuela (*Scirpus maritimus*), el bayunco (*Scirpus litoralis*), el candilejo (*Juncus subulatus*) o el almajo salado (*Arthrocnemum macrostachyum*). En las zonas invadidas termina cubriendo totalmente la lámina de agua y por lo tanto modifica las características reflectivas de la superficie.

El objetivo por tanto de este trabajo fue seleccionar el mejor método de discriminación espectral de *Azolla* en las imágenes Landsat para cartografiar su distribución en la marisma de

Doñana. Se empleará la serie temporal disponible de imágenes Landsat para reconstruir desde su aparición el área máxima de distribución de *Azolla* para cada ciclo hidrológico. El proyecto de investigación en el que se enmarca el presente trabajo pretende determinar los factores ambientales que favorecen o limitan la aparición y expansión de esta especie invasora en la marisma de Doñana con objeto de predecir las áreas de invasión en los años subsiguientes.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en la marisma del Parque Nacional de Doñana (SO España), en el estuario del río Guadalquivir. La marisma es un ecosistema de un alto dinamismo hídrico estacional. El periodo de inundación se inicia con las primeras lluvias de octubre y continúa progresivamente, hasta inundar toda la superficie, entre diciembre y marzo. En junio, la ausencia de lluvias y la subida progresiva de las temperaturas, favorecen las pérdidas por evaporación y provocan su desecación (Aragonés 2005). Doñana presenta un clima mediterráneo, con una precipitación anual media de 552.3 mm y una temperatura media anual de 16.9 ºC (estación meteorológica del Palacio de Doñana, 1978-2010).

MATERIAL Y MÉTODOS

Desde el ciclo 2003-2004 el LAST-EBD (Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana) lleva a cabo campañas de adquisición de datos de verdad-terreno en la marisma mediante transectos registrando la presencia y recubrimiento de *Azolla* en coincidencia con la adquisición de las imágenes por los sensores multiespectrales TM, ETM+ a bordo de los satélites Landsat. Además, se perimetran las manchas homogéneas, densas y extensas. En ellas la *Azolla* aparece en tapetes altamente reflectivos en el red edge (680-750 nm) lo que indica una elevada actividad fotosintética, muy por encima a la de la vegetación nativa, en lugares inundados (Díaz-Delgado et al. 2008, Figura 1). Recordemos que Azolla vive en simbiosis con *Anabaena azollae*, una cianobacteria capaz de fijar nitrógeno atmosférico, lo que la favorece ante el resto de especies (Peeters y Meeks 1989).

De acuerdo con estas características y la información recabada sobre el terreno el primer paso fue determinar para cada ciclo la escena de Landsat TM o ETM+ más adecuada para discriminar la máxima superficie ocupada en cada ciclo hidrológico. Para ello se analizaron los perfiles temporales de las diferentes bandas e índices (NDVI y Greeness-Tasseled Cap) de cada ciclo hidrológico en los píxeles ocupados por esta especie. La serie temporal de los satélites Landsat desde el año 2001 consta de 60 imágenes hasta el año 2009. La serie se encuentra georreferenciada, corregida radiométricamente y normalizada para facilitar su uso (Aragonés et al. 2005).

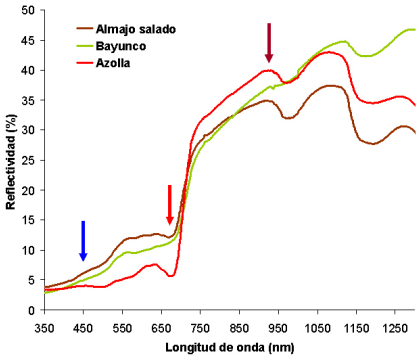


Figura 1: Respuesta espectral de Almajo salado, el bayunco y *Azolla* en la región del visible e infrarrojo cercano. Nótense los picos de absorción de *Azolla* en la región del visible (azul y rojo) y la gran reflectividad en la región del Infrarrojo cercano (700-1100 nm).

Una vez determinada la escena y fecha apropiada se llevó a cabo un análisis de separabilidad espectral con el resto de especies acuáticas. Esto permitió determinar la fecha no sólo en la cual Azolla alcanzó su máxima extensión para cada ciclo hidrológico si no para la cual resultaba más fácilmente discriminable del resto de especies.

Posteriormente se testaron diferentes técnicas de detección y clasificación incluyendo Isodata, Máxima Verosimilitud, Mahalanobis y Target Detection Finder (TDF). En el trabajo previo de Aragonés et al. (2009) se puso de manifiesto las limitaciones de utilizar clasificación no supervisada para cartografiar sistemáticamente el área ocupada por esta especie invasora. Los resultados fueron validados utilizando como áreas de test los datos de verdad-terreno recabados en las campañas de campo. Las clasificaciones resultantes en probabilidad de presencia fueron evaluadas mediante el empleo del AUC (Area Under the Curve) derivada del ROC (Receiver Operating Characteristic, Murtaugh 1996). De esta forma puede efectuarse una validación sin necesidad de establecer el umbral de probabilidad.

RESULTADOS

Los análisis de separabilidad y perfiles temporales permitieron escoger entre las escenas disponibles y libres de nubes más adecuadas para utilizar en las clasificaciones. De acuerdo con la variabilidad interanual del ciclo de inundación y el hidroperiodo (duración de la inundación), *Azolla* muestra en la marisma de Doñana máximos de distribución normalmente entre los meses de abril a junio. Algunas cubetas de pequeña superficie con inundación permanente actúan como reductos de la especie fuera de esos meses. Además en muchos casos las campañas sobre el terreno constataron la ausencia absoluta de manchas densas de *Azolla* en determinados ciclos.

De todos los métodos, el TDF permitió identificar con mejor acierto (AUC>0.6 salvo para los años 2005 por sequía y 2006, tabla 1) las zonas ocupadas por esta especie en los casos de encontrarse en clara dominancia frente a otras especies (*Azolla* densa). El método TDF (Chang y Heinz, 2000) utiliza información espectral de la "clase objeto", la *Azolla* densa y del fondo (agua sin vegetación). El algoritmo Spectral Angle Mapper determina la distancia espectral de cada píxel de la escena al objeto. La figura 2 muestra un ejemplo de cartografía resultante para el año 2007 utilizando como umbral de probabilidad o distancia espectral igual a 0.8.

Fecha	AUC
04/05/2001	0.75
29/04/2002	0.85
16/04/2003	0.78
26/04/2004	0.91
15/05/2005	no inundado
08/04/2006	0.45
05/05/2007	0.93
13/04/2008	0.68
11/06/2009	0.62

Tabla 1: Valores de AUC de las clasificaciones con TDF para cada fecha seleccionada como representativa de cada ciclo.

Ninguno de los métodos empleados de discriminación espectral permitió clasificar con un acierto razonable las zonas cubiertas en cada ciclo por masas de *Azolla* dispersa mezclada con otras especies, mayoritariamente de helófitos.

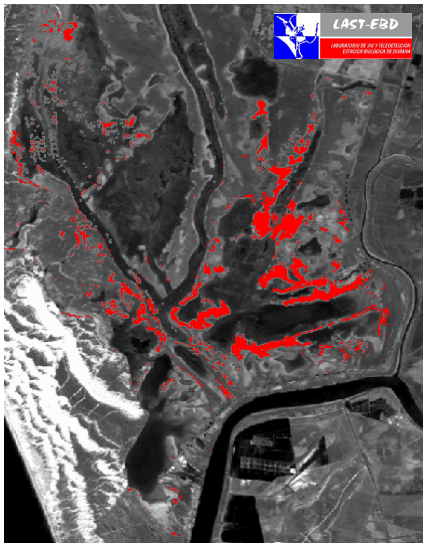


Figura 2: Resultado de la clasificación con el método TDF (umbral >0.8) para el año 2007.

De acuerdo con los resultados pudo reconstruirse la superficie cubierta por los tapetes de *Azolla* densa en la marisma de Doñana desde el año 2001 al 2009 utilizando como umbral de distancia igual a 0.8 (Figura 3).

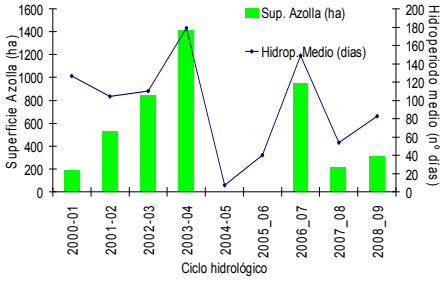


Figura 3: Superficie cartografiada de *Azolla* densa mediante TDF desde su aparición en la marisma de Doñana. El año 2005 la marisma no se inundó por sequía y el 2006 el área cubierta por *Azolla* densa proporcionó resultados poco aceptables. Se muestra también los valores de hidroperiodo medio de la marisma para cada ciclo.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido determinar el mejor método para cartografiar periódicamente la superficie cubierta por *Azolla filiculoides* en el ámbito de la marisma del Parque Nacional de Doñana a pesar de su gran variabilidad interanual y ocurrencia local. El empleo de un procedi-

miento de selección de fechas basado en los perfiles temporales de bandas e índices permite determinar las más adecuadas para cada ciclo. El método TDF fue confirmado como el mejor de acuerdo con la información procedente de la verdad-terreno. No obstante, los resultados ponen de manifiesto la dificultad de detectar las extensiones cubiertas por Azolla dispersa mezclada con otras especies dominantes de la marisma.

Los cambios en la superficie cartografiada muestran la tendencia histórica de expansión de esta especie invasora que se encuentra fuertemente vinculada a periodos húmedos (Figura 3). La tendencia observada muestra un aumento en los primeros años alcanzando un pico de distribución máximo el año 2007. Posteriormente se constata una reducción progresiva de la superficie ocupada por *Azolla* densa hasta la actualidad.

La extracción de información auxiliar (turbidez, profundidad, comunidades próximas, % aguas libres, etc.) sobre las áreas cubiertas por este helecho permitirá valorar los factores que determinan su presencia en previsión de poder establecer las áreas de mayor vulnerabilidad a la invasión.

BIBLIOGRAFÍA

ARAGONÉS D., DÍAZ-DELGADO, R. y BUSTAMANTE, J. 2005: *Tratamiento de una serie temporal larga de imágenes Landsat para la cartografía de la inundación histórica de las marismas de Doñana*. XI Congreso Nacional de Teledetección, Puerto de la Cruz. Tenerife. Pag 407-410

ARAGONÉS, D., FERNÁNDEZ-ZAMUDIO, R., BUSTAMANTE, J., GARCÍA-MURILLO, P., DÍAZ-DELGADO, R. y CIRUJANO, S. 2009. *Cartografía de la superficie invadida por Azolla filiculolides en el Parque Nacional de Doñana mediante imágenes Landsat*. XIII Congreso Nacional de Teledetección. Agua y desarrollo sostenible. Editores: S. Montesinos y L. Fernández, pag 97-100.

BUSTAMANTE J., F. PACIOS, R. DÍAZ-DELGADO y D. ARAGONÉS, 2009: *Predictive models of turbidity and water depth in the Donana marshes using Landsat TM and ETM+ images*, Journal of Environmental Management, 90, 2219-2225.

CHANG, C-I. y HEINZ, D.C. 2000. *Constrained subpixel target detection for remotely sensed imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 1144-1159.

DÍAZ-DELGADO R., BUSTAMANTE, J. y ARAGONÉS, D. 2008. *La teledetección como herramienta en la cartografía de especies invasoras: Azolla filiculoides en Doñana*. En: Invasiones Biológicas. Editores: Vilá, M., Valladares, F., Traveset, A., Santamaría, L. y Castro, P. Colección Divulgación CSIC. pag. 159-163.

GARCÍA MURILLO, P., SÁNCHEZ-GULLÓN, E., COBO, M.D. y GARRIDO, H. 2004. *Plantas exóticas e invasoras en el Parque Nacional de Doñana*. Revista de Medio Ambiente, 46. Consejería de Medio Ambiente.

MURTAUGH, P. A. 1996. *The statistical evaluation of ecological indicators.* Ecological Applications, 6, 132-139.

PETERS, G.A. y MEEKS, J.C. (1989) *The Azolla-Anabaena symbiosis: basic biology*. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 40, 193–210.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda prestada a los integrantes del Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana por su apoyo en las labores de campo. Asimismo, agradecemos el apoyo prestado por el Espacio Natural de Doñana y la información sobre localización de Azolla en el terreno. Rocío Fernández Zamudio y Pablo García Murillo contribuyeron también a la obtención de áreas de entrenamiento sobre el terreno. El trabajo no habría sido posible sin la financiación del Proyecto de Investigación de Excelencia de la Junta de Andalucía titulado "Análisis del riesgo de invasión por plantas exóticas a escala continental, regional y de paisaje" (RNM-4031). Este trabajo está también enmarcado dentro del proyecto de investigación del Plan Nacional del MICINN "Reconstrucción histórica mediante teledetección de la dinámica hídrica y de las comunidades de vegetación acuática de las marismas de Doñana" CGL2009-09801.

Monitorización y análisis de parámetros medioambientales usando datos del sensor MODIS

F. Eugenio, R. Topham y J. Marcello

Departamento de Señales y Comunicaciones. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Campus de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria (Las Palmas, España). Correo electrónico: feugenio@dsc.ulpgc.es

RESUMEN

La teledetección juega un papel fundamental en la monitorización del medioambiente y la planificación de las políticas adecuadas de sostenibilidad. En este contexto, se ha desarrollado una herramienta software que permite la monitorización y análisis de un determinado número de indicadores estratégicos, inicialmente en el ámbito de las Islas Canarias, pero aplicable a cualquier otra región de interés. Para este propósito se hace uso de los datos del sensor MODIS (satélites Aqua y Terra) disponibles desde febrero de 2000 hasta la actualidad. La aplicación permite realizar la monitorización y posterior análisis de parámetros medioambientales de interés con la periodicidad temporal deseada y la distribución geográfica seleccionada.

Palabras clave: teledetección, medioambiente, MODIS.

ABSTRACT

Remote sensing plays a key role in the environmental monitoring and the planning of appropriate sustainability policies. In this context, we have developed a software tool that allows monitoring and analysis of a number of strategic environmental indicators, initially in the Canary Islands area, but applicable to any other region of interest. For this purpose we use MODIS (Terra & Aqua satellites) data available from February 2000 to present. The tool enables the monitoring and subsequent analysis of environmental parameters of interest with the desired temporal frequency and the selected geographical distribution.

Keywords: *remote sensing, environment, MODIS.*

INTRODUCCIÓN

La última evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, divulgada en el Cuarto informe (IPPC, 2007), señaló una tendencia creciente en los eventos extremos observados en los pasados cincuenta años. Además, considera probable que las altas temperaturas, olas de calor y fuerte pluviosidad se hagan más frecuentes en el futuro, lo cual puede ser desastroso para la humanidad.

En particular el calentamiento progresivo del planeta, causado por las emisiones de gases de efecto invernadero, generados en buena parte por el hombre, está agravando los problemas más acuciantes que afronta la población mundial y que redunda en la pobreza (ACDSCC, 2007). En este contexto, algunos de los retos más importantes de este siglo que necesitan ser entendidos y gestionados son el cambio global, la degradación medioambiental y la sostenibilidad.

Este trabajo pretende identificar los impactos sobre el medio ambiente, potencialmente causados por el cambio global. Para ello, la observación de la Tierra desde el espacio mediante sensores multiespectrales constituye una herramienta fundamental al proporcionar una visión sinóptica y repetitiva de la superficie terrestre, facilitando la interpretación de los múltiples procesos que afectan a la Tierra, sus interacciones y la retroalimentación entre ellos. Para realizar este estudio de monitorización y análisis de parámetros medioambientales se ha desarrollado una herramienta software que permite el diagnóstico de una serie de indicadores estratégicos relacionados con la protección del medio ambiente facilitando la toma de decisiones eficaces y oportunas.

SENSORES DE TELEDETECCIÓN Y PARÁMETROS MEDIOAMBIENTALES

El sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), instrumento embarcado a bordo de los satélites *Aqua* y *Terra* de la NASA (MODIS, 1999), proporciona datos científicos (SDS) de observación de la Tierra. Se ha generado, a partir de datos proporcionados por ambos satélites, una base de datos de imágenes de nivel 3 y nivel 4 correspondientes al periodo 2000–2010. Los parámetros analizados durante este periodo han sido los 20 siguientes:

- Atmosféricos: (i) Aerosoles: concentración oceánica, concentración terrestre y espesor óptico; (ii) nubes: espesor óptico, presión y temperatura; (iii) ozono; (iv) vapor de agua: en las nubes y en zonas despejadas.
- Marinos: (i) Concentración de clorofila; (ii) producción primaria y (iii) Temperatura superficial del mar: diurna y nocturna.
- Terrestres: (i) Cobertura terrestre: tipo 1 (IGBP), tipo 2 (MODIS) y tipo 3 (UMD); (ii) temperatura superficial terrestre: diurna y nocturna y, (iii) vegetación: EVI y NDVI.

La herramienta software implementada para el análisis y monitorización de los parámetros medioambientales reseñados previamente, se muestra en la figura 1. Esta herramienta se ha empleado para realizar estudios mensuales, multianuales y estacionales de las variaciones medias y anomalías del conjunto de parámetros, en la región de las Islas Canarias y en otras áreas geográficas de interés: Península Ibérica, Mar Mediterráneo y el Atlántico Norte.

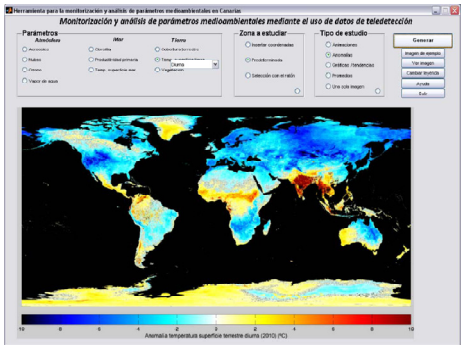


Figura 1: Interfaz Gráfica Usuario APM–GUI

APM–GUI genera, adicionalmente, varios tipos de representaciones: mapas de promedios y de anomalías, gráficas para analizar la evolución temporal y la identificación de las tendencias, y secuencias animadas de promedios o anomalías.

RESULTADOS

Del amplio conjunto de datos obtenidos, a continuación, se presenta un extracto de los resultados más relevantes obtenidos de los estudios realizados de diferentes parámetros atmosféricos, marinos y terrestres de diferentes áreas geográficas para ambos satélites, incluyendo algunas gráficas específicas sobre la evolución de dichos parámetros a lo largo de los últimos 10 años analizados, para nuestra región geográfica de interés (Islas Canarias).

Parámetros marinos

En la figura 2 se muestran mapas de la temperatura superficial del mar (SST), promedio del periodo completo 2000–2010 y anomalía del 2010. Se pueden observar anomalías tanto en el calentamiento como en el enfriamiento de determinadas áreas durante 2010 con respecto a la media de la década. Un año 2010 que registró temperaturas excepcionalmente altas en invierno en la zona de las Islas Canarias (Osborn, 2011).

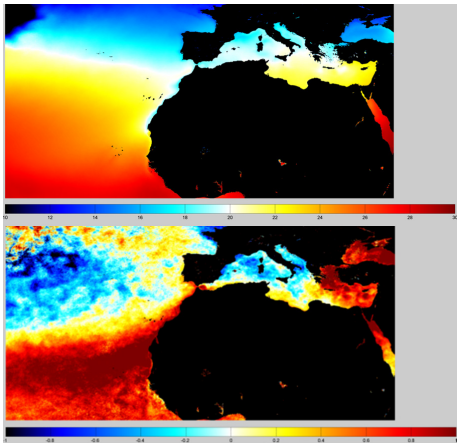


Figura 2: SST nocturna: (a) promedio 2000–2011 y (b) anomalía del año 2010 respecto a la media.

En la figura 3 se incluyen las gráficas de evolución de la SST nocturna en el área de las Islas Canarias. Se observa su carácter estacional, la buena correlación de los datos obtenidos por el sensor MODIS para los satélites *Aqua* y *Terra* y, específicamente, se detecta un calentamiento superior a lo normal durante el 2010, al superar la temperatura más fría los 19ºC.

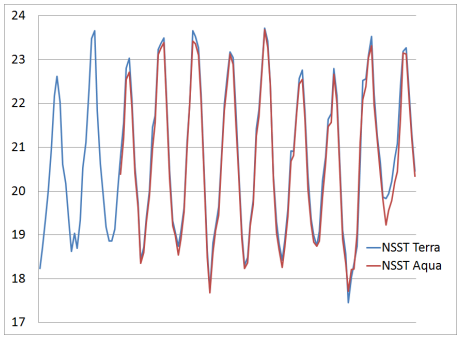


Figura 3: SST nocturna para Canarias, datos *Aqua y Terra* entre marzo 2000 y enero 2011.

En la figura 4 se muestra el promedio de la concentración de clorofila al inicio y al final del periodo. Se aprecia una disminución de la zona de afloramiento en la costa noroeste de África, que se corrobora en la gráfica de la figura 5.

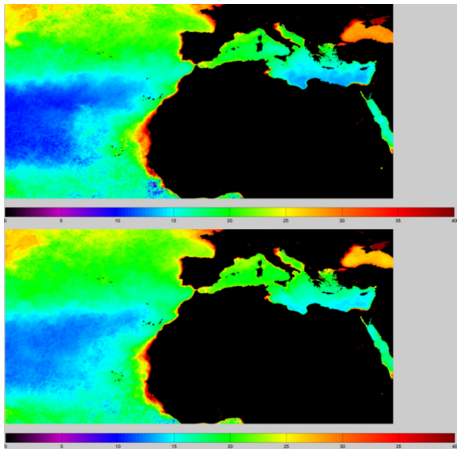


Figura 4: Promedio de la concentración de clorofila para los años 2001 y 2010.

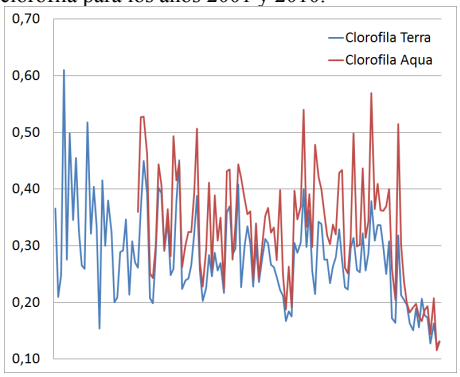


Figura 5: Concentración de clorofila para la zona de Canarias, datos *Aqua y Terra* entre marzo 2000 y enero 2011.

Parámetros terrestres

A modo de ejemplo, se han incluido algunos resultados relativos a la temperatura de la superficie terrestre (LST) y a la vegetación. En la figura 6 se muestran mapas de la LST nocturna (promedio del periodo completo y anomalía del 2010). Para el año 2010, se aprecia en la figura de anomalías un calentamiento medio superior a 1ºC en gran parte de África Noroccidental, mientras el continente europeo se ha enfriado en una proporción similar respecto a la media decadal.

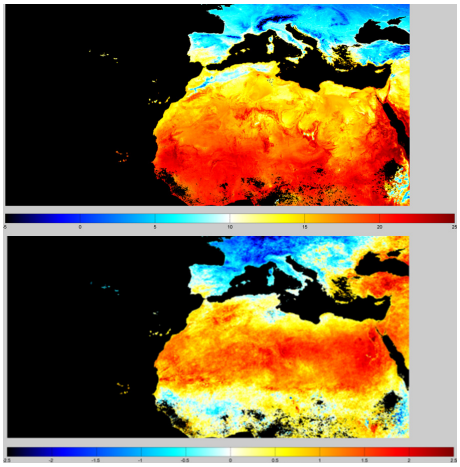


Figura 6: LST nocturna (NLST) promedio 2000–2011 y anomalía del 2010 respecto a la media.

En la figura 7, para Canarias, se observa que los inviernos de 2005 y 2009 fueron los más fríos, mientras 2010 tuvo el más suave (Osborn, 2011).

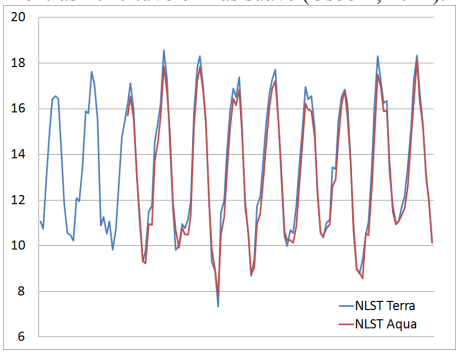


Figura 7: LST nocturna (NLST) para la zona de Canarias, datos *Aqua y Terra* entre marzo 2011 y enero 2011.

En cuanto a la vegetación, la figura 8 permite extraer que, en general, las variaciones han sido mínimas a lo largo de estos últimos 10 años, aunque para Canarias la tendencia del NDVI (figura 9) ha sido positiva (Arco, 2011).

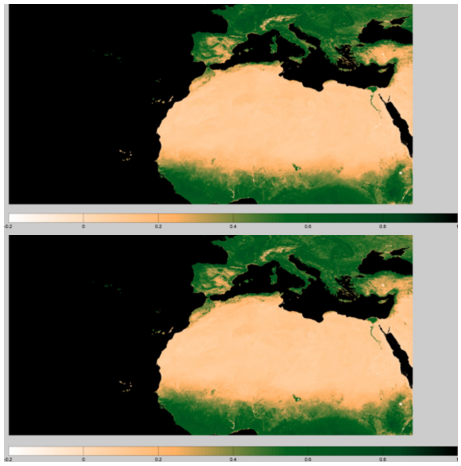


Figura 8: Índice de vegetación NDVI para los años 2001 y 2010.

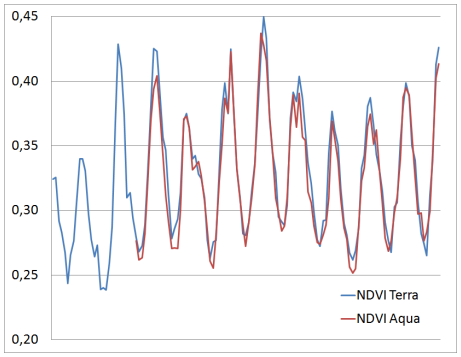


Figura 9: Índice de vegetación NDVI para la zona de Canarias, datos *Aqua y Terra* entre marzo 2000 y enero 2011.

Parámetros atmosféricos

Por su especial interés en las Islas Canarias, en la figura 10, se incluye la evolución del espesor óptico de los aerosoles. Se aprecia un aumento en la frecuencia e intensidad de episodios con calimas en los últimos años.

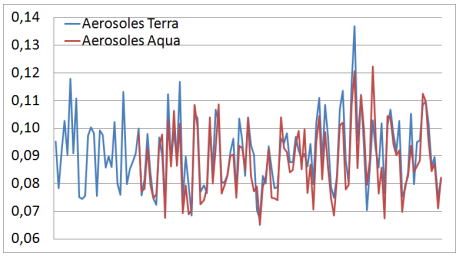


Figura 10: Espesor óptico de aerosoles para la zona de Canarias usando datos *Aqua y Terra* entre marzo 2000 y enero 2011.

CONCLUSIONES

Este trabajo ha consistido en la monitorización y análisis de un determinado número de indicadores estratégicos que favorecen el análisis y la protección del medio ambiente costero, litoral, terrestre y atmosférico, inicialmente en el ámbito de las Islas Canarias, pero aplicable a cualquier otra región de interés. Para ello se ha desarrollado una aplicación software *ad–hoc* versátil, robusta y que permite múltiples funcionalidades adicionales.

BIBLIOGRAFÍA

ARCO AGUILAR, M.J., et al., 2010. *Actual and potential natural vegetation on the Canary Islands and its conservation status*. Biodiversity and Conservation Volume 19 Number 11 Pages 3089–3140.

Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático, Gobierno de Canarias: Estrategia Canaria de Lucha contra el Cambio Climático (2008–2015). (http://www.gobiernodecanarias.org/agenciasostenible/doc/servicio_doc/eclcc.pdf)

IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change): http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_climate_change_2007_the_ar4_synthesis_report_spanish.htm

NASA–MODIS: http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php

OSBORN, T., 2011. *Winter 2009/2010 temperatures and a record–breaking North Atlantic Oscillation Index*. Weather Volume 66 Issue 1 pages 19–21.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a NASA MODIS por las imágenes proporcionadas. Este trabajo ha sido financiado con el proyecto TELECAN MAC 2007–2013 (MAC/3/C181).

Herramienta para generar secciones fluviales a partir de Modelos Digitales del Terreno obtenidos del LIDAR y su aplicación en el análisis geomorfológico de zonas inundables

J.C. Fernández[1] y J. Crespo[1]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Edificio de Investigación, Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: jcarlos@indurot.uniovi.es

RESUMEN

En relación al Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) se están desarrollando numerosos estudios de inundabilidad que utilizan los modelos LIDAR como información base. En el presente trabajo se muestra una aplicación desarrollada en el INDUROT que ha sido integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG). La aplicación diseñada se caracteriza por generar, a partir de un MDT, perfiles longitudinales y transversales al cauce fluvial. En este último caso, la aplicación realiza una primera aproximación de la sección asociada a los niveles de agua que determine el técnico de una manera sencilla, rápida y de fácil manejo. La comparación de resultados permite al técnico obtener información de interés sobre la probabilidad de desbordamiento en diferentes puntos de la zona inundable, extrapolando información en zonas con datos históricos y geomorfológicos a otras donde la información es más escasa.

Palabras clave: LIDAR, MDT, cauce geomorfológico, sección, inundabilidad.

ABSTRACT

In relation to the National Flood Zones Mapping (SNCZI) numerous flood studies are being developed using LIDAR models as an information base. In the following research, a software developed in INDUROT, as well as integrated in a Geographic Information System (GIS), is shown. This method is characterized by the generation of both cross-section and longitudinal channel river profiles from a DMT. This program enables a first approach to the flooded section associated to the water levels determined by the technician, through a simple, fast and user friendly tool. The comparison of results allows the technician to obtain relevant information about the probability of flooding in different parts of the flood zone, by extrapolating information from areas with historical and geomorphological data to others where information is scarce.

Keywords: *LIDAR, DMT, geomorphological channel, section, inundability*

INTRODUCCIÓN

La Directiva europea 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, exige la realización de mapas de peligrosidad y de riesgo para el año 2013. En relación con estos trabajos España incorporó entre sus programas el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), dentro del cual se están desarrollando numerosos estudios de inundabilidad que utilizan como información base los modelos obtenidos a partir de los vuelos LIDAR.

El INDUROT ha realizado y realiza diversos trabajos para el SNCZI, aplicando especialmente metodologías geomorfológicas y análisis históricos, aproximaciones de elevado interés al basarse en datos reales sobre inundaciones. El volumen de este tipo de información llega a ser muy importante en determinados tramos, permitiendo aproximaciones cuantitativas de elevada precisión. En contraposición, los datos pueden ser más escasos en otros sectores, limitando la aplicación de este tipo de evidencias de elevado interés. Para aprovechar en lo posible esta información, suelen analizarse otras variables complementarias, destacando el estudio de secciones del medio fluvial, que permiten realizar extrapolaciones de los datos constatados en las zonas con mayor volumen de información a otros tramos próximos con escasez de información.

En el presente trabajo se muestra una aplica-

ción desarrollada en el INDUROT que ha sido integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), concretamente en ArcMap, el software cartográfico utilizado en varios estudios. La aplicación diseñada se caracteriza por generar, a partir de un MDT, perfiles fluviales longitudinales y transversales al cauce y a la zona inundable, cuya ubicación va en función de las necesidades del técnico. En el caso de los perfiles trasversales, la aplicación realiza de forma inmediata una primera estimación de la sección asociada a los diferentes niveles de la lámina de agua. Los datos de inundaciones históricas o las evidencias geomorfológicas de erosión y sedimentación reconocidas en las llanuras aluviales pueden asociarse a un determinado calado y, en consecuencia, a una determinada sección fluvial que será indicadora de una inundabilidad concreta. Mediante la comparación de secciones entre tramos, es posible extrapolar dicha peligrosidad a un tramo próximo donde la información sea más escasa. De esta forma es posible realizar un mayor aprovechamiento de estas evidencias de peligrosidad basadas en datos reales de inundaciones.

DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Durante el proceso de análisis o geoprocesamiento continuamente se suceden determinadas necesidades que son solucionadas a través de diferentes aplicaciones informáticas. El resultado, la calidad y la velocidad de un determinado proceso varían en función de la aplicación usada. Por este motivo en muchas ocasiones es preciso utilizar más de una aplicación para completar la totalidad de un proceso, obligando al técnico o usuario a tener unos mínimos conocimientos de cada una de estas aplicaciones y, adicionalmente, incrementando el tiempo total empleado para la realización de dicho proceso ya que, a menudo, es preciso realizar una serie de transformaciones de formato entre aplicaciones.

En muchos procesos de simple índole matemática o geométrica el instituto resuelve este problema atendiendo a las demandas específicas de sus técnicos mediante el desarrollo interno de sus propias aplicaciones. Este sistema reduce considerablemente el tiempo empleado para la realización de determinados procesos, ya que las herramientas son integradas directamente sobre las aplicaciones más usadas por los técnicos, como es el caso de ArcMap (Figura 1).

Esta herramienta elabora perfiles o secciones mediante el cálculo de intersecciones entre una sección dada y una capa usada como información base (MDT, Contour, archivos CAD dgn, dwg,dxf). En este proceso de cálculo se van recopilando datos como distancias o pendientes que posteriormente pueden ser mostrados junto al gráfico del perfil.

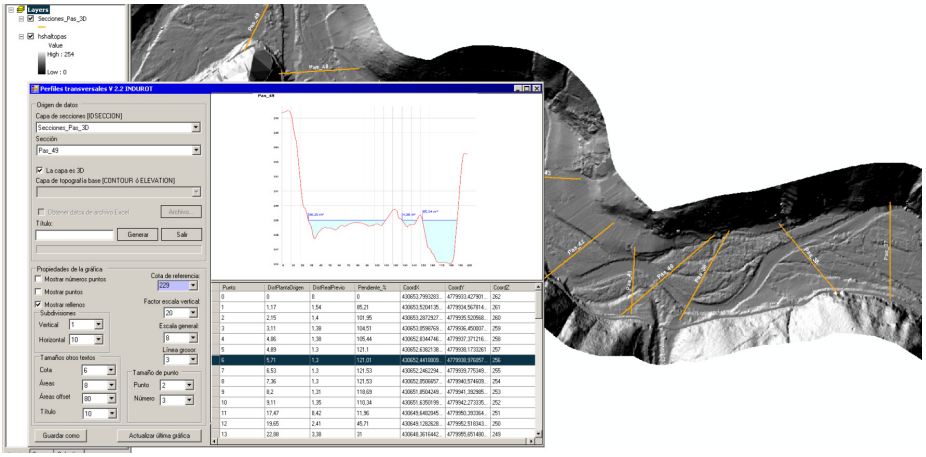


Figura 1: Vista general de la herramienta de perfiles integrada en ArcMap.

RESULTADOS

Perfiles longitudinales

En la parte superior izquierda de la figura 2 se muestra el trazado del río Nalón sobre el MDT del Principado de Asturias, cuya resolución de pixel es de 5x5 m. En la parte inferior de dicha figura se muestra el perfil longitudinal con orientación Sur-Norte generado con la herramienta diseñada a partir del MDT, y cuya escala vertical está exagerada para apreciar mejor la pendiente. En él pueden apreciarse las diferentes pendientes que caracterizan al río Nalón a lo largo de todo su recorrido, valores que también nos aporta la herramienta. Esta aplicación también permite cambiar el diseño gráfico o formato del perfil, como se aprecia en la ilustración situada en la parte superior derecha de la figura 2.

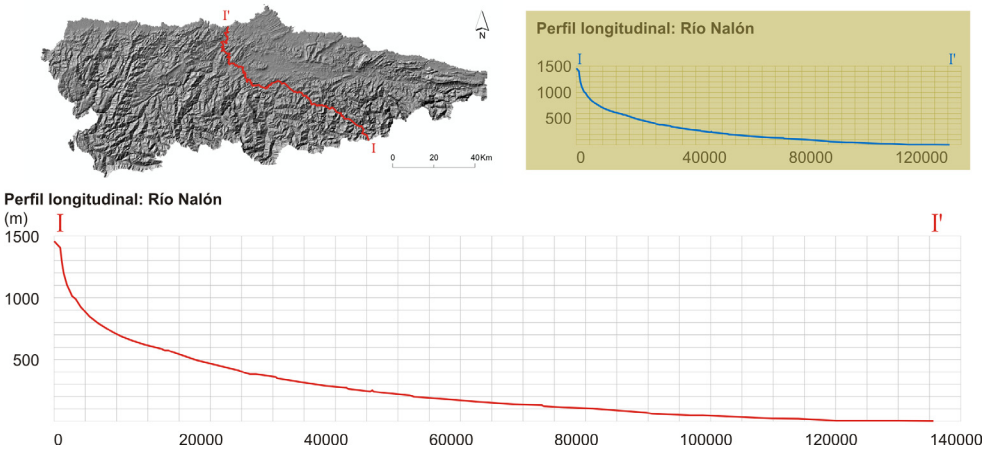


Figura 2: Perfil longitudinal del río Nalón (Asturias).

Perfiles trasversales

En la parte superior de la figura 3 se muestra el perfil transversal de la llanura de inundación del río Pas, aguas arriba de la localidad cántabra de Vega de Pas. El perfil fue generado con la aplicación diseñada, a partir de un MDT obtenido del vuelo LIDAR de las zonas inundables de la Comunidad Autónoma de Cantabria, cuya resolución de pixel es de 1x1 m y fue realizado por la empresa HIFSA. En la parte inferior de esa figura se muestra, con línea amarilla discontinua, el trazado del perfil sobre la ortofoto LIDAR del año 2009 y abajo en azul sobre el modelo de sombreado o hillshade generado a partir del MDT del vuelo. En la figura puede observarse como la zona inundable presenta una topografía marcadamente irregular, aspecto característico de la presencia de formas erosivas y sedimentarias generadas por avenidas recientes de elevada intensidad. Muchas de estas evidencias ofrecen información de calados alcanzados por inundaciones. En la figura se muestra la altura que alcanzaría la lámina de agua en la llanura aluvial ante las evidencias presentes en la zona.

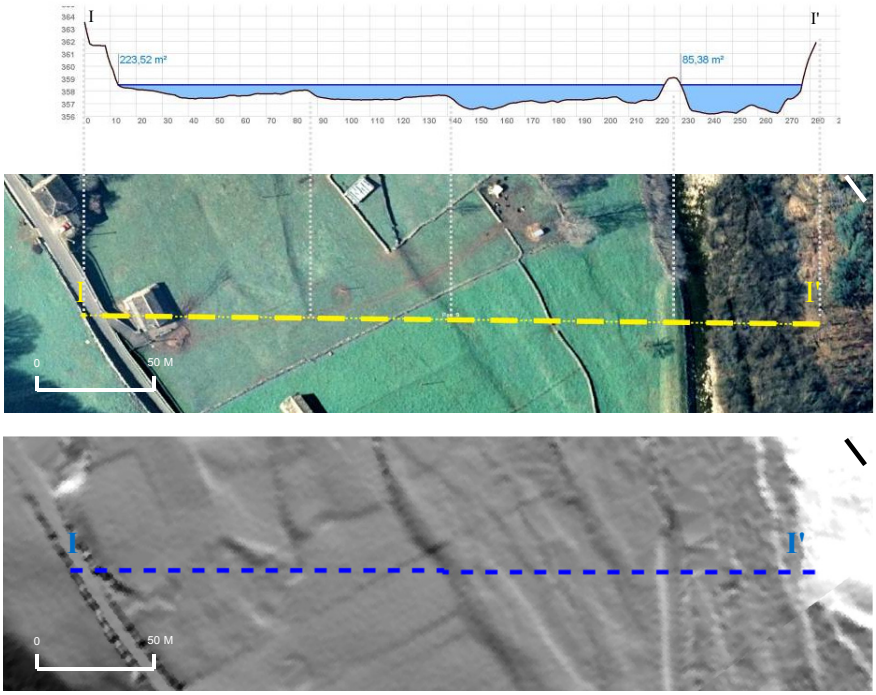


Figura 3: Perfil transversal del río Pas (Cantabria).

Generación automática de un conjunto de perfiles

El proceso anterior ofrece una sección de referencia, asociada a una determinada inundabilidad. Para extrapolar esa información a lo largo del río es necesario elaborar numerosas secciones siendo importante agilizar el proceso de generación de perfiles. Por este motivo se ha incluido una opción que permite generar la totalidad de perfiles contenidos en una determinada capa de forma automática (Figura 4), reduciendo considerablemente el tiempo empleado para este proceso.

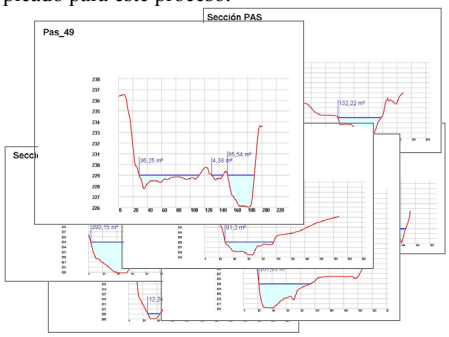


Figura 4: Conjunto de perfiles generados de forma automática.

CONCLUSIONES

Se ha generado una aplicación que permite obtener de una manera sencilla, rápida y de fácil manejo una sección o perfil para ser analizada posteriormente por un técnico, el cual podrá introducir de una manera instantánea diferentes niveles de agua permitiendo, mediante este método, la extrapolación de información constatada de inundaciones hacia otros tramos próximos en donde la información pueda ser más escasa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del contrato titulado *Asistencia técnica en el análisis geomorfológico y análisis histórico para el Estudio de zonas inundables y delimitación del DPH en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Cantabria*, utilizando productos LIDAR realizados en el marco del citado contrato por la empresa HIFSA.

Aportación de las fotografías aéreas históricas en la delimitación del Dominio Público Hidráulico. Ejemplo en el curso medio del río Nalón (Asturias, España)

M. Fernández[1] y E. Fernández[1]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Edificio de Investigación, Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: miguelfa@indurot.uniovi.es

RESUMEN

En la reciente modificación del reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 9/2008) se exige que la delimitación del cauce no se base exclusivamente en los habituales análisis hidrológicos e hidráulicos y en la denominada Máxima Crecida Ordinaria, sino que debe tener en cuenta las características geomorfológicas, fotográficas, cartográficas e históricas disponibles. En el presente trabajo se muestran las características geomorfológicas contempladas para delimitar el cauce a partir del estudio de fotografías aéreas estereoscópicas del año 1957, en un tramo fluvial de 3 km ubicado en el curso medio del río Nalón en Asturias. Concretamente se muestra cómo reconocer las formas erosivas y sedimentarias que se consideran ligadas a la circulación habitual de las aguas fluviales y los criterios utilizados para plantear los límites del cauce histórico, aspectos de relevancia dada su potencial repercusión en el Dominio Público Hidráulico.

Palabras clave: *fotografías aéreas, Dominio Público Hidráulico, cauce geomorfológico.*

ABSTRACT

The recent modification of the Hydraulic Public Watercourse regulations (RD 9/2008), requires that the channel mapping will not be based only in usual hydrological-hydraulic criteria and the Minaverage Flow Discharge but it must be defined considering geomorphologic features observed in all photographic, cartographic and historical references available. This work shows geomorphologic features used to map de watercourse using aerial photos from 1957, in a 3 km fluvial sector located in the middle course of the Nalon river, in Asturias, Spain. Specifically it shows how to recognize erosive and sedimentary features linked to an usual course of fluvial waters and the criteria used to map de historic watercourse limits, relevant aspects with impact in the Hydraulic Public Watercourse mapping.

Keywords: *aerial photographs, Hydraulic Public Watercourse, geomorphologic channel.*

INTRODUCCIÓN

La modificación del reglamento del Dominio Público Hidráulico (DPH) por Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, señala en su preámbulo que la definición de cauce natural basada en el concepto de la Máxima Crecida Ordinaria (MCO) se ha mostrado insuficiente en numerosas situaciones, resultando imprescindible que los cauces naturales se definan atendiendo también a otras características, como las geomorfológicas, las ecológicas y teniendo en cuenta las referencias históricas disponibles. En este sentido, el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) plantea el estudio del cauce histórico a partir de fotografías aéreas.

Hay que tener en cuenta que los sistemas fluviales han sufrido en las últimas décadas cambios importantes, fruto de actuaciones artificiales realizadas sobre el medio fluvial y en su cuenca hidrográfica (embalses, canalizaciones, cambios en los usos del suelo, etc.). Como resultado, es frecuente que los cauces muestren actualmente una configuración aparentemente mermada con respecto a la observada en décadas anteriores, con encajamientos del lecho, estrechamientos en la anchura del canal más activo y parcial estabilización de las barras por vegetación de ribera (ej. Surian y Rinaldi, 2002; Brookes, 1994). Sin embargo, estos cambios no indican necesariamente que los terrenos hayan dejado de formar parte del cauce (Fernández y Anadón, 2010). Por estos motivos, se insiste en la consideración del cauce histórico como referente del DPH, cuya delimitación debe realizarse de la forma más precisa posible.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es mostrar los criterios utilizados para delimitar el cauce observado en fotografías aéreas estereoscópicas del año 1957. Para ello se ha seleccionado un tramo de río ubicado aguas abajo de una red fluvial con importantes actuaciones artificiales ejecutadas en las últimas décadas.

METODOLOGÍA

Los análisis realizados se basan en la identificación en fotografías aéreas, de evidencias relacionadas con una actividad fluvial alta y/o reiterada que permitan delimitar unidades con diferente grado de actividad fluvial. Una vez definidas las unidades, los límites identificados son trasladados a la situación actual y se valora su posible pertenencia al cauce histórico. Para el presente trabajo se ha utilizado como referente la fotografía aérea del año 1956/57 (Vuelo americano, escala 1:33 000) y, para trasladar los limites identificados a la situación actual, la foto del año 2007 del vuelo PNOA (fotografía digital, tamaño de pixel de 0,5 m).

AREA DE ESTUDIO

El tramo seleccionado se encuentra en el río Nalón, en la zona central de Asturias, y presenta una longitud de 3 km comprendidos entre las localidades de Tudela de Agüeira y Anieves (Municipio de Oviedo). Forma parte de los ríos que drenan el Norte de la Cordillera Cantábrica, caracterizados por su alta pendiente, elevado poder erosivo y abundante carga de fondo.

La cuenca que drena este tramo presenta una superficie cercana a los 630 km^2 y en este punto se estima un caudal para la máxima crecida ordinaria (T=2.5) de 386 m^3/s (CEDEX, 2009). El tramo analizado presenta un cauce de en torno a 40 m de anchura y unos 4 m de profundidad, discurriendo entre llanuras aluviales de unos 500 m de ancho (Figura 1).

El tramo se encuentra aguas abajo de un cauce canalizado a lo largo de más de 40 km de longitud, con llanuras densamente ocupadas por desarrollos urbanos, industriales y mineros, y bajo el efecto del embalse de Tanes-Rioseco, el cual afecta a 260 km^2 de la cuenca y presenta un volumen de 38 hm³.

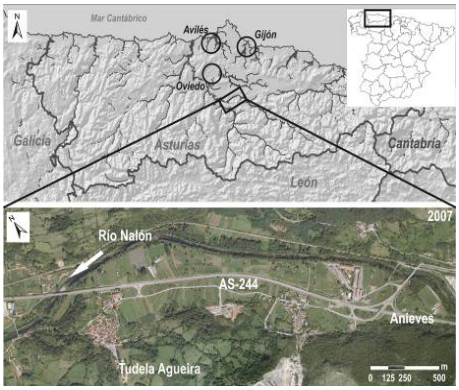


Figura 1: Ubicación del área de estudio y ortofofoto del tramo (año 2007; vuelo PNOA).

En la ortofoto reciente, correspondiente al año 2007 (Figura 1), se observa como el tramo presenta un cauce con dimensiones aparentemente homogéneas, con una anchura que se mantiene durante todo el recorrido. El tramo inicial está canalizado por una mota, y el sector final muestra un cauce más natural, en cuyas márgenes se localiza una zona relativamente extensa ocupada por vegetación de ribera. Se persigue analizar el cauce en la fotografía aérea del año 1956/1957 para comprobar si existen terrenos en las márgenes que hayan pertenecido al cauce histórico y, en consecuencia, tengan repercusión en el DPH.

CAMBIOS EN EL PERIODO 1957-2007

Al comparar las imágenes de los años 1957 y 2007 se detecta un ligero estrechamiento en el tramo inicial, ligado especialmente a la instalación de una canalización construida en la década de los 80.

En el tramo inferior, donde no se han realizado obras de canalización, los cambios son mucho más importantes, y una zona de canales y barras activas de 205 m de anchura, que se observa en la foto del año 1957, ha pasado a presentar actualmente unas dimensiones de 60 m. Las claras evidencias de actividad fluvial se han ido atenuando a lo largo de las décadas, y la zona donde el canal presentaba mayor anchura se ha colonizado por un bosque ribereño. Estos cambios abarcan una superficie cercana a las 7 ha. El estudio del cauce histórico se centra este tramo inferior con mayores cambios.

RESULTADOS

Para abordar la delimitación del cauce, previamente se han delimitado varias unidades con apariencia contrastada entre sí, que definen diferentes patrones morfodinámicos (Figura 3). La unidad 1 engloba los terrenos más activos del medio fluvial, la número 2 abarca una zona de transición entre cauce y llanura y las unidades número 3 y 4 muestran un aspecto de mayor estabilidad, propio de llanura aluvial, con pequeñas diferencias entre sí.

Unidad 1

En este tramo del río Nalón se puede identificar con facilidad la zona que permanece sumergida por las aguas la mayor parte del tiempo, la cual puede estar representada por uno o varios canales. En la parte superior del tramo el río está configurado por un solo canal con un trazado bastante rectilíneo y una lámina de agua relativamente profunda, dando lugar en la imagen a una tonalidad oscura, prácticamente negra. Aguas abajo el canal se ramifica en varios brazos que bordean numerosas barras, observándose una lámina de agua más somera que se refleja en la fotografía con un marcado aumento de las tonalidades más claras, al hacerse más visibles los sedimentos fluviales del lecho (Figura 2).

En este último sector dominan claramente los depósitos fluviales desprovistos de vegetación, aquellos en los que la dinámica fluvial a la que están sometidas estas barras, relacionada con una elevada frecuencia de inundación (varias veces al año) y con elevadas velocidades y calados, inhibe el desarrollo de la vegetación. Son depósitos generalmente móviles que en el río Nalón a esta altura están representados frecuentemente por granulometrías de tipo canto y grava.

Esta unidad representa el sector más deprimido y más claramente reconocible del ámbito fluvial, por donde circulan las aguas habitualmente. Las características mencionadas son las típicas del denominado canal de aguas bajas, aquel que aparece sumergido parte importante del año. La margen izquierda de este canal, aquel que contacta con la vega de estudio, muestra características que varían a lo largo de su recorrido. En el sector final, donde el canal muestra una mayor anchura, la orilla presenta una alta definición y nitidez, un contacto abrupto y erosivo entre la zona más activa del medio fluvial o unidad 1 y la llanura inundable o unidad 4, ámbitos totalmente contrastados, donde queda claro que orillas con estas características representan la envolvente del cauce histórico. A diferencia del caso anterior, el contacto entre la unidad 1 con la unidad 2 está representado por una orilla mucho más difusa.

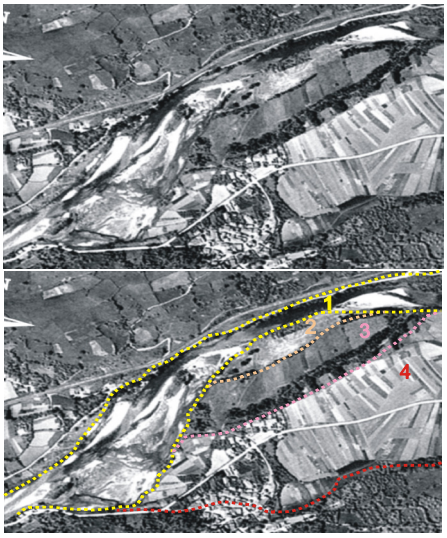


Figura 2: Las líneas discontinuas separan 4 unidades con características diferentes.

Unidad 2

A diferencia de la unidad anterior, los terrenos englobados en esta unidad muestran una cobertura vegetal bastante continua de tipo herbáceo, con representaciones locales de tipo arbustivo. En este caso, el poder de la corriente que afecta a los terrenos es menor que en el caso anterior, potenciando el depósito de granulometrías más finas de tipo arena y limo que favorecen el desarrollo de vegetación. No obstante, destacar que la cobertura vegetal no es total, ya que el centro de la unidad muestra una tonalidad blanquecina, indicadora del afloramiento del sustrato sedimentario. Adicionalmente, el límite entre la unidad 1 y 2 carece de la característica banda continua de vegetación de ribera, ni se observan escarpes netos en el contacto con las barras activas adyacentes. Además se reconocen pequeñas entradas de depósitos desnudos hacia el interior de esta unidad, que unido a las anteriores características, se evidencia la actuación reciente e intensa de procesos erosivos y sedimentarios en la zona. Por los motivos expuestos, se estima que los terrenos se encuentran dentro de la zona más activa del medio fluvial, más similar a la unidad 1 ligada al cauce geomorfológico y en claro contraste con las unidades 3 y 4. La consideración de estos terrenos dentro del cauce geomorfológico es además acorde con las dimensiones que presenta

el canal en los tramos contiguos, configurando una transición gradual entre secciones con marcadas diferencias en anchura.

Unidades 3 y 4

Los terrenos de la unidad 3 presentan una cobertura vegetal más estable y homogénea, mostrando cierto aprovechamiento por usos agropecuarios. El contacto entre esta unidad con la número 4 o llanura aluvial está representado por un canal con orillas colonizadas por vegetación riparia de alto porte y elevada continuidad longitudinal (Figura 3). En dicho canal se produce una dinámica mixta entre el cauce principal y la desembocadura de un arroyo lateral.

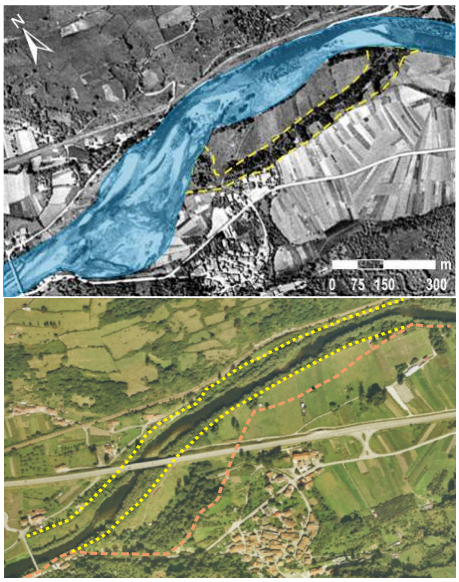


Figura 3: Arriba se muestra el cauce histórico mínimo a tener en cuenta según las fotografías de 1957. Abajo se muestra en amarillo los límites aparentes del cauce en la actualidad, ampliables a la línea naranja si tenemos en cuenta las observaciones históricas del cauce.

El límite entre la unidad 2 y 3 configura un contacto gradual donde se reconoce una alineación de vegetación de ribera que muestra cierta continuidad. Estos aspectos conducirían a plantear este contacto como la envolvente mínima del cauce histórico, ofreciendo una configuración de cauce como la mostrada en la Figura 3. La unidad 4 se caracteriza por mostrar un parcelario denso y bien definido, característico de una situación aparentemente más estable al resto de unidades analizadas.

CONCLUSIONES

La canalización de parte importante del tramo analizado unido al encajamiento generalizado del río Nalón, fruto de alteraciones artificiales ubicadas aguas arriba, ha dado lugar a un cauce actualmente mermado con respecto a sus características más naturales. Adicionalmente, se ha podido comprobar que las características de la fotografía aérea del año 1957 permiten reconocer propiedades de los terrenos relacionadas con una mayor actividad fluvial, tales como la presencia de formas erosivas y sedimentarias, grado de cubierta vegetal o la conectividad con el cauce principal. La relación de estas evidencias con una mayor actividad fluvial ha permitido identificar cerca de 7 ha de terrenos a tener en cuenta dentro del Dominio Público Hidráulico Probable.

BIBLIOGRAFÍA

BROOKES, A., 1994. *River Channel Change.* En: Calow, P. and Petts, G.E. (Eds), *The Rivers Handbook. Hydrological and ecological principles*. Blackwell Science, Oxford, 55-75.

CEDEX, 2009. *Mapa de Caudales Máximos. Aplicación Caumax versión 2.0.* Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

FERNÁNDEZ, E. y ANADÓN, S., 2010. *Análisis del encajamiento de los ríos Nalón (Asturias) y Carrión (Palencia) en las últimas décadas y repercusión en la inundabilidad.* Avances de la Geomorfología en España. 2008-2010. Ed: X. Úbeda, D. Vericat y R.J. Batalla. 528 pp.

SURIAN, N. y RINALDI, M., 2002. *Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy*. Geomorphology, 50, 307-326.

Aportaciones geomorfológicas de los modelos derivados del LIDAR en el estudio de la Zona de Flujo Preferente

E. Fernández[1], S. Anadón[1], M. Fernández[1], D. Vázquez[1], J. Crespo[1], V. Moro[1] y R. Menéndez[1]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Edificio de Investigación, Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: elena@indurot.uniovi.es

RESUMEN

La Zona de Flujo Preferente (ZFP), definida en la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 9/2008), es una de las unidades a identificar en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Según criterios geomorfológicos, abarca los terrenos de la llanura aluvial en los que puedan reconocerse morfologías ligadas a la actuación de procesos erosivos y sedimentarios, aquellas generadas por la actuación frecuente de avenidas intensas. Los modelos derivados de datos LIDAR están siendo especialmente valiosos en el reconocimiento de estas evidencias de inundación reciente y reiterada, agilizando de forma significativa la delimitación de las zonas con mayor peligrosidad de inundaciones. En el presente trabajo se muestra el ensayo realizado en un tramo del río Nalón en Asturias, indicando las aportaciones de los modelos LIDAR en la identificación de los terrenos que, como mínimo, deben formar parte de la ZFP.

Palabras clave: LIDAR, Zona de Flujo Preferente, evidencias geomorfológicas, formas erosivas, formas sedimentarias, llanura aluvial, peligrosidad de inundaciones.

ABSTRACT

The Preferential Flow Zone, defined in the modification of the Hydraulic Public Domain Regulation (RD 9/2008), is one of the units meant to be identified in the Spanish National Cartography System on Inundation Zones. Following geomorphological criteria, it comprises the floodplain terrains where morphologies linked to erosive and sedimentary processes can be recognized, the ones generated by the frequent action of intense floods. LIDAR-derived models are found especially useful when analyzing these evidences of recent and repeated flooding, speeding up in a significant way the identification of the zones with the higher flood hazard. In this work, a test carried out in a stretch of the Nalón river in Asturias is shown, displaying how LIDAR models help to identify the terrains that, at least, must be part of the Preferential Flow Zone.

Keywords: *LIDAR, Preferential Flow Zone, geomorphological evidences, erosive features, sedimentary forms, floodplain, flood hazard.*

INTRODUCCIÓN

El 16 de enero de 2008 se publicó en el Boletín Oficial del Estado el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Entre las novedades destaca la delimitación de la Zona de Flujo Preferente (ZFP), definida como la envolvente de la vía de intenso desagüe y la zona de inundación peligrosa para las personas. Su delimitación persigue preservar la estructura y funcionamiento del sistema fluvial, dotando al cauce de espacio adicional suficiente para permitir tanto su movilidad natural como la laminación de caudales y carga sólida transportada, favoreciendo de esta forma la amortiguación de las avenidas.

Tal y como se defiende en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), esta unidad está representada por los terrenos donde, con periodos de recurrencia frecuentes, la avenida genera formas erosivas y sedimentarias debido a su gran energía.

Cuando se produce una inundación, las aguas desbordan el cauce del río afectando a las márgenes. La circulación de la inundación por la llanura aluvial puede llegar a alterar la superficie del terreno, aspecto que depende especialmente de la velocidad y calado de las aguas circulantes. Ante inundaciones de elevada intensidad se

pueden desarrollar procesos erosivos y sedimentarios que generan en la llanura relieves negativos y positivos respectivamente. Pocos meses después de la inundación la vegetación suele camuflar las evidencias, pero la morfología continúa reconociéndose en el terreno. La presencia de estas formas pone de relieve la exposición de la zona inundable a inundaciones intensas (Marquínez *et al*., 2006), además de ofrecer información sobre velocidad y, especialmente, calados mínimos alcanzados, evidenciados por el techo de los depósitos de desbordamiento.

Dichas evidencias pueden reconocerse durante los trabajos de campo o incluso en fotografías aéreas, pero el análisis de los modelos derivados del LIDAR agilizan de forma muy significativa su identificación (Jones *et al.*, 2007; INDUROT, 2008; Ferrer *et al*., 2009; Fernández, 2009). En el presente trabajo se muestran los análisis realizados con los modelos LIDAR para identificar con criterios geomorfológicos la ZFP, en un tramo del río Nalón en Asturias.

ÁREA DE ESTUDIO

En el curso inferior del río Nalón (Asturias) se ha estudiado un tramo de 8 km de longitud (INDUROT, 2008), cuya cuenca asociada presenta una superficie de 3000 km^2 (Figura 1). Concretamente, en el presente trabajo se muestran los análisis realizados en la llanura de Santoseso, sector donde el cauce presenta una anchura media de unos 60 m, alturas de orilla de unos 5 m y una llanura aluvial con una anchura media de 300 m. En este punto se estima un caudal para la máxima crecida ordinaria (T=2.5) de 774 m^3/s (CEDEX, 2009).

Los estudios de peligrosidad realizados en la zona señalan una peligrosidad de inundaciones asociada a avenidas con periodos de retorno de 10 años (INDUROT, 2004), pero se carece de información sobre velocidad y calados que permitan determinar su posible pertenencia a la ZFP.

METODOLOGÍA

En el área de estudio se dispone de imágenes LIDAR, realizadas por el Instituto Cartográfico de Cataluña en el año 2001, con una resolución en torno a 1 m en la horizontal y 0,25 m en la vertical. A partir de los datos LIDAR se han generado distintos modelos derivados del terreno (elevaciones, pendientes y sombreado), los cuales han sido analizados para determinar la presencia o ausencia de morfologías sedimentarias y erosivas, aquellas indicadoras de la exposición de los terrenos a avenidas intensas.

La cartografía de morfologías no persigue detallar los diferentes tipos de depósitos ni formas erosivas, sino simplemente constatar de forma sencilla su presencia o ausencia. En este sentido, se plantea una representación basada en líneas, ubicándolas en el lecho de morfologías canaliformes para las de origen erosivo, en las crestas de los depósitos o barras de desbordamiento para las morfologías sedimentarias y en los escarpes o escalones presentes en la zona inundable, tanto aquellos ligados a las orillas de las formas canaliformes de mayor entidad, a la envolvente de los depósitos de desbordamiento como a los posibles límites entre terrazas fluviales.

Al objeto de confirmar las observaciones realizadas sobre los modelos LIDAR, se han realizado estudios complementarios basados en aspectos evolutivos detectados en fotografías aéreas disponibles desde el año 1956, en la recopilación de datos sobre inundaciones históricas y, especialmente, en detallados trabajos de campo.

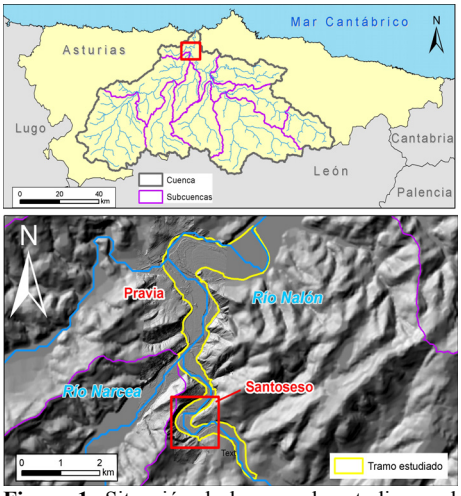


Figura 1: Situación de la zona de estudio en el tramo bajo de la cuenca del río Nalón.

RESULTADOS

La escasa variación de alturas que se puede encontrar en los terrenos que configuran una determinada llanura aluvial, provoca que en el

modelo digital del terreno de un tramo largo se pierda definición, dificultando la identificación de evidencias. Dado que las morfologías erosivas y sedimentarias pueden presentar alturas inferiores a 1 m, el proceso de identificación se puede agilizar mediante tratamientos que resalten las diferencias en elevación. En este sentido, se ha realizado una reclasificación del histograma de frecuencias por porciones de llanura aluvial o subtramos (Figura 2), modificando los rangos de alturas considerados para dar más definición a la zona de interés (Jones *et al*., 2007).

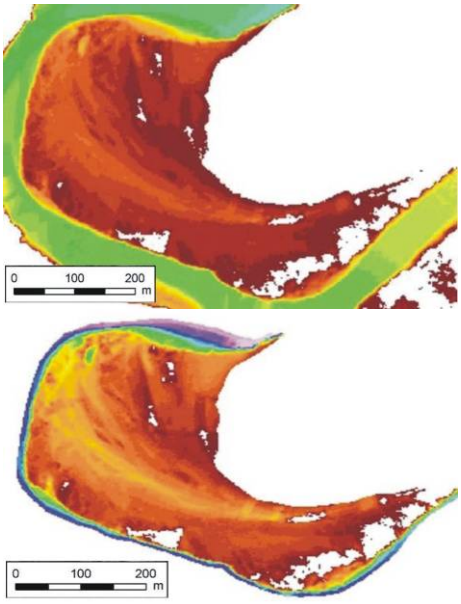


Figura 2: Arriba modelo de elevaciones con menor contraste, con un rango de alturas de entre 3.09 y 18 m, y abajo el rango se ha reducido en 6 m. El río circula de la zona inferior de la imagen hacia la parte superior.

A partir de un SIG se pueden crear automáticamente rangos basados en el histograma de alturas general, pero como éstos pueden modificarse manualmente para generar clases, se han asignado rangos inferiores al medio metro de diferencia. La visualización mejora si se recorta el área que se quiere analizar, eliminado el cauce y la ladera. Aplicando esta distribución de elevaciones a la extensión de terreno comprendida entre la culminación del escarpe que separa el cauce de la llanura aluvial hasta el límite exterior del área de estudio, generalmente representado por el inicio de la ladera del valle, y utilizando una simbología de gama de colores muy contrastada entre los valores máximos y mínimos, se logra una imagen más clara y detallada de las características de la vega (Figura 2), favoreciendo la visualización de las formas erosivas y sedimentarias más pequeñas.

El tratamiento realizado en el modelo digital de elevaciones muestra una llanura aluvial caracterizada por una marcada topografía irregular, donde se favorece el reconocimiento de los relieves positivos individualizados y alargados, susceptibles de representar depósitos de desbordamiento, así como depresiones con trayectorias muy similares en la parte final de la vega que se ramifican en varios canales de escalas métricas e incluso de pocos decímetros.

Respecto al modelo de pendientes, que resalta los escarpes más pendientes y abruptos (Figura 3), ofrece una imagen donde destacan especialmente las orillas más nítidas del propio cauce fluvial. Este aspecto tiene interés para diferenciar entre los límites nítidos del cauce de las orillas más graduales y difusas, donde intensificar los análisis en relación a la delimitación del Dominio Público Hidráulico Probable.

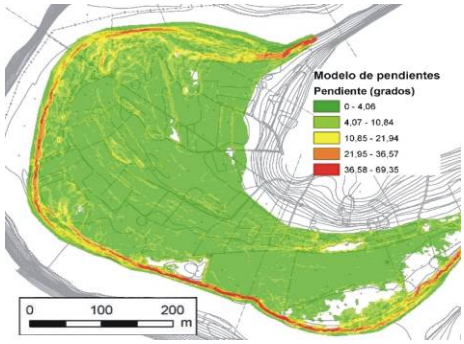


Figura 3: Modelo de pendientes.

Sin embargo, el modelo aporta menos información sobre las morfologías presentes en la llanura aluvial, mostrando con trazado discontinuo algunas morfologías canaliformes o la envolvente de las formas deposicionales más nítidas. No obstante, en el modelo se intuye una alineación dominante en las morfologías de la llanura aluvial, la cual es coherente con la dinámica de las inundaciones, poniendo de relieve el carácter natural de estas formas.

El modelo de sombras complementa los anteriores análisis, ofreciendo una imagen en relieve que en frecuentes ocasiones suele agilizar la identificación de los elementos presentes en la llanura aluvial, haciendo más visual la distribu-

ción de morfologías sobre la zona inundable. La cartografía de evidencias geomorfológicas se muestra sobre este modelo en la Figura 4. Puede observarse como se deduce la entrada de las inundaciones por la zona de cabecera de la vega, concentrada en un canal estrecho y profundo que aguas abajo se expande, generando un abanico de numerosos canales de escasa profundidad. También se reconocen varios relieves positivos seccionados por los canales que están ligados a depósitos de desbordamiento. El techo de estos depósitos, indicador de los calados mínimos alcanzados por las inundaciones que los han generado, señalan alturas de la lámina de agua de entre 1,5 y 2 m de altura en la mayor parte de la vega. Como resultado de estos análisis se plantea una ZFP como la mostrada en la Figura 4.

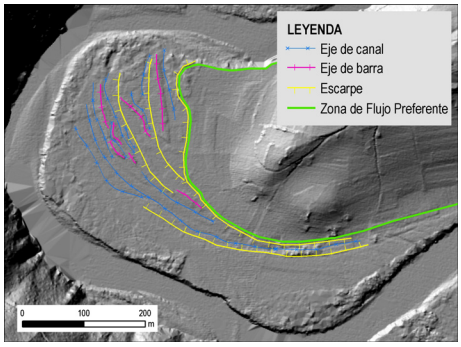


Figura 4: Cartografía de las evidencias geomorfológicas y de la Zona de Flujo Preferente (ZFP) sobre el modelo de sombreado del LIDAR.

CONCLUSIONES

El análisis geomorfológico de los diferentes modelos derivados del LIDAR, unido a la aplicación de tratamientos dirigidos a facilitar el reconocimiento de evidencias de erosión y sedimentación, ha permitido identificar los terrenos donde se estima su afección por inundaciones intensas. Concretamente, los altos valores de velocidad se ponen de manifiesto con la presencia de morfologías erosivas, concretamente una densa red de canales. Adicionalmente, calados mínimos de entre 1,5 y 2 m se deducen a partir del techo de los depósitos de desbordamiento. En consecuencia, la envolvente de estas morfologías representa la superficie mínima a tener en cuenta en la delimitación de la ZFP, superficie susceptible de ampliarse con estudios más detallados.

BIBLIOGRAFÍA

CEDEX, 2009. Mapa de Caudales Máximos. Aplicación *Caumax versión 2.0*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

FERNÁNDEZ, E., 2009. *Estudios históricos y geomorfológicos en el marco del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Jornadas de Ingeniería del Agua, CEDEX, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 43.

FERRER, M., IGLESIAS, J., CERRILLO, A., VIZCAINO, A., MARTÍNEZ, E., ARDILES, L. y LÓPEZ-PELÁEZ, A., 2009. *Generación de cartografía geomorfológica con datos Lidar para los estudios de inundabilidad*. Jornadas de Ingeniería del Agua, CEDEX, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 33-34.

INDUROT, 2004. *Creación de un sistema de información de las zonas inundables y de avenida torrencial del Principado de Asturias*. Principado de Asturias, Consejería de Justicia, Seguridad Pública y Relaciones Exteriores (112 Asturias). Informe inédito.

INDUROT, 2008. *SNCZI. Análisis Geomorfológico-histórico. Estudio Piloto 1: Bajo Nalón (Asturias)*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Dirección General del Agua. Informe inédito.

JONES, A.F., BREWER, P.A., JOHNSTONE, E. y MACKLIN, M.G., 2007. *High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data.* Earth Surface Processes and Landforms, 32, 1574-1592.

MARQUÍNEZ, J., LASTRA, J. y FERNÁNDEZ, E., 2006. *Metodología utilizada para cartografiar la peligrosidad de inundaciones en la cuenca del Norte*. En: Díez, A., Laín, L. y Llorente, M. (Eds.). Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación. Publicaciones del IGME. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos Nº7, 125-141, Madrid.

Participación del INTA en el proyecto SEN3EXP: Teledetección aeroportada hiperespectral en áreas experimentales continentales

A. Fernández-Renau, J.A. Gómez, E. de Miguel, A. Ruiz, O. Gutiérrez de la Cámara, M. Jiménez, I. Pérez, F. Muñoz, E. Prado, C. Doñamayor y R. Rodríguez

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Ctra. Ajalvir s/n, Torrejón de Ardoz, 28850 Madrid. Correo electrónico: fdezra@inta.es

RESUMEN

El Área de Teledetección del INTA participó en 2009 en la campaña de teledetección aeroportada del proyecto SEN3EXP de la ESA, para la simulación de imágenes de los sensores OLCI y SLSTR de la futura misión espacial Sentinel 3. Se describen los objetivos y planificación de la campaña, así como la adquisición y proceso de las imágenes hiperespectrales, obtenidas con los sistemas AHS y CASI-1500i en dos áreas experimentales continentales.

Palabras clave: teledetección aeroportada hiperespectral, AHS, CASI, Sentinel 3.

ABSTRACT

INTA's Remote Sensing Laboratory took part in 2009 in the airborne remote sensing campaign of the ESA's SEN3EXP project, whose objective was the simulation of OLCI and SLSTR images for the forthcoming Sentinel 3 mission. The campaign objective and planning are described, as well as the acquisition and processing of the hyperspectral AHS and CASI-1500i imagery, obtained at two inland experimental areas.

Keywords: *hyperspectral remote sensing, AHS, CASI, Sentinel 3.*

INTRODUCCIÓN

En 2009, el Programa de Observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA), promovió la realización de una campaña de medidas *in situ* y de teledetección aeroportada, que recibió formalmente el nombre de *Sentinel 3 Experiment* (en adelante SEN3EXP)

El objetivo principal de SEN3EXP era la generación de una base de datos simulados de los sensores OLCI y SLSTR, de la nueva misión espacial Sentinel 3 (Drinkwater y Rebhan, 2007). Estos datos simulados debían servir para evaluar los algoritmos de proceso de Nivel 1 del O-GPP (*Optical Ground Processor Protoype*), así como el desempeño de OLCI en los algoritmos de obtención de radiancias del agua y del Índice de Vegetación terrestre de OLCI (OCTI)

Otro objetivo secundario de SEN3EXP era la simulación de imágenes SLSTR sobre fuegos activos, así como la validación de los algoritmos de proceso de Nivel 1 del sensor *Vegetation*.

Para cumplir los objetivos previstos, el proyecto preveía la realización de campañas aeroportadas en dos sitios terrestres (un sitio agrícola y otro forestal) y dos sitios marinos (de aguas costeras o Caso 2 y de mar abierto o Caso 1), así como el sobrevuelo de un incendio forestal activo, siempre que fuera posible.

Además preveía la obtención de todas las imágenes de sensores ópticos de la ESA coincidentes con las campañas aeroportadas y los datos de campo, en especial los de AATSR, MERIS y CHRIS/Proba. Incluía además el diseño y planificación de una campaña espectral de MERIS en la que el conjunto de bandas nominal se sustituyera por otro que incluyera las nuevas bandas específicas de OLCI.

Para la ejecución del proyecto SEN3EXP se constituyó un consorcio internacional liderado por la empresa *Brockmann Consult Ltd*. (Alemania), responsable también del proceso final de los datos para su incorporación al O-GPP. La ejecución de las campañas de campo en los sitios terrestres fue responsabilidad de la Universidad de Valencia y de la Universidad de Bolonia.

El INTA fue el Operador Principal de Instrumentación Aeroportada. Como tal fue responsable de la planificación y ejecución de los vuelos, la adquisición de las imágenes y datos auxiliares y el proceso de las mismas, incluyendo correcciones radiométricas, geométricas, georreferenciación y corrección atmosférica sobre tierra.

A través de su Área de Teledetección, el INTA tiene una dilatada experiencia en la realización de campañas de simulación de misiones espaciales para la ESA (http://earth.esa.int/campaigns/) y antes de SEN3EXP había participado ya en dos campañas muy similares: En 2007 en el proyecto CEFLES-2 para la misión Sentinel-2 (http://www.fz-juelich.de/icg/icg-3/cefles/) y en 2005 en el proyecto SEN2FLEX para la posible misión FLEX (http://www.uv.es/leo/sen2flex/).

PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA CAMPAÑA DE VUELOS

Los sitios escogidos para las campañas terrestres fueron:

- *Barrax* (Albacete, España): Abarcando un área de cultivos de secano y regadío de unos 200 km^2, totalmente llana y a unos 700 m.s.n.m. Es un área centrada en torno a la finca experimental "Las Tiesas", que es gestionada por el Instituto Técnico Agrario Provincial (ITAP).

- *San Rossore* (Italia): Reserva natural situada en la costa de Toscana (Italia). Es también una zona llana, situada entre 0 y 7 m.s.n.m., pero en este caso eminentemente forestal, con predominio de repoblaciones de coníferas.



Figura 1: Ubicación de los sitios terrestres de SEN3EXP

Los **requisitos espectrales** de la campaña quedaron cubiertos con los dos sensores hiperespectrales del INTA (Figura 2): CASI-1500i (*Spatial Mode* con 288 bandas en el rango 365 – 1050 nm) y AHS (80 bandas en el rango de 0,46 a 13 µm), instalados en su plataforma CASA C-212. Además se instaló un tercer instrumento hiperespectral (SASI-600), propiedad de Itres Research Ltd. (Canadá), con 100 bandas en el rango espectral 950 – 2450 nm.

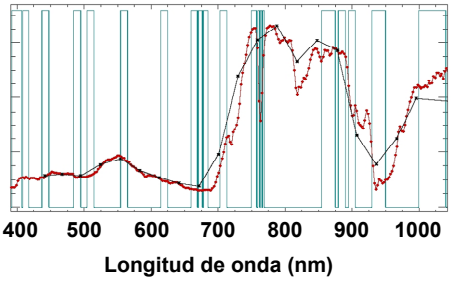


Figura 2: Radiancias en el sensor de CASI (rojo) y AHS (negro) de un píxel de vegetación en San Rossore y bandas OLCI superpuestas

En cuanto a los **requisitos radiométricos**, el sistema AHS del INTA aseguraba un nivel de ruido (NEΔL) de las radiancias en el sensor inferior a 0,25 W m-2 sr-1 µm -1 (< 2% en un 90% de las bandas), en el VNIR. En el TIR aseguraba un nivel de ruido entre el límite marcado por el rango dinámico (0.02 ºK) y el valor de NEΔT de 0.2 ºK. La exactitud radiométrica es de 0,5 ºK (a la temperatura aparente en el sensor). La caracterización radiométrica del CASI-1500i no se disponía al inicio de la campaña de vuelos, ya que el sistema estaba recién adquirido. Se llevó a cabo utilizando los datos de la propia campaña SEN3EXP.

El principal **requisito geométrico** era asegurar que las condiciones de observación fueran similares a las previstas para Sentinel 3 (98,6º de inclinación orbital y hora de paso entre 10:00 y 11:00 UTC). El tamaño de píxel (6,9 x 6,9 m en AHS y 1,3 x 3,5 m en CASI) fue el máximo permitido por el techo operativo de vuelo de la plataforma (2750 m) y por su velocidad mínima (72 m/s).

El número de pasadas (6 x 10 km en Barrax y 7 x 13,5 km en San Rossore) resultó de un compromiso entre un número mínimo de píxeles Sentinel 3 a simular, la limitación en el volumen de datos y el requisito adicional de contar con al menos dos observaciones de cada punto en la superficie. Para cumplir este último requisito se planificó un solape del 50% para los dos sensores de menor ancho de imagen (2 km en el caso de CASI y SASI frente a 5,5 km en AHS).

El periodo de campañas aeroportadas fue fi-

jado inicialmente para el periodo 18 de junio – 8 de julio de 2009 (en esas fechas se llevaron a cabo también las campañas espectrales de MERIS). La campaña terrestre en Barrax, se ejecutó los días 20, 22 y 24 de junio, incluyendo además el sobrevuelo, el día 22, de un incendio recién extinguido en Fresneda de Altarejos (Cuenca). La segunda campaña terrestre fue llevada a cabo en San Rossore (Italia), los días 3 y 4 de julio.

ADQUISICIÓN Y PROCESO DE IMÁGENES

Todas las imágenes de CASI-1500i y AHS se adquirieron correctamente. Las condiciones atmosféricas fueron variables en las distintas fechas, con presencia de nubosidad por encima del nivel de vuelo los días 22 y 24 de junio en Barrax; y con baja visibilidad y algún cúmulo bajo el nivel de vuelo el 3 y 4 de julio en San Rossore. El equipo de radiometría de campo del INTA participó en la toma de datos radiométricos (ASD-FR) y atmosféricos (Cimel CE 318) en Barrax, que luego se utilizaron en el proceso de corrección atmosférica.

El **proceso de imágenes** se realizó hasta el nivel comprometido en el proyecto, que incluía la distribución de imágenes de radiancias en el sensor geolocalizadas (L1b), de reflectancias y temperaturas de la superficie (L2b), así como productos de control de calidad de la georreferenciación (L1c y L2c).

La **corrección radiométrica** de AHS y CASI-1500i se llevó a cabo con respectivos modelos empíricos basados en los coeficientes de calibración obtenidos en el laboratorio del Área de Teledetección del INTA (AHS) o por ITRES (CASI-1500i, recibido en mayo de 2009), en información de la propia imagen (cuerpos negros en el caso de AHS) y en los datos de radiometría de campo de un vuelo previo de calibración realizado el 22 de mayo de 2009.

La **georreferenciación** de las imágenes era un requisito clave en el proyecto SEN3EXP, necesario para la generación de imágenes sintéticas (mosaicos de imágenes), para la superposición con imágenes de satélite y para la ubicación de los datos de campo y de otras fuentes de información geográfica. Para llevarla a cabo se contó con la información de la Unidad de Medida Inercial (IMU) Applanix POS/AV- 410 (posición de la plataforma por GPS y ángulos de giro, alabeo y cabeceo) y con Modelos Digitales de Elevaciones del (DEM) con la máxima resolución espacial disponible.

En AHS, La asignación de posiciones geográficas a cada píxel imagen se llevó a cabo con la aplicación comercial PARGE (www.rese.ch), que genera un fichero IGM, con las coordenadas geográficas de cada píxel, así como un fichero .sca, que almacena para cada píxel los ángulos de observación de la plataforma (acimutal y cenital), así como su altura y su distancia absoluta al píxel. En CASI-1500i se utilizó la aplicación *geocor*, suministrada por el fabricante, que genera un fichero GLU, que contiene las posiciones X e Y georreferenciadas y los ángulos de observación de la plataforma.



Figura 3: Mosaico de imágenes CASI-1500i de San Rossore (3 de julio de 2009)

Para la **corrección atmosférica** se utilizó, tanto en AHS como en CASI-1500i, el software comercial ATCOR4 (Richter, 2010). En Barrax los parámetros atmosféricos se obtuvieron de los datos del fotómetro Cimel CE 318 del INTA, mientras que en San Rossore hubo que acudir a datos de los productos atmosféricos de MODIS.

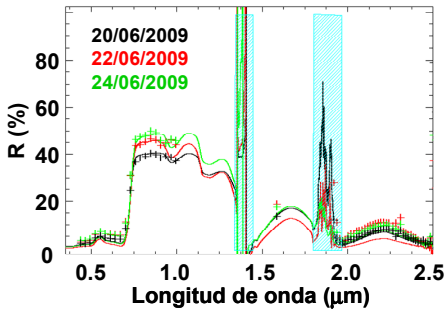


Figura 4: Espectros de reflectancia de ASD (trazo continuo) y AHS (cruces) en un cultivo de maíz en Barrax

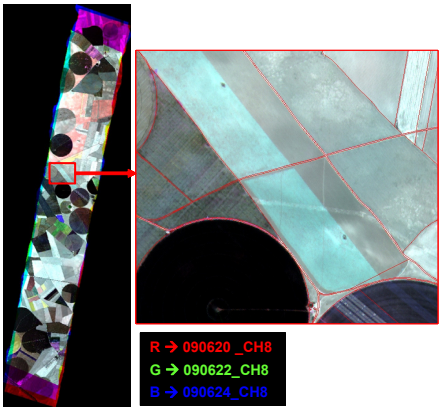


Figura 5: Composición multitemporal en falso color de la banda 8 de CASI (pasada P02AD) en las tres fechas de vuelo sobre Barrax, con información vectorial superpuesta

Las imágenes suministradas fueron acompañadas de información relativa a la **calidad de los datos**, tanto desde el punto radiométrico como geométrico. Así, se extrajeron de las imágenes los niveles de ruido para radiancia y temperatura (NEΔL y NEΔT). En el caso de AHS calculados como la media de la desviación estándar de los niveles digitales registrados en los dos cuerpos negros del sensor. Y en CASI 1500i el NEΔL se calculó como la media de las desviaciones estándar de cada columna a lo largo de las Líneas de Uniformidad (UF), que son líneas registradas por el instrumento cuando observa el terreno con una placa difusora móvil interpuesta, justo antes de comenzar a grabar la escena.

El error de la georreferenciación se estimó utilizando puntos de control (GCP) obtenidos de la mejor cartografía digital disponible en cada una de las zonas. En todos los casos el RMS estuvo dentro de los valores previstos, en torno a 1 píxel en ambos ejes de coordenadas.

CONCLUSIONES

Los sistemas hiperespectrales aeroportados del INTA cumplieron con los requisitos espectrales, radiométricos y geométricos del proyecto SEN3EXP, encaminados a la simulación de imágenes Sentinel 3 en zonas continentales.

La cadena estándar de proceso del Área de Teledetección del INTA esta preparada para generar los productos Nivel 2, georreferenciados, y corregidos atmosféricamente, que son demandados en campañas de simulación y/o validación de sensores espaciales.

BIBLIOGRAFÍA

DRINKWATER AND REBHAM, 2007: *Sentinel 3 Mission Requirements Document*. Issue 2 revision. EOP-SMO/1151/MD-md. European Space Agency.

RICHTER, R., 2010. *Atmospheric / Topographic correction for Airborne Imagery*. DLR German Aerospace Centre, Remote Sensing Data Centre.

Sentinel-3 Experimental Campaign, Data Acquisition Report, 2010. http://www.brockmann-consult.de/wiki/display/Sen3Exp/Documents

Technical assistance for airborne, satellite and ground-based measurements during the SEN3EXP Campaign. Experimental Plan, 2009. http://www.brockmann-consult.de/wiki/display/Sen3Exp/Documents

Estudio multitemporal de la cuenca del embalse de La Mariposa (Venezuela) utilizando teledetección

C. Goitía[1], S. Yepéz[1] y W. Barrios[1]

[1] Instituto de Ingeniería. CPDI. Urbanización Monte Elena II. Altos de Sartanejas. Baruta. Caracas. Venezuela. Correo electrónico: carmeng@fii.gob.ve; syepez@fii.gob.ve; wbarrios@fii.gob.ve;

RESUMEN

El análisis multitemporal de detección de cambios utilizando imágenes Landsat-TM y Spot 5 ha hecho posible la realización de un estudio de cambios ocurridos en el tiempo en cuanto a los procesos de ocupación y uso de la tierra en la cuenca del embalse La Mariposa, Caracas Venezuela. Las imágenes utilizadas se corrigieron geométricamente y radiométricamente y fueron re- escaladas a píxeles de 30m x30m para su comparación. Para cuantificar los cambios, se realizó una clasificación supervisada de máxima verosimilitud. Se detectaron cambios severos en la cuenca por el crecimiento urbano descontrolado y sin planificación, trayendo como consecuencia el deterioro en la calidad de las aguas del embalse y la colmatación de sedimentos en el mismo.

Palabras clave: Teledetección, uso del suelo, estudio multitemporal, cuenca, embalse.

ABSTRACT

The multitemporal analysis of change detection using Landsat-TM and Spot 5 imagery has made possible the development of a study of occupation processes and land use over time in the reservoir basin La Mariposa Caracas Venezuela.. All used images were corrected geometrically, radiometric and rescaled to 30mx30m for comparison. In order to detect the change areas there were applied the supervised classification of maximum likelihood. Detecting changes severe in the Mariposa basin by urban growth uncontrolled and unplanned resulting in the degradation in the quality water reservoir and high sedimentation.

Keywords: *Remote sensing, land use, mutitemporal study, basin, dam.*

INTRODUCCIÓN

Los embalses, como unidades ecológicas, están relacionados directamente con su cuenca colectora u hoya tributaria, en consecuencia son afectados diferencialmente si la cuenca colectora se encuentra intervenida por la actividad humana. En condiciones naturales la cantidad de agua que capta o colecta un embalse está determinada por la abundancia de precipitación que cae en su cuenca tributaria, las actividades agrícolas existentes pueden influir sustancialmente en los niveles de nitrógeno, fosforo, materia orgánica y bacterias. En este mismo contexto, sustancias tóxicas pueden ingresar en un cuerpo de agua, así por ejemplo, la minería incrementa la concentración de metales en el agua y la acidez de las mismas. De igual forma las descargas de aguas negras y residuos industriales son un grave problema en ascenso.

En la actualidad, el uso masivo de las imágenes de satélite permite realizar una evaluación y el monitoreo temporal de los cambios ocurridos en los usos dentro de la cuenca y los diferentes parámetros de calidad de las aguas a un bajo costo.

La existencia de un numerosos de embalses en el país destinados para el abastecimiento, riego y/o hidroelectricidad hace necesario un monitoreo continuo de su cuenca. El incremento asentamientos humanos trae como consecuencia el aumento de las descargas de aguas sin el debido tratamiento, que aporta una gran carga de nutrientes que acelera el proceso de eutrofización en los embalses. La consecuencia inmediata es el crecimiento excesivo de algas, olores desagradables, el bloqueo de los filtros en las estaciones de tratamiento y bombeo, lo cual encarece y retarda el tratamiento de las aguas. Este estudio tiene como piloto el embalse de La Mariposa, la experiencia lograda será extendida a los principales embalses existentes en el país.

La presente investigación propone una metodología para evaluar la variación del área del embalse, y estudiar la variación del uso del suelo en la cuenca de drenaje con el apoyo de las imágenes de satélite. Los resultados serán presentados a las autoridades ambientales para que dispongan de información y tomar las medidas necesarias y que sirvan de insumo a la planificación en el mantenimiento de los embalses y en sus cuencas de drenaje, así como en la elaboración de planes para mantener el equilibrio ecológico del embalse.

AREA DE ESTUDIO.

La Zona Protectora de la Cuenca Hidrográfica del Embalse La Mariposa, ubicada al suroeste del Área Metropolitana de Caracas, tiene una superficie de 2824,8 ha, corresponde a una figura jurídica de protección ambiental ABRAE (Área bajo régimen de administración especial) Decreto Nº 2.472 del 05-10-1.988, publicado en la Gaceta Oficial extraordinaria Nº 4.082 del 11-04-1.989 establecida con el objeto de salvaguardar la calidad de las aguas, la vida útil del embalse La Mariposa y la conservación de los recursos naturales existentes.

El embalse La Mariposa está ubicado en el Distrito Capital a 8 km de la ciudad de Caracas (10°24'41"N; 66°33'52"W). La mayor parte del agua que recibe el embalse proviene del río El Valle, el cual recibe una considerable cantidad de agua por transvase desde el embalse Lagartijo mediante el Sistema Tuy. El embalse también recibe aguas de una pequeña quebrada conocida como Quebrada Los Indios ubicada en la zona oriental del mismo. El embalse está situado a 980 m.s.n.m y su cubeta es alargada con dos brazos principales al sur y al este correspondientes a las desembocaduras del río El Valle y la Quebrada Los Indios, respectivamente. El volumen embalsado es de 4.000.000 m^3, cubre un área de 54 has y las profundidades máximas y mínimas son 20 m y 6,7 m, respectivamente (González, 1998). (Figura 1).



Figura 1: Embalse La Mariposa. Caracas Venezuela

METODOLOGÍA

El trabajo se ha fundamentado en la combinación de dos elementos, en primer lugar la revisión bibliográfica de trabajos previos relacionados con las causas del deterioro del cuerpo del embalse y de la calidad de sus aguas; y en segundo lugar la utilización de imágenes de satélite adquiridas en diferentes fechas para el estudio de los cambios ocurridos en el tiempo, en cuanto a los procesos de ocupación del suelo y el uso de la tierra.

Para detectar los cambios ocurridos en la cuenca del embalse se utilizaron 2 imágenes Landsat, del 31 de mayo de 1990 y de 20 de marzo del 2003 y una imagen SPOT 5 del 25 de marzo del 2010.

Para el análisis de los cambios de uso y cobertura natural, se corrigieron las imágenes geométricamente y radiométricamente, luego fueron re-escaladas a píxeles de 30m x 30m para su comparación. Se seleccionaron alrededor de 8 clases dominantes entre cobertura y uso de la tierra para las tres imágenes, seguidamente se realizó una clasificación supervisada de Máxima Verosimilitud verificándola a través de la matriz de contingencia (confusión) y el índice de kappa, luego se compararon las tres imágenes clasificadas. No fue posible disponer de imágenes de buena calidad que coincidieran con las fechas de los muestreos disponibles, por lo que con los datos históricos se determino la tendencia estadística. Con los cambios detectados con las imágenes clasificadas y el análisis de las tendencias de las medidas en campo, complementado con la información bibliográfica existente, se establecen las principales causas del deterioro de las aguas del embalse y la intervención de la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSION

Al analizar la matriz de confusión de la clasificación de las imágenes Landsat de 1990 y 2003 registraron un alto valor de precisión 88,8 y 88,26 % respectivamente y el coeficiente de Kappa fue de 0,88. Para la imagen Spot el valor obtenido en la matriz de confusión fue de 92,2 % un alto valor y el índice de Kappa de 0,91. La dinámica de la cobertura natural y el uso de la tierra en los años de estudio se determinaron cuantificando el área de cada clase. Las clases seleccionadas fueron: agua (el embalse), bosque, matorral, urbano, herbazal, uso agrícola, suelo desnudo y áreas quemadas. (Tabla 1).

	AREA (ha)		
CLASES	1990	2003	2010
AGUA (EMBALSE)	21,5	25,1	35,5
BOSQUE	5444	6615	4128
MATORRAL	877	961	1963
HERBAZAL	1038	492	539
URBANO	1669	1632	3994
AGRÍCOLA	3139	2484	-
SUELO DESNUDO	994	2493	3683
ÁREAS QUEMADAS	372	505	299

Tabla 1: Áreas de uso y cobertura en cada imagen

En la imagen del año 1990 se puede observar como el uso urbano es reducido, con actividad agrícola dispersa espacialmente. En las imágenes del 2003 y 2010 se puede observar como este se ha esparcido y densificado, cubriendo una mayor área de la cuenca la principal causa es la cercanía a la capital del país, eje de concentración demográfica y administrativa de mayor jerarquía nacional. (Figura 2). Esta ocupación no controlada y desordenada ha generado un deterioro en la capacidad del embalse y la calidad de sus aguas que almacena, pues no se ha tomado en cuenta en su mayoría la conexión a ningún sistema de vertidos permitido, como los colectores municipales, plantas de tratamiento o pozos sépticos o sumideros.

Este proceso urbanizador asociado a la destrucción de la cobertura vegetal, la construcción de la vialidad, quemas, etc., ha generado por escorrentía superficial una alta cantidad de sedimentos que van caen directamente en el embalse y en consecuencia la cuenca presenta un alto grado de erosión acumulada a lo largo de los años.

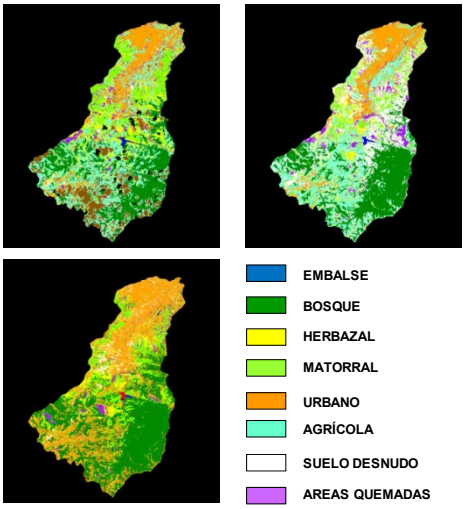


Figura 2: Imágenes Clasificadas. De arriba, derecha y abajo*:* **a)** imagen Landsat5 TM clasificada año 1990 **b)** imagen Landsat7 ETM 20 de marzo año 2003 **c)** imagen clasificada Spot 5 25 de marzo 2010 y **d)** Leyenda de clases.

Adicionalmente, se ha comprobado de las aguas residuales sin tratamiento y las aguas provenientes del Sistema Tuy I que trae aguas desde la Cuenca del Río Tuy han deteriorado la calidad de las aguas del embalse, mediciones realizadas desde el año 1997 muestran las concentraciones de nitrógeno (N) que varían de 47,09 a 241,38 µg/l con un promedio de 129,47 µg/l y el fósforo (P) va desde 758,64 a 2531,67 µg/l con un promedio de 1497,19 µg/l, estas altas concentraciones de nutrientes y en especial el fósforo total, han permitido clasificar el embalse como hipertrófico según Salas & Martino (1991), presentando sus aguas de color marrón y verde oliva, como consecuencia de la alta turbiedad abiogénica y densas poblaciones de fitoplancton registradas, siendo las *Cryptophyta* la especie dominante.

En cada una de las imágenes se calculo el área del embalse, observándose un aumento progresivo de su área debido al incremento de las precipitaciones y del flujo de las aguas de los afluentes. (Tabla 2).

AÑOS	AREA DEL EMBALSE (ha)
1990	23,4
2003	25,9
2010	31,2

Tabla 2: Variación del área del embalse

En la imagen del año del 2010 se observa que gran parte del área del embalse (19,4Ha) se encuentra cubierto por bora (*Eichhornia crassipes*) (Gonzalez, 2008) lo que representa un 62,2% aproximadamente de su área y esto se debe a las altas concentraciones de nutrientes que descargan al embalse y a la falta de mantenimiento del embalse por parte de las autoridades encargadas.

CONCLUSIONES

Los diferentes organismos que se encargan del mantenimiento de los embalses en Venezuela no realizan un monitoreo sistemático de sus cuencas, y las imágenes de satélite son una herramienta útil para hacerlo de manera rápida y a bajo costo.

La combinación de datos de calidad del agua con las imágenes de satélite en cuerpos de agua permite realizar una evaluación rápida del cuerpo del agua y tomar las medidas necesarias para mitigar su deterioro y asegurar un manejo racional del recurso.

La imagen Spot del año 2010 nos muestra claramente como el área del embalse está cubierta de bora (*Eichhornia crassipes*) debido a la falta de mantenimiento del embalse y la intervención de la cuenca lo cual ha impedido durante los últimos años la realización los muestreos en el embalse propiamente.

En cuanto al uso urbano, este se ha incrementado en 239% en la cuenca, desarrollándose de una forma descontrolada y sin planificación trayendo como consecuencia el deterioro en la calidad de las aguas del embalse y la colmatación por sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

HIDROCAPITAL., HIDROIMPACTO C.A 1.997. *Control de Algas en los Embalses La Pereza, Quebrada Seca, La Mariposa, Lagartijo y Camatagua mediante técnicas de biomanipulación.* Contrato Nº HC-SG-EST-97-002.

HIDROCAPITAL., HIDROIMPACTO 1.999. *Características limnológicas de los embalses La Pereza, Lagartijo, La Mariposa y Quebrada Seca y preservación del zooplancton como controlador de microalgas mediante técnicas de biomanipulación.* Contrato Nº HC-VOM-EST-98-0001.

GONZALEZ, E.J; M ORTAZ, 1998. *Efectos del enriquecimiento con N y P sobre la comunidad del fitoplancton en microcosmos de un embalse tropical (La Mariposa, Venezuela).* Rev. Biol. Trop, 46. Pag: 27-34.

GONZALEZ, E.J; 2008. *Eutrofización de embalses en Venezuela.* Memorias del Instituto de Biología Experimental vol.5: pág 169-172.

SALAS H.; P. MARTINÓ, 1.990. *Metodología simplificada para la evaluación de la eutroficación en lagos cálidos tropicales, Programa Refioval* CEPIS/HPE/IOPS. Lima 52 p.

TIRADO, MARTINEZ, N, 2000. *El proceso de ocupación de la cuenca del Embalse La Mariposa y sus efectos de deterioro en el embase y sus aguas.* Terra Nueva Etapa año/vol XVI número 025. Universidad Central de Venezuela. Caracas Venezuela, pág: 27-55.

WETZEL, R & G.E. LIKENS; 1991.*Limnological Analyses*. 2nd edition. Springer -Verlag. Nueva York. 391 p

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al profesor Ernesto González del Laboratorio de Biología Experimental de la Universidad Central de Venezuela.

Estimación de los flujos de energía en superficie en el sur de España a escala local y regional mediante un modelo multi-sensor

M. P. González-Dugo[1], M. C. Anderson[2], W. Kustas[2], F. L. M. Padilla[1], P. Ortiz-Serrano[3], P. Gavilán[1] y F. Domingo[3]

[1] IFAPA. Instituto de Investigación y Formación Agraria de Andalucía. Apdo. 3092. 14080 Córdoba (España). Correo electrónico: mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

[2] USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, Bldg. 007, BARC West, Beltsville, MD 20705 (Estados Unidos).

[3] EEZA- Estación Experimental de Zonas Áridas-CSIC. Ctra. de Sacramento s/n La Cañada de San Urbano, 04120 Almería (España).

[4] Universidad de Almería, Dpto. Biología Vegetal y Ecología, 04120 Carrera Sacramento s/n. La Cañada de San Urbano, 04120 Almería (España).

RESUMEN

Se presentan los primeros resultados de la aplicación de un modelo multisensor (ALEXI-the Atmosphere-Land Exchange Inverse) que combina un balance de energía en superficie con un modelo atmosférico de capa límite, integrando datos ópticos y térmicos, de satélites geoestacionarios y de órbita polar. Se han seleccionado dos zonas de aplicación muy diferentes en el sur de España: una zona de riego en el valle medio del Guadalquivir y un conjunto de sitios en el SE de Andalucía con vegetación natural dispersa y de bajo porte. Se han obtenido mapas de evapotranspiración y de los demás componentes del balance de energía en distintas fechas durante el año 2009 sin la necesidad de información meteorológica medida en tierra y con una precisión aceptable, lo que indica la utilidad de este sistema como herramienta de planificación hidrológica.

Palabras clave: Balance de energía, térmico, evapotranspiración, Meteosat, Landsat, MODIS.

ABSTRACT

A multi-sensor TIR model (ALEXI-the *Atmosphere-Land Exchange Inverse) to map ET has been applied in southern Spain. It is designed to minimize the need of ancillary data by coupling a two-source (soil + canopy) land-surface model with an atmospheric boundary layer model in time-differencing mode to map energy fluxes at different scales, using geostationary and polar orbiting satellites. Two areas with contrasting surface conditions are used to validate the model: an agricultural zone located in the Guadalquivir river valley and a sparsely vegetated area located in the arid SE of Andalusia. The first positive results, when compared with ground-measured data, suggest its potential for water management.*

Keywords: *Surface energy balance, thermal sensor, evapotranspiration, Meteosat, Landsat, MODIS.*

INTRODUCCIÓN

En el sureste español existe un marcado desajuste entre la disponibilidad de agua y su demanda, lo que provoca un estado deficitario en la mayoría de las cuencas. La imposibilidad de ampliar la capacidad de almacenamiento del sistema, obliga a buscar soluciones que mejoren la eficacia de la gestión de este recurso. La existencia de información de calidad sobre el consumo real de agua en las cuencas y el estado hídrico de las cubiertas vegetales determinará la capacidad de prever la evolución de la disponibilidad de agua a medio plazo y reducirá la incertidumbre en la toma de decisiones. La información ofrecida por sensores remotos localizados en satélites es idónea para realizar el seguimiento de procesos relacionados con el déficit hídrico en el suelo y la planta a diferentes escalas espaciales. Su información permite calibrar modelos de balance de energía si se combinan con otras fuentes de datos y se analizan los efectos de escala.

En este trabajo se presentan los primeros resultados de una aplicación que integra datos

ópticos y térmicos, de satélites geoestacionarios y de órbita polar, en un modelo (ALEXI-The Atmosphere-Land Exchange Inverse) que combina un balance de energía en superficie de doble fuente (suelo+vegetación), con un modelo atmosférico de capa límite. Se han seleccionado dos zonas de aplicación con características evaporativas casi opuestas: una zona de riego en el Valle medio del Guadalquivir con extensas parcelas cultivadas con maíz, y un conjunto de sitios en el SE de Andalucía (Sierra de Gádor y Cabo de Gata) con una vegetación natural dispersa y de bajo porte adaptada a las áridas condiciones del entorno.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo de balance de energía en superficie ALEXI (Anderson *et al.*, 1997, 2011) ha sido diseñado con el doble objetivo de minimizar la necesidad de información meteorológica local y mantener una representación realista del intercambio de energía en el sistema suelo-planta-atmósfera. Para ello, recurre al uso de los satélites geoestacionarios y a los datos proporcionados por modelos de predicción climática a escala global, WRF (Weather Research and Forecasting Model) en este caso. Ambos, combinados con la información óptica y térmica procedente de satélites polares, permiten resolver el balance de energía en superficie (Eq.1) estimando la evapotranspiración (ET) a las escalas espaciales requeridas por las distintas aplicaciones.

$$Rn - G = H + \lambda E \qquad (1)$$

donde Rn = radiación neta, G = flujo de calor al suelo, H = flujo de calor sensible, λE = flujo de calor latente.

La base de este modelo es la versión en serie del balance de energía de doble fuente de Norman y Kustas (TSEB, Norman *et al.* 1995, Kustas y Norman, 1999) que descompone la temperatura radiométrica proporcionada por los sensores térmicos en las respectivas temperaturas del suelo y la vegetación. Su aplicación se realiza a dos horas distintas durante el crecimiento matinal de la capa límite atmosférica (CLA) con el fin de estimar valores distribuidos de la temperatura del aire con la resolución espacial del sensor geoestacionario empleado. El cierre del balance de energía en este periodo lo proporciona un modelo sencillo de desarrollo de la CLA (Mc-Naughton y Spriggs, 1986). Esta configuración, basada solo en la variación relativa de la temperatura, minimiza los errores en la estimación de los flujos debidos a la calibración absoluta de los sensores y a los efectos atmosféricos y de heterogeneidad espacial.

La desagregación de los flujos de energía a mayor resolución espacial (Dis-ALEXI) se realiza empleando los sensores térmicos de satélites polares como Landsat ó MODIS que, aunque condicionados por la frecuencia y hora de paso de los sensores, permiten obtener estimaciones de los flujos a escalas del orden de 100-1000 m facilitando la validación de los resultados y su aplicación a escala local y regional.

DATOS DE PARTIDA Y APLICACIÓN DEL MODELO

El modelo, originalmente diseñado para su aplicación con GOES a una escala, previa a la desagregación, de 10 km, se ha aplicado en el sur de España usando los datos de Meteosat (MSG), proporcionados por LSA SAF (Land Surface Analysis Satellite Applications Facility), lo que ha permitido mejorar su resolución a 3 km.

A escala local se ha aplicado en dos zonas de características diferentes, situadas en Córdoba y Almería, usando para ello un conjunto de imágenes del satélite Landsat TM. Se ha iniciado asimismo su aplicación a escala regional empleando a modo de prueba una imagen MODIS del verano de 2009. Las características de las zonas de aplicación son:

a. una zona agrícola de la vega del Guadalquivir con predominio de cultivos herbáceos. Se ha seleccionado una parcela de riego cultivada con maíz durante el verano de 2009. Se han empleado 5 imágenes consecutivas de Landsat TM adquiridas desde junio hasta final de agosto (días 171, 189, 203, 219 y 235).
b. Sierra de Gádor (Llano de los Juanes) y Cabo de Gata (Amoladeras y Balsa Blanca), en el SE de Andalucía. Se han empleado las medidas de flujos de energía en estos tres sitios con predominio de vegetación natural dispersa y de bajo porte. Se ha usado una imagen TM de invierno (día 45) y dos de verano de 2009 (días 157 y 205).

Las imágenes Landsat-TM han sido corregidas geométricamente usando un modelo digital de elevaciones de 20m de resolución y una ortofotografía color de 1m para la obtención de puntos de control. Para la corrección atmosférica se ha empleado el modelo MODTRAN y los datos proporcionados por el calculador de parámetros atmosféricos del NASA-GSFC (Barsi

et al., 2005). La información sobre uso del suelo se ha obtenido del mapa Corine-Landcover de la UE con una resolución de 100 m.

Para la validación de los flujos de energía se ha empleado la información proporcionada por cuatro torres (una en la zona *a* y tres en la zona *b*) equipadas con un sistema de covarianza de torbellinos (*Eddy Covariance*, EC) y demás instrumentación necesaria para medir en continuo los cuatro flujos de energía de superficie.

RESULTADOS

Los primeros resultados de la aplicación del modelo a escala local indican un ajuste razonable con los datos medidos para los flujos de Rn, H y λE, como puede observarse el la figura 1 y en los estadísticos de la tabla 1. Sin embargo, la dispersión que presenta la estimación de G es muy alta, mostrando una baja correlación con las medidas que parece indicar la necesidad revisar la formulación del modelo en este caso.

En general el rendimiento del modelo es ligeramente inferior al observado en aplicaciones previas de TSEB con datos meteorológicos medidos en tierra (González-Dugo *et al*. 2009) que muestran valores de RMSD para H y λE entre 20-45 W m^{-2}. Sin embargo, estas diferencias se reducen, mejorando significativamente el ajuste (15-20% de error para H y λE), cuando se analizan únicamente los resultados obtenidos en la zona de cultivos, tipo de cubierta en la que este tipo de modelos han sido aplicados con mayor frecuencia.

La aplicación con datos MODIS ha permitido poner a punto el procedimiento a escala regional, pero la única imagen procesada no permite por el momento evaluar sus resultados. La figura 2 presenta, a modo de ejemplo, algunos mapas de evapotranspiración obtenidos a las distintas escalas de trabajo, mostrando la ubicación de las cuatro torres de medida de flujos de energía usadas en la comparación.

[W m^{-2}]	**Rn**	**H**	**λE**	**G**
Promedio obs.	513	188	262	71
RMSD	76	67	90	73
%	15	35	34	104
r^2	0.87	0.85	0.8	0.05

Tabla 1: Valores estadísticos obtenidos en la comparación entre flujos de energía estimados y medidos por las torres EC (n=13).

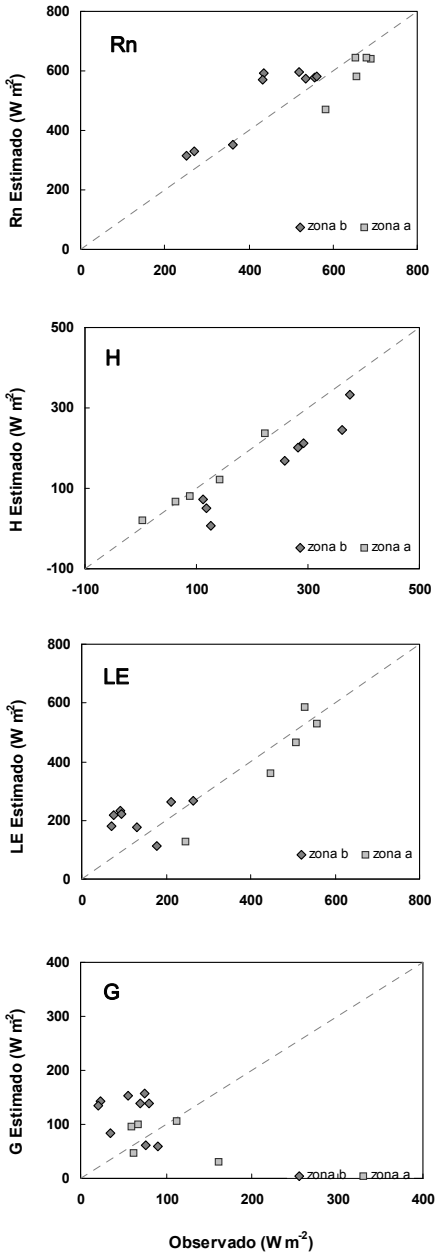


Figura 1: Comparación de las estimaciones de flujos con los valores medidos por las torres.

CONCLUSIONES

La aplicación de este modelo multi-sensor en el sur de España ha permitido obtener mapas de evapotranspiración, calor sensible y radiación neta a distintas escalas espaciales, sin la necesi-

dad de información meteorológica medida en tierra, y con una precisión que parece aceptable para aplicaciones a escala de cuenca. Aunque es necesario avanzar en la validación del modelo sobre otras cubiertas, este sistema se presenta como una herramienta de gran utilidad para apoyar la toma de decisiones en la planificación hidrológica.

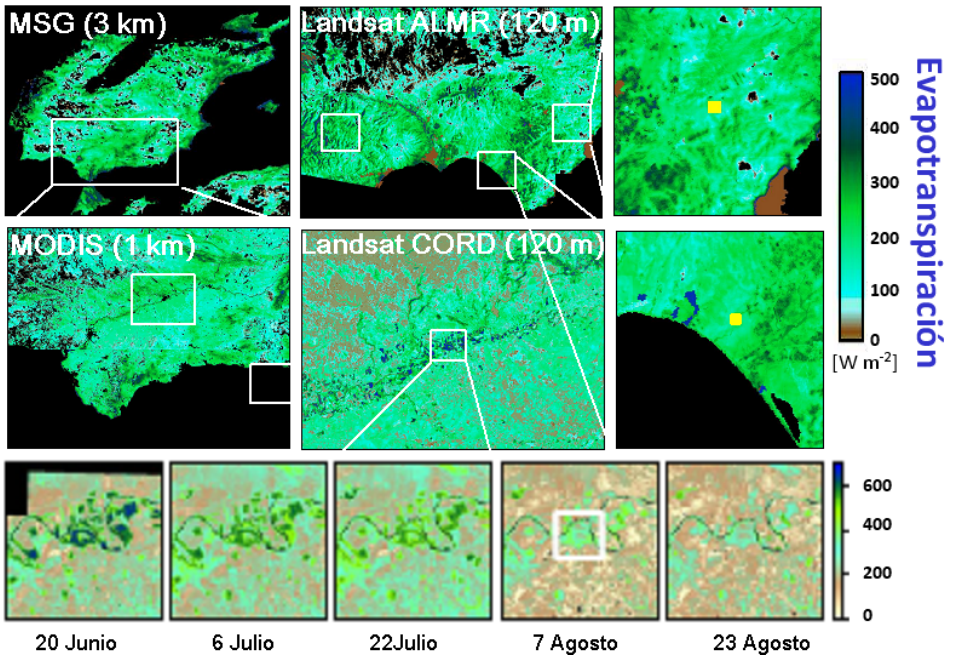


Figura 2: Evapotranspiración estimada a distintas escalas sobre las zonas de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON MC, NORMAN JM, DIAK GR, KUSTAS WP, MECIKALSKI JR, 1997. *A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing* Remote Sens. Environ. 60, 195–216.

ANDERSON MC, KUSTAS WP,NORMAN JM, HAIN CR, MECIKALSKI JR, SCHULTZ L, GONZÁLEZ-DUGO MP, CAMMALLERI C, D'URSO G, PIMSTEIN A, GAO F, 2011. *Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satell*. Hyd. Earth Sys. Sci. 15: 223-239.

BARSI JA., SCHOTT JR, PALLUCONI FD, HOOK SJ, 2005 *Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments*. Earth Observing Systems X, Proc. SPIE Vol. 5882, San Diego, EEUU.

GONZÁLEZ-DUGO, MP, CMU NEALE , L MATEOS, WP KUSTAS, J PRUEGER, MC ANDERSON, F. LI. 2009. *A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration*. Agric. Forest Meteorol. 149, 1843-1853.

KUSTAS WP, NORMAN JM. 1999. *Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover*, Agric. For. Meteorol. 94, 13–29.

MCNAUGHTON KG, SPRIGGS TW, 1986: *A mixed-layer model for regional evaporation*, Bound. Lay. Meteorol. 74, 262–288.

NORMAN JM, KUSTAS WP, HUMES KS, 1995: *A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature*, Agr. For. Meteorol. 77, 263–293.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido el apoyo financiero de diferentes proyectos: AGR-2317 financiado por la CICE-J. Andalucía, PROBASE (CGL2006-11619/ HID) de PN de I+D, GEO-CARBO (P08-RNM-3721, GLOCHARID, J. Andalucía y fondos FEDER (UE).

Evaluación de la Evapotranspiración obtenida a partir de la base de datos Pathfinder AVHRR Land (PAL)

V. Hidalgo[1], J. Sobrino[1], J.C. Jiménez-Muñoz[1], Y. Julien[1], C. Mattar[1], B. Franch[1], G. Soria[1], R. Oltra-Carrio[1] y J. Cuenca[1]

[1] Global Change Unit, Image Processing Laboratory, Parque Científico, Universidad de Valencia, Spain. Correo electrónico: m.victoria.hidalgo@uv.es

RESUMEN

El presente trabajo evalúa los datos proporcionados por el proyecto Pathfinder AVHRR Land (PAL) para la obtención de la evapotranspiración diaria, ET_d, a escala global. ET_d ha sido estimada como término residual del balance de energía utilizando el concepto de fracción de evaporación, EF. Para ello se han utilizado las imágenes proporcionadas por la base de datos PAL así como datos externos a través de la base de datos ERA-interim. Las imágenes obtenidas de ET_d han sido comparadas con los datos procedentes de dos torres de flujos situadas en America del Norte (Walker Branch y Harvard Forest) obteniendo un error de 1 mmd^{-1}. Por otro lado, en este trabajo se presenta un estudio del valor de ET_d para los tipos de suelos más representativos a escala global y su evolución temporal a lo largo de un año. Para completar este trabajo, se ha analizado la fiabilidad de los obtenidos y se ha evaluado la idoneidad de la base de datos PAL para la producción de ET_d.

Palabras clave: evapotranspiración, escala global, PAL, AVHRR.

ABSTRACT

The present work evaluates the data provided by the project Pathfinder AVHRR Land (PAL) to obtain daily evapotranspiration, ET_d, at global scale. ET_d has been estimated as residual term of the energy balance using the concept of evaporative fraction, EF. For this one, it has been used the images provided by the PAL database and external flux data from the database ERA-interim.ET_d imagery have been compared with in situ data from two flux towers located in North America (Walker Branch and Harvard Forest) obtaining an error 1mmd^{-1}. On the other hand, this paper presents a study of the ET_d value for the most representative soil types at global scale and its evolution over a year. To complete this work, we analyzed the reliability of the results and we evaluated the adequacy of the PAL data base for the production of ET_d.

Keywords: *evapotranspiration, global scale, PAL, AVHRR*

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración, ET, es considerada como uno de los parámetros críticos para el análisis de condiciones climáticas, así como para cuantificación y predicción del ciclo hidrológico y recursos hídricos. Las técnicas convencionales proporcionan mediciones puntuales, que por lo general no son representativas a escala regional debido a la heterogeneidad de la superficie y de la naturaleza dinámica de los procesos de transferencia de calor. Por ello la teledetección es empleada para la obtención de la ET. En los últimos años se han desarrollado numerosos modelos para la obtención de dicho parámetro (Wang et al., 2007), los cuales han sido analizados a escala global (Wang y Liang, 2008).

El estudio de la evolución temporal de la ET puede ser utilizado para analizar el ciclo global del agua. La dificultad para obtener una cobertura completa de datos in situ a nivel global, junto con la baja cobertura temporal de los datos de teledetección, hacen que este trabajo sea difícil de realizar. En un intento por obtener la evapotranspiración diaria, ET_d, a escala global y durante un periodo prolongado de tiempo, en el presente trabajo se ha utilizado la base de datos Pathfinder AVHRR Land (PAL) que comprende desde julio de 1981 a septiembre del 2001. Dicha base de datos proporciona imágenes a escala global con una resolución espacial de 0.1º y una resolución temporal de 10 días. Junto con estas imágenes, se han utilizado los flujos estimados a partir de la base de datos ERA-interim.

BASE DE DATOS

Pathfinder AVHRR Land (PAL)

PAL proporciona imágenes globales de la Tierra a una resolución espacial de 0.1º y una resolución temporal de 10 días, desde Julio del 1981 hasta Septiembre del 2001. Dicha base está compuesta por 5 imágenes para cada periodo de 10 días, una en el visible (canal 1), una en el infrarrojo próximo (canal 2), dos en el infrarrojo térmico (canales 4 y 5), así como una imagen de NDVI.

Estas imágenes son obtenidas a partir del método llamado Maximum Value Compositing (MVC), que consiste en elegir para cada periodo de 10 días, y para cada píxel de la imagen, el día para el cual el valor de NDVI es máximo, con el fin de disminuir, entre otros efectos, el de las nubes (Holben, 1986).

En la base de datos PAL, los efectos atmosféricos están corregidos siguiendo el método de Gordon et al. (1988), que incluye una corrección de la absorción por el ozono (McPeters et al., 1993).

ERA-Interim

La base de datos ERA-interim contiene diferentes datos meteorológicos a escala global con una resolución de 1.5º x 1.5º. Los datos proporcionados tienen una cobertura temporal desde 1989 hasta la actualidad. Los parámetros utilizados en este trabajo son; la radiación neta, flujo de calor latente, radiación térmica descendente y evapotranspiración. Todos ellos tomados como valor diario.

Ameriflux

Los datos de evapotranspiración medidos in situ fueron obtenidos de la base de datos AMERIFLUX. Dicha base de datos proporciona medidas de flujos para diferentes puntos del norte de America. En nuestro caso, las medidas de ET fueron seleccionadas para dos zonas de estudio: Walker Branch (35.97°N, 84.28°W, elevación 365 m) y Harvard Forest (35.97°N, 84.28°W, elevación 365 m). Dichas estaciones fueron seleccionadas debido a la amplia extensión de cubierta vegetal que presentan, por lo que son valores representativos comparados con la resolución espacial de las imágenes PAL.

Una descripción detallada de los instrumentos y la metodología utilizada para el almacenamiento de los datos de flujo se encuentra en Baldocchi and Wilson (2001) para Walker Branch y Goulden et al. (1996) para Harvard Forest.

METODOLOGÍA

De acuerdo con la metodología propuesta por Gómez et al (2005) y Sobrino et al. (2007), la ET_d puede ser expresada como:

$$ET_d = \frac{EF_i \cdot Rn_d}{L} \qquad (1)$$

donde Rn_d es la radiación neta diaria, EF_i es la fracción de evaporación instantánea y L es calor latente de vaporización.

Radiación neta

El promedio de la radiación neta diaria puede ser estimada a partir de la radiación neta instantánea, Rn_i, mediante el ratio entre ambos valores (C_{di}=Rn_d /Rn_i) de acuerdo con Sobrino et al. (2007), donde C_{di} depende del día del año, DOY, y la hora de paso del sensor, t.

En el presente trabajo, el factor C_{di} se ha estimado mediante un ajuste cuadrático a partir del flujo de radiación neta medido en una estación meteorología al este de la Península Ibérica. Los coeficientes obtenidos son mostrados en la ecuación 2.

$$\begin{aligned} Cdi &= a \cdot DOY^2 + b \cdot DOY + c \\ a &= 0.000001t^2 - 0.000026t + 0.000161 \\ b &= -0.000325t^2 + 0.008465t - 0.052215 \\ c &= 0.039925t^2 - 1.009425t + 6.443925 \end{aligned} \qquad (2)$$

Para la estimación de la radiación neta instantánea se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$Rn_i = (1-\alpha) \cdot K_{sun} \cdot \cos\theta \cdot e \cdot \tau_{sw} - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_S^4 + \varepsilon \cdot L^{\downarrow} \qquad (3)$$

donde α es el albedo, el cual se obtiene mediante el promedio de las reflectividades superficiales de los canales 1 y 2 del sensor AVHRR. K_{sun} es la constante solar (1,367 W/m^2), θ es el ángulo solar zenital, e la excentricidad (en unidades astronómicas), τ_{sw} la transmisividad total atmosférica, σ la constante de Stephan Boltzmann, ε la emisividad superficial, T_s la temperatura de superficie y $L^{\downarrow}$ la radiación descendente de onda larga.

Para obtener el valor de τ_{sw} se ha promediado los valores de transmisividad total para los 6 tipos

de atmósferas que ofrece el código MODTRAN (Berk et al. 1989).

La emisividad superficial ha sido obtenida a partir del método de los umbrales del NDVI y la temperatura de superficie a partir del método split-window (Sobrino and Raissouni, 2000), aplicado a las dos bandas térmicas que ofrecen las imágenes PAL.
De esta forma Rn_d puede ser obtenido a partir de las ecuaciones (2) y (3) como;

$$Rn_d = \left[(1-\alpha)\cdot K_{sun}\cdot\cos\theta\cdot e\cdot\tau_{sw} - \sigma\cdot\varepsilon\cdot T_S^4\right]\cdot C_{di} + \varepsilon\cdot L_d^{\downarrow} \quad (4)$$

donde $L_d^{\downarrow}$ es la radiación térmica descendente diaria la cual ha sido tomada de la base de datos ERA-Interim.

Fracción de evaporación

Despejando EF de la ecuación 1, la fracción de evaporación puede ser expresada en función de la ET_d y la Rn_d como:

$$EF = \frac{L\cdot ET_d}{Rn_d} \quad (5)$$

Para obtener dicho parámetro se ha utilizado los flujos ET_d y Rn_d a partir de la base de datos ERA-interim.

Debido a la diferencia de resolución especial entre la base de datos PAL (0.1º x 0.1º) y ERA-interim (1.5º x 1.5º) esta última ha sido reescalada mediante una interpolación cúbica a 0.1º.

RESULTADOS

ET_d ha sido estimada a partir de la base de datos PAL usando la metodología presentada. Como ejemplo, la figura 1 muestra un mapa de ET_d a escala global a partir de la composición de 10 días de la base de datos PAL para el 1 de Julio de 1995. Los valores obtenidos para dicha imagen varían entre cero, correspondiente a zonas desérticas como veremos más adelante, y valores de 3 mmd^{-1}.

Con el fin de evaluar la metodología presentada, los valores de ET obtenidos han sido comparados con los valores de ET medidos en las torres de flujos para el año 1995 (Tabla 1). Para ambas estaciones, ET_d obtenida a partir de las imágenes PAL infravaloran los valores medidos in situ. Por otro lado, en ambos casos, el valor obtenido a partir de las imágenes PAL muestra una buena correlación con los datos in situ con un RMSE menor de 1 mmd^{-1}.

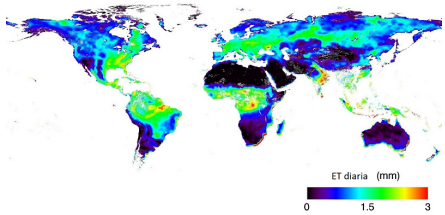


Figura 1: Imagen de ET_d a escala global, correspondiente a la composición de 10 días para el 1 de Julio de 1995.

Una correlación similar es obtenida cuando comparamos los valores de ET a partir de la base de datos ERA-interim, obteniendo un error de 1.7 mmd^{-1} y 0.9 mmd^{-1} para los datos de ET de las estaciones Walker Brach y Harvard forest, respectivamente.

	ET_{Walker}-$ET_{ERA_interim}$ (mmd^{-1})	ET_{Walker}-ET_{AVHRR} (mmd^{-1})	$ET_{Harvard}$-$ET_{ERA-interim}$ (mmd^{-1})	$ET_{Harvard}$-ET_{AVHRR} ((mmd^{-1}))
Bias	-1.4	-0.3	0.3	-0.2
STD	0.9	0.8	0.9	0.9
RMSE	1.7	0.8	0.9	0.9
r^2	0.8	0.8	0.9	0.8

Tabla 1: Comparación entre los valores ET_d-AVHRR, ET_d ERA-interim y ET_d AMERIFLUX a lo largo del año 1995.

Para un estudio más completo sobre otros tipos de vegetación, la figura 2 presenta la evolución anual, para el año 1995, de los valores de ET para los cuatro tipos más representativos de uso del suelo a escala global, junto con *bosque de hoja caduca*.
Para *bosques de hoja perenne* podemos observar valores similares a lo largo del año, 1.6 mmd^{-1}. Sin embargo, tanto para zonas agrícolas como para bosques de hoja caduca, observamos un ciclo periódico el cual tiene su máximo en los meses de verano correspondiente a la producción máxima. Por otro lado, los suelos con vegetación nula o escasa, presentan valores entorno a cero para todo el año.

Para completar este trabajo, hemos evaluado la idoneidad de la base de datos PAL como datos representativos para el estudio de la ET_d, ya que las imágenes son composición de 10 días.

Para ello hemos comparado los valores de ET_d obtenidos mediante las imágenes para las dos estaciones con el resto de los días de la composición de la imagen. El error cometido al suponer este dato como representativo de los 10 días, ha

sido estimado mediante el promedio de los datos de ET para los estaciones de flujos.

Para los datos de ambas estaciones, el error cometido para los meses de invierno es del orden de 0.3 mmd^{-1}. Sin embargo este error aumenta en los meses de verano, con valores de hasta 2.7 mmd^{-1}.

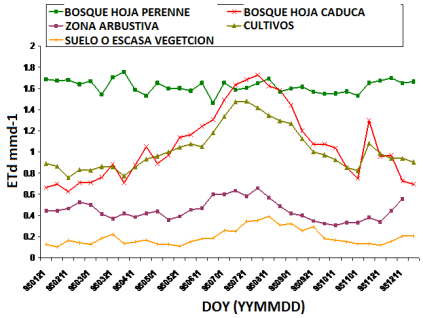


Figura 2: Valores de ET_d durante el periodo de 1995 para los distintos tipos de cobertura del suelo representativos a escala global

CONCLUSIONES

Se ha utilizado la base Pathfinder AVHRR Land (PAL) para la obtención de la evapotranspiración diaria, ET_d, a escala global.

Los resultados muestran una correlación de 0.8, entre los valores de ET_d obtenidos a través de las imágenes y los medidos en dos torres de flujos de la base de datos de AMERIFLUX, obteniendo un error de 1 mmd^{-1}. Por otro lado, para diferentes tipos de usos de suelo, los resultados muestran valores razonables en términos de tendencia anual de la ET_d.

BIBLIOGRAFÍA

BALDOCCHI Y WILSON, K.B. 2001: *Modelling CO_2 and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest on daily to decadal time scales*. Ecol. Modell. 142, pp. 155–184.

BERK,A., BERNSTEIN, L. S.,Y ROBERTSON, D. C. 1989. *MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7*, Technical Report GL-TR-89-0122.

GÓMEZ,M., SOBRINO,J.A., OLIOSO,A., & JACOB,F. (2005). *Retrieval of evapotranspiration over the Alpilles/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and Thermal Camera*. Remote Sensing of Environment, 96(3–4),399−408.

GORDON, H. R., BROWN, J. W., & EVANS, R. H. (1988). *Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 coastal zone color scanner*. Applied Optics, 27, 2111−2122.

GOULDEN, J.S. MUNGER AND S.M. FAN ET AL. 1996*: Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy*. Global Change Biol. 2 (3), pp. 169–182.

HOLBEN, B. N. 1986: *Characteristics of maximum values composite images from temporal AVHRR data*. International Journal of Remote Sensing, 7, 1417−1434

MCPETERS, R. D., BHARTIA, P. K., KRUEGER, A. J., HERMAN, J. R., SCHLESINGER, B., WELLEMEYER, C. G., ET AL. (1993). *Nimbus-7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) data products user's guide*. NASA Reference Publication, vol. 1384 (April).

SCHLOSSER, C. ADAM, XIANG GAO, 2010: *Assessing Evapotranspiration Estimates from the Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) Simulations*. J. Hydrometeor, 11, 880–897.

SOBRINO, J. A., & RAISSOUNI, N. (2000). *Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Marocco*. International Journal of Remote Sensing, 21, 353−363.

SOBRINO, J. A., GÓMEZ, M., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., OLIOSO, A. 2007. *Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula*. Remote Sensing of Environment, v.110, n.2, p.139-148.

UPPALA, S. AND CO AUTHORS. 2006. *The ERA-40 reanalyses*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Volume 131 Issue 612, Pages 2961 – 3012.

WANG, K., Z. LI, M. CRIBB, AND M. SPARROW, 2007: *A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature*. J. Geophys. Res., 112

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a la Unión Europea (CEOP-AEGIS, projecto FP7-ENV-2007-1 proposal No. 212921; WATCH, projecto 036946) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (EODIX, projecto AYA2008-0595-C04-01).

Evaluación de la utilización de imágenes MERIS para el seguimiento de humedales españoles mediterráneos

J. G. Lozano Arango[1], J. A. Domínguez-Gómez[2] y M. J. Viñals[1]

[1]Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Cº de Vera s/n. 46022 - Valencia (Valencia, España). E-mail: jualoar@doctor.upv.es; juanglozanoa@gmail.com
[2]Centro de Estudios Hidrográficos Pº Bajo de Virgen del Puerto nº 328005 Madrid

RESUMEN

La evaluación de la utilización de imágenes del sensor MERIS para el seguimiento de humedales mediterráneos se ha centrado en el estudio de los tres tipos más característicos: humedales costeros (La Albufera de Valencia) y humedales continentales: temporales (Laguna de El Hito) y permanentes (Laguna de El Cañizar). Mediante la utilización de imágenes del sensor MERIS, ha sido posible estudiar parámetros morfométricos, de calidad de agua y de vegetación palustre. También se ha identificado las limitaciones del uso de estas imágenes.

Palabras clave: teledetección, humedales, calidad de agua, MERIS.

ABSTRACT

The evaluation of using MERIS sensor images for monitoring Mediterranean wetlands has been focused on the study of three types: coastal wetlands (La Albufera de Valencia) and inland wetlands: temporary (Laguna de El Hito) and permanent (Laguna del Cañizar). Through he use of MERIS sensor images, it has been possible to study morphometric parameters, quality water and marsh vegetation. Some limitations of the use of these images were also identified.

Keywords: *remote sensing, wetlands, water quality, MERIS.*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los humedales, su función, y su importancia en ciclo vital del agua ha promovido el creciente interés por su conservación y protección. (RAMSAR, 2006).

La aplicación de la teledetección en estudios de cuerpos de agua ha identificado la necesidad de disponer de un sensor con bandas espectrales estrechas y centradas en las longitudes de ondas apropiadas, con periodicidad alta y una adecuada resolución espacial, el sensor MERIS que ha sido diseñado para estudios oceanográficos reúne casi todas estas características (Domínguez et al., 2010).

El objetivo del presente estudio ha sido evaluar la utilización de imágenes MERIS en el seguimiento de humedales Mediterráneos aplicando metodologías para obtener parámetros característicos de humedales, y con los resultados determinar la capacidad del sensor. El estudio se ha aplicado en un humedal costero, (La Albufera de Valencia) y humedales continentales: temporales (Laguna de El Hito) y permanentes (Laguna de El Cañizar). En la siguiente figura se presenta la ubicación de los humedales.



Figura 1: Ubicación de los humedales objeto de estudio.

DATOS DE PARTIDA

La serie de imágenes seleccionadas para el presente estudio corresponden al periodo entre abril y diciembre del 2007. La información disponible corresponde a una serie temporal de imágenes MERIS de nivel L1b (Tabla 1).

	Imagen Fecha
PRIMAVERA	18/04/2007
	07/05/2007
	10/05/2007
	11/05/2007
	17/05/2007
	02/06/2007
	05/06/2007

	Imagen Fecha
VERANO	10/07/2007
	13/07/2007
	26/07/2007
	20/08/2007
	30/08/2007
	02/09/2007
	08/09/2007
	24/09/2007

	Imagen Fecha
OTOÑO	10/10/2007
	19/10/2007
	20/10/2007
	01/11/2007
	08/11/2007
	14/11/2007
	06/12/2007
	08/12/2007
	10/12/2007
	15/12/2007
	16/12/2007

Tabla 1: Imágenes utilizadas, con indicación de la fecha de adquisición.

La corrección atmosférica de las imágenes se ha hecho mediante la aplicación del método SCAPE-M_B2 (Domínguez et al., 2010). La corrección geométrica para un análisis multitemporal ha requerido una corrección geométrica imagen a imagen con un RMS inferior al *0,2*. El número de puntos de control ha sido superior a 30 y se ha aplicado una transformación lineal del vecino más cercano.

METODOLOGÍA

Análisis visual de las imágenes

El análisis visual de las imágenes tiene la capacidad de incorporar a la interpretación de la imagen una serie de criterios complejos, mientras que el tratamiento digital se basa, casi exclusivamente, sobre la intensidad radiométrica de cada píxel. Se pueden analizar al mismo tiempo una serie de criterios como textura, rugosidad, entorno, entre otros. (Chuvieco, 2006).

Estudio de la vegetación de humedales

El estudio de la vegetación de forma general se aborda con la utilización del índice de vegetación normalizado NDVI, con MERIS pueden calcularse hasta nueve NDVIs distintos ya que la región de infrarrojo cercano está cubierto por tres bandas: banda13(865nm), banda14(885nm) y banda 15(900nm); y el rojo visible por tres bandas: bandas6(620nm), banda7(665nm), y banda8(681.25nm). Para el realizar el seguimiento a la vegetación con el sensor MERIS, la combinación de bandas recomendada para calcular el NDVI se obtiene a partir de las bandas 8 y 13. (Fontal, 2009). Ecuación 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{B13} - \rho_{B8}}{\rho_{B13} + \rho_{B8}} \qquad (1)$$

donde:

ρ_{B13}=*banda 13;* ρ_{B8}=*banda 8*

Determinación de zonas de agua

Se ha utilizado en primera instancia la banda del infrarrojo cercano para identificar las zonas de agua. En los casos donde no ha sido posible se ha empleado el índice de vegetación NDVI prestando especial atención a los valores negativos o cercanos a cero como indicador de la presencia de agua.

Parámetros de calidad

Los algoritmos utilizados han sido los desarrollados en el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) para determinar concentraciones de pigmentos de clorofila-a y ficocianina en sitios de afloramientos o "bloom" de algas (Domínguez et al., 2008). Estos algoritmos permiten determinar el estado eutrófico y ecológico del agua, y generar mapas de la vigilancia de las cianobacterias tóxicas.

RESULTADOS

La Albufera de Valencia

El análisis visual de la imagen de La Albufera de Valencia en un falso color (R,G,B)→(13,7,5) en las distintas fechas permite observar la variación de la zona inundada. La serie de imágenes corresponde a un mismo año, pero debido a que la variación de la zona inundada es un fenómeno cíclico las imágenes se presentan de forma que se puede ilustrar visualmente esta evolución, que se comienza con una fase inicial en la cual solo aparece la lámina de agua de la laguna, una segunda fase cuando se observa cómo va aumentando la lamina de agua que corresponde a las zonas inundadas de la zona de los cultivos del arroz, y por último se vuelve a su estado inicial cuya zona inundada corresponde sólo a la masa de agua de la laguna. También se observa en las imágenes de mayo y junio la interferencia de las nubes, razón por la cual no se utilizaran estas imágenes en el presente estudio.

La posibilidad de identificar las zonas de agua en el humedal permite realizar el seguimiento de la zona de agua a lo largo del periodo. Los resultados obtenidos y representados en una gráfica son acorde al funcionamiento hídrico de La Albufera, que comprende un periodo de reducción de los niveles mediante la operación de las tres golas hacia los meses de enero a octubre y un periodo de llenado inmediatamente posterior (Peralta, 2007).

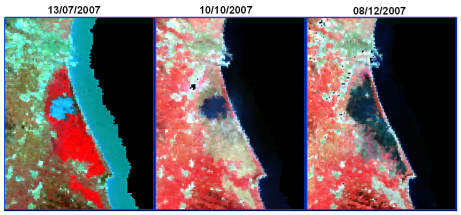


Figura 2: Seguimiento posible a través de una combinación en falso color (R,G,B)→(13,7,5).

El valor de la superficie de la laguna con imágenes MERIS es superior al real debido al tamaño del píxel de MERIS, al ser de 300m promedia las cubiertas existentes en una superficie de 300m*300m = 90000m^2 por lo que se asigna los valores de agua a píxeles que tienen un gran porcentaje de esta cubierta, no es posible discriminar las islas existentes en la laguna, lo mismo sucede con las superficies de zonas inundadas el sensor no es capaz de separar las zonas de tierra que separan las diversas zonas cultivadas. Al comparar la superficie de la lámina de la laguna con la superficie real error que se comete corresponde a 8 píxeles, demasiado para un estudio de catastral, pero aceptable para determinar las dimensiones de la lámina de agua y realizar un seguimiento medioambiental.

Las imágenes permiten realizar la cartografía temática de concentración de clorofila-a y ficocianina. El análisis de la cartografía temática ha permitido analizar la evolución espacio temporal de todo el lago, además permite visualizar la evolución temporal de aquellos lugares de interés, y crear perfiles de evolución tanto del pigmento de clorofila-a como de ficocianina acordes a los presentados en otros estudios (Domínguez et al. 2010). En la figura 3 se presenta el seguimiento temporal del parámetro de clorofila-a en un punto de interés cuyo variación en el tiempo guarda relación con la preparación de los campos para la siembra del arroz (aumento de nutrientes provenientes de la fertilización).

Laguna de El Hito

La visualización de las imágenes en falso color sugiere que el seguimiento posible que se puede hacer al humedal es el seguimiento a la vegetación ya que en la Laguna de El Hito el agua o la zona húmeda aparecen durante una temporada muy corta. Se ha aplicado el índice de vegetación y filtros de paso para las imágenes en las fechas en las que el vigor vegetal es más alto (imágenes de abril y julio) con el fin de diferenciar la zona de agua de la zona de vegetación. Pese a lo anterior no ha sido posible determinar de forma digital de la laguna. Sin embargo los rasgos morfológicos encontrados mediante el análisis visual permiten proponer una delimitación del humedal y de la laguna.

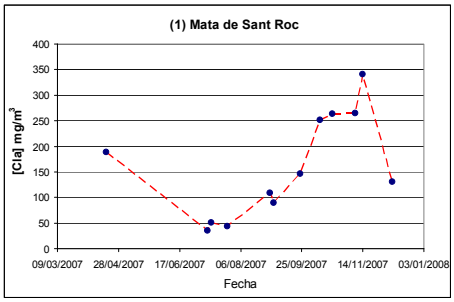


Figura 3: Seguimiento temporal de [Cla] de la Laguna de la Albufera mediante imagen MERIS en punto de interés Mata de Sant Roc.

Laguna del Cañizar

El análisis visual en la zona de estudio de la laguna del Cañizar, mediante un falso color (R,G,B)→(B13,B7,B5) no permite identificar una lamina de agua con claridad mediante imágenes MERIS, aunque en la imagen del mes de mayo se observan píxeles de baja reflectividad que podrían corresponder a la lámina de agua, sin embargo se identifica con claridad vegetación con mayor o menor vigor vegetal.

El seguimiento del estado fenomenológico de la vegetación del humedal del Cañizar se ha realizado mediante el análisis del vigor vegetal de la vegetación a partir del NDVI, como indicador indirecto de la existencia y abundancia de agua. La superficie observada mediante imágenes MERIS, de forma indirecta a partir del NDVI, de la laguna del Cañizar índica que la laguna es permanente con una superficie que varía entre un mínimo de 2103 ha y máximo de 2259 ha, en función de las aportaciones de agua recibidas en la laguna y disminución de su superficie en periodos de sequía que pueden corresponder a periodos anuales o interanuales. En un periodo natural de sequía se puede determinar que la laguna vuelve a disponer de valores máximos de superficie de agua entre los meses de abril y septiembre. Respecto a la superficie de la laguna, estimada en unos 1130 ha por métodos topográficos (Rubio, 2009), en este trabajo se ha calculado entre unas 2103 ha y 2260 ha. Este error cometido, se debe al tamaño del píxel de 300m, y a que se ha empleado el NDVI en la determinación de la superficie de la laguna.

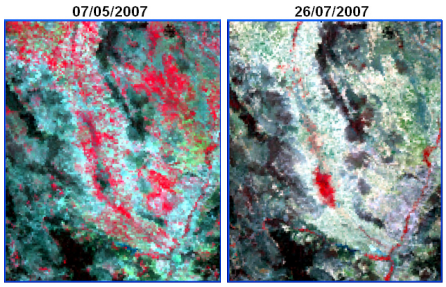


Figura 4: Seguimiento del estado fenomenológico de la vegetación del humedal del Cañizar como indicador indirecto de la existencia y abundancia de agua.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la viabilidad de utilizar imágenes del sensor MERIS para realizar un seguimiento de humedales mediterráneos, también la aplicabilidad de diversas técnicas de teledetección para poderlo realizar.

La utilización de imágenes MERIS permite realizar el seguimiento sobre lámina de agua, parámetros de calidad, y comprobaciones sobre el ciclo y funcionamiento hídrico de los humedales, además de plantear propuestas de delimitación de humedales acorde al análisis visual de las imágenes. Las limitaciones identificadas han sido:1) Tamaño del humedal. Es necesario que el humedal tenga unas dimensiones mínimas de zona de agua. En principio parece recomendable que la zona de agua del humedal sea superior a 100 ha, de esta forma la zona de agua podría ser identificado por alrededor de 10 píxeles. 2) Forma. Cuanto más alargadas son más difíciles de identificar y se presentarán con píxeles aislados, mientras que lagunas de formas redondeadas son las mejores para identificar, ya que los píxeles se encontrarán adyacentes unos a otros, tal como sucede con la laguna de La Albufera de Valencia. 3) Presencia de vegetación. La densidad de la vegetación no permite que se pueda determinar la lámina de agua subyacente con una resolución espacial como la de MERIS, este es el factor limitante que no permite identificar la lámina de agua bajo la vegetación en la Laguna del Cañizar.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO SALINERO, EMILIO, 2006. *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel. Barcelona.

DOMÍNGUEZ-GÓMEZ J.A., ARANCÓN C., ALONSO C., ALONSO A., DE HOYOS C., QUESADA A, 2010. *Seguimiento del estado ecológico de las aguas continentales superficiales españolas mediante imágenes MERIS*. Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740.. 34: 29-35.

DOMÍNGUEZ-GÓMEZ J.A.; ALONSO, C.; ALONSO, A., 2008. *Remote Sensing as a Basic Toolbox for Monitoring Water Quality Parameters and as a System of Surveillance of Cyanobacterial Harmful Algae Blooms (SCyanoHABs)*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International. Issue Date: 7-11 July 2008. On page(s): IV - 886 - IV – 889

FONTAL RODRÍGUEZ A, 2009. *La Teledetección como herramienta en el ciclo integral del agua*. I Jornadas de Ingeniería del Agua. Madrid.

PERALTA VERGARA, ESTEFANÍA, 2007. *Seguimiento de la evolución temporal de la Perellonada y calidad de las aguas de La Albufera de Valencia*. Memoria del Proyecto Fin de Carrera de la Licenciatura de Ciencias Ambientales realizado en el Centro de Estudios Hidrográficos y Departamento de Biología de la Universidad Autónoma de Madrid. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Departamento de Biología.

RAMSAR, 2006- Secretaría de la Convención. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales. (Ramsar, Irán, 1971), 4a. edición. Gland (Suiza).

RUBIO D. JOSÉ CARLOS, 2009. *Laguna del Cañizar. Pasado, presente y futuro del mayor humedal de agua dulce de Aragón.*

Uso de fotografías aéreas digitales para evaluar la inestabilidad de laderas en Angangueo (México)

José López García

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000. Ciudad Universidad. Coyoacán. C.P. 04510 (México, DF). Correo electrónico: jlopez@servidor.unam.mx

RESUMEN

El análisis comparativo para identificar los cambios de cobertura forestal, mediante fotografías aéreas digitales permitió realizar la evaluación de la afectación y determinar las posibles causas del desastre de Angangueo, México. Se elaboraron dos mosaicos ortorectificados de 2009 y 2010 para la restitución de la fotointerpretación. Se realizó trabajo de campo para estimar la velocidad de infiltración con un Permeámetro Guelp y la profundidad y resistencia de las capas superficiales con un penetrómetro PANDA. Se obtuvo una permeabilidad del suelo de alta a muy alta y la resistencia del terreno de baja a muy baja. Los flujos de tierra fueron ocasionados por las intensas lluvias y la deforestación que ha sufrido esta zona.

Palabras clave: Inestabilidad de laderas, flujos de lodo, fotografía digital, Angangueo.

ABSTRACT

The comparative analysis employed to identify changes in forest cover, through digital aerial photography, allowed for affectation assessment and to determine possible causes of the disaster in Angangueo, Mexico. Two orthorectified mosaics 2009 and 2010 were elaborated for photo interpretation. Fieldwork was conducted to estimate the infiltration rate with a Guelph permeameter and the depth and strength of the soil surface layers with a PANDA penetrometer. We found soil permeability from high to very high and ground resistance from low to very low. Land flows were caused by heavy rains and the deforestation, this area has suffered.

Keywords: *Unstable slopes, mud flows, digital photography, Angangueo.*

INTRODUCCIÓN

A principios de febrero de 2010 ocurrieron lluvias extraordinarias que provocaron el desbordamiento de ríos y deslizamientos de laderas, en cinco municipios del estado de Michoacán: Angangueo, Ocampo, Tiquicheo de Nicolás Romero, Tuxpan y Tuzantla, en los cuales se produjeron numerosas muertes y daños económicos importantes**.**

Los cinco municipios afectados pertenecen a la cuenca del sistema Cutzamala el cual vierte sus aguas al río Balsas y éste al océano Pacífico.

Con base en la información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010) entre los días 2 al 5 de febrero del 2010 se presentó un amplio sistema de tormentas de baja presión provenientes del océano Pacífico, el cual ocasionó lluvias intensas en el centro-occidente de México, afectando particularmente al estado de Michoacán, especialmente la cuenca del sistema Cutzamala.

Por otra parte, febrero es un mes donde se tiene escasa humedad para dicha entidad; sin embargo, la lluvia registrada en 24 h en el mes de febrero en la estación El Bosque, a 27 km de Angangueo, rompió record, ya que el máximo se había registrado el 7 de febrero de 1978 con 14.5 mm, y el máximo mensual era de 25.9 mm. para la estación Chincua, a 16 km de Angangueo, se acumuló una precipitación de 125 mm en enero y 360 mm en febrero del 2010 (SMN, 2010).

Se obtuvieron imágenes diarias de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, http://smn.conagua.gob.mx) y del Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Se aprecia la secuencia de imágenes de la marcha de la precipitación de enero 31 al 5 de febrero de 2010 (Figura 1).

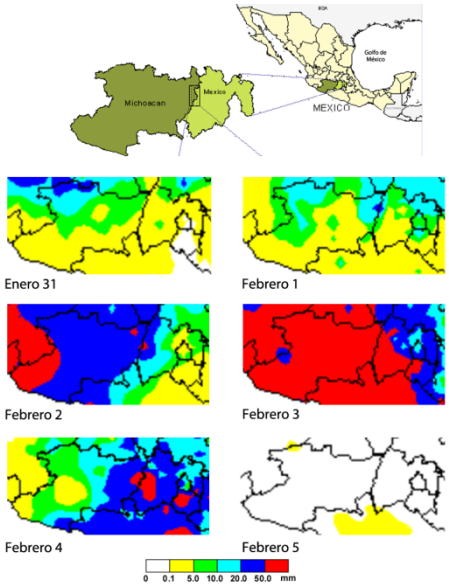


Figura 1: Secuencia de imágenes diarias de precipitación del centro de México.

En febrero de 2010 se presentaron eventos meteorológicos extraordinarios del 2 al 5 de febrero de 2010 (Figura 2). Estuvieron acompañados de granizo que cubrió las montañas de blanco.

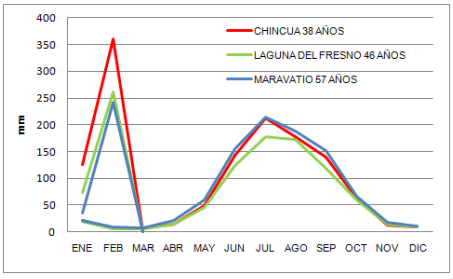


Figura 2: Precipitación promedio de tres estaciones cercanas a la cuenca de Angangueo.

El relieve está formado por montañas denudatorias de laderas muy inducidas por la red torrencial. Se localiza en un nivel altitudinal entre los 2600 y los 3600 metros. Corresponde a laderas compuestas por andesitas y basaltos terciarios que presentan un modelamiento intenso debido a procesos erosivos de arroyada superficial y concentrada, en las que predominan pendientes de entre 15 y 35°. Es posible encontrar dentro del sistema montañoso lomeríos, colinas, piedemonte, valles y planicies.

Los suelos se desarrollan a partir de materiales volcánicos terciarios y cuaternarios en un relieve accidentado ha dado origen a suelos con propiedades ándicas, que se caracterizan por ser delgados, poco desarrollados y con alta capacidad de retención de humedad están representados por Andosol húmico y ócrico, en zonas con materiales de arrastre o piroclástico han permitido la formación de Cambisol dístrico y lúvico y en materiales mas antiguos ha permitido el desarrollo de Luvisol órtico.

METODOLOGÍA

La cuenca del río Puerco se localiza dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en donde se han realizado anualmente levantamientos aéreos desde 1999 a la fecha, motivo por el cual se cuenta con un acervo de fotografías aéreas digitales, que permitió realizar un análisis comparativo 2009-2010, para determinar los cambios de cobertura y afectaciones en esta zona.

Para el análisis se contó con fotografías aéreas pancromáticas de 1971, fotografías aéreas digitales tomadas entre el 16 y 18 de febrero de 2009 y para determinar las afectaciones se realizó un levantamiento aéreo el 13 y 14 de abril de 2010.

La fotografías de 1971 se ortorectificaron y fueron interpretadas para determinar la densidad de cobertura forestal y compararla con las fotografías aéreas digitales de 2009, para determinar si en ese periodo se registraron cambios de cobertura forestal.

Se realizó un mosaico ortocorregido con las fotografías de 2009 y otro con las fotografías de 2010, cubriendo la cuenca del río Puerco. Se realizó un análisis comparativo para determinar las afectaciones por el evento de febrero de 2010.

El análisis comparativo permitió discriminar entre los flujos de tierra y escombros confinados a cauces fluviales y las áreas afectadas por efecto de vientos fuertes.

Se realizó un recorrido de campo para constatar los cambios determinados por fotointerpretación, medición se secciones de los cauces afectados. Se tomaron muestras de suelos para su análisis en laboratorio de textura, densidad real, densidad aparente y materia orgánica.

Se hicieron algunas pruebas in situ para determinar la velocidad de infiltración del agua, con un permeámetro Guelp, así como la profun-

didad y resistencia de las capas superficiales con un penetrómetro PANDA en las inmediaciones de algunos flujos.

RESULTADOS

Análisis multitemporal 1971-2009

Para 1971 la cuenca estaba cubierta con 45,63% de bosques densos, 8.88% de bosques poco densos, que pasaron en 2009 a 34.42% bosques densos y 29.83% bosques poco densos, la deforestación aumento 2.2%, las áreas agrícolas se redujeron un 13.5%. y las superficie del poblado aumentó 1.6% (Tabla 1).

Cambio (ha)	Bosque denso	Bosque poco denso	Deforestado	Agrícola	Poblado	Total 1971
Bosque denso	**780**	344	98	62	4	1287
Bosque poco denso	93	**92**	42	23	0	251
Deforestado	69	78	**136**	35	1	303
Agrícola	33	373	0	**432**	39	894
Poblado	0	0	0	0	**88**	88
Total 2009	971	842	365	512	132	**2822**

Tabla 1: Matriz de confusión entre 1971 y 2009.

La zona sufrió una afectación en 316 ha de bosques conservados, pero a la vez se dio una marcada recuperación forestal de 591 ha, de las cuales 316 ha fueron por degradación forestal, y otro tanto por recuperación forestal, así como una disminución de las actividades agrícolas en 381 ha, pero las afectaciones históricas ya habían hecho su efecto sobre el paisaje.

Análisis temporal 2009-2010

Prácticamente todos los procesos de remoción en masa que ocurrieron en el pueblo de Angangueo los primeros días de febrero del año 2010, presentan características de flujos, lo que tiene por consecuencia que el material removido avanzara grandes distancias, desde decenas hasta miles de metros, originando daños a lo largo del recorrido, en la zona de desprendimiento del material y en la de acumulación.

Las mayores afectaciones en esta cuenca en el periodo 2009-2010 fueron por flujos de tierra confinados a cauces 46 ha y en menor medida por vientos con 34 ha. En la cabecera uno de los flujo tiene amplitud entre 34 y 107 metros en 450 metros de longitud, en un rango altitudinal de 3220-3340 m, con 15° de pendiente (Figura 3).

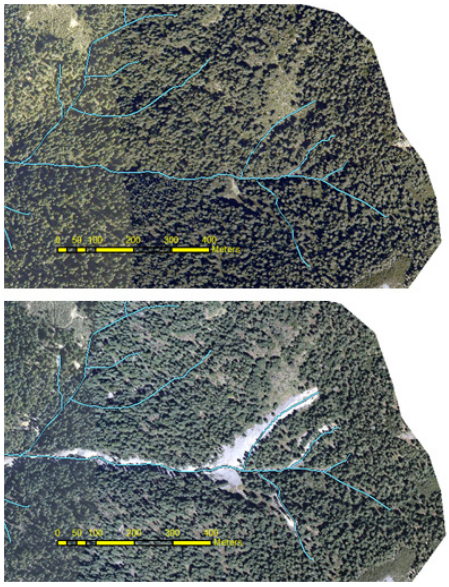


Figura 3: Comparación aerofotográfica 2009-2010 de la porción oriental de la cuenca del río Puerco, a escasos 200 metros de la divisoria de aguas.

Los reportes oficiales del gobierno del estado de Michoacán (La Jornada, 10 de febrero de 2010 http://lajornada.unam.mx), mencionan 5 municipios afectados (Angangueo, Ocampo, Tiquicheo de Nicolás Romero, Tuxpan y Tuzantla), cuantificando daños de 35 muertos, 50 desaparecidos, 52 hospitalizados, 20000 damnificados, 4000 viviendas dañadas, 280 colapsadas; daños a más de 700 kilómetros de vías rurales, 6 puentes colapsados; la pérdida del 95% de los cultivos de la región (40 mil ha.) perjudicando a más de 3000 agricultores.

Dentro de esta cuenca se localiza uno de los distritos mineros mas antiguos, en 1550 comienza la producción a gran escala y en 1792 se crea el pueblo de Angangueo, al llegar gente a trabajar a las minas. Por lo que la deforestación y degradación forestal histórica ha dejado una cuenca con alto grado de alteración (Figura 4).

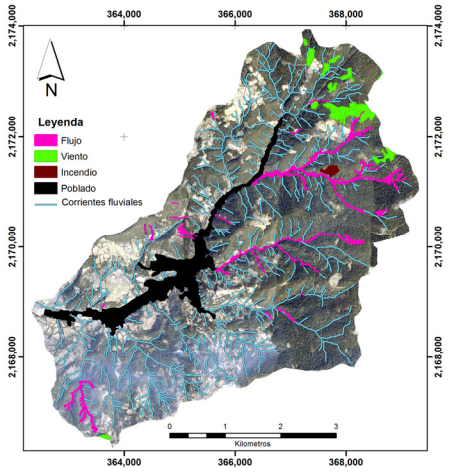


Figura 4: Mosaico de la cuenca del río Puerco con los flujos y zonas afectadas por vientos en febrero de 2010.

La mitad de la cuenca se encuentra con bosque y la otra mitad esta deforestada o con uso agrícola lo que establece una susceptibilidad a la inestabilidad inducida por la deforestación. No hay afectaciones por tala, por lo que, en febrero de 2010 los cambios son debidos a los deslizamientos y árboles derribados por viento.

Análisis de muestras de suelos

El análisis de suelos determinó la presencia de suelos con propiedades ándicas, con una densidad aparente menor de 1, una densidad real entre 1.7 y 2.2, una porosidad de 53 a 73% y contenido de materia orgánica de 1 a 4%.

Las texturas dominantes son de partículas finas entre 80 y 90 % de limos y arcillas, lo que siguiere una alta capacidad de hidratación propia de estos materiales volcánicos (Tabla 2).

Altitud	% Arena	% Limo	% Arcilla
3300	13.49	58.8	27.7
2800	18.32	52.2	29.5
2600	9.72	62.0	28.3

Tabla 2: Análisis textural por el método de la pipeta.

Los diferentes aspectos observados en campo que permiten reafirmar la hipótesis de la influencia de la precipitación acumulada y continua, la poca profundidad de los materiales hasta la roca dura (en promedio tres metros), baja compactación del material (reflejada en la resistencia del suelo -inferior a los 6 MPa-), velocidad de infiltración, de poco más de 5 cm/hr en promedio, considerada moderadamente rápida de acuerdo con la escala de Grassi (1976) y un contacto litológico bien definido entre el material superficial poco compactado, con características limosas, y un estrato rocoso de tipo andesítico.

CONCLUSIONES

El uso de fotografías aéreas digitales de alta resolución espacial, de 2009 y 2010 permitió la identificación precisa de los diferentes flujos de tierra y afectaciones por viento sucedidas en febrero de 2010 en esta cuenca.

Las actividades mineras que históricamente se han realizado en esta región, creó el escenario para que un evento meteorológico extraordinario compuesto por 4 días de lluvia continua, fuertes vientos, la caída de granizo, asociado a un relieve muy accidentado, suelos con propiedades ándicas, originaron la formación de flujos de tierra, escombros sobre los cauces naturales de esta cuenca afectando a los poblados.

BIBLIOGRAFÍA

BROWER, L.P., G. CASTILLEJA., A. PERALTA., J. LÓPEZ-GARCÍA., L. BOJÓRQUEZ-TAPIA., S. DÍAZ., D. MARMOLEJO and M. MISSRIE. 2002. *Quantitative Changes in Forest Quality in a Principal Overwintering Area of the Monarch Butterfly in México, 1971-1999*. Conservation Biology. 2: 346-359.

LÓPEZ-GARCÍA J. 2009. *Análisis de cambio en la cobertura forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: 2003 – 2006*. Capítulo 7 (195-210). En Conceptos de Geomática y estudios de caso en México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 365p.

SMN, 2010. Boletines generales de meteorología durante la semana del 1 al 5 de febrero de 2010.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto PAPIIT IN303010 "Pago por servicios ambientales y multifuncionalidad en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca" el apoyo para la realización de este estudio.

Obtención de información espectral a diversas escalas para la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación Mediterránea en el contexto del cambio global (BIOSPEC)

M. P. Martín[1], A. Carrara[2], M. P. Echavarría[1], J. Gajardo[3], M. Gallardo[1], C. Gimeno[2], I. Gómez[1], R. González[4], F. J. Martínez[1], G. Mendiguren[1], H. Nieto[5], J. Pacheco-Labrador[1], F. Pérez-Cabello[6], D. Riaño[1], J. Salas[3] y L. Vilar[7]

[1] Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), C/ Albasanz 26-28, 28037 (Madrid, España). Correo electrónico: mpilar.martin@cchs.csic.es

[2] Fundación Centro de Estudios Avanzados del Mediterráneo (CEAM)

[3] Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá (UAH)

[4] Dep. Medio Ambiente, Instituto Nacional de Investigación de Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA)

[5] Department of Geography and Geology, University of Copenhagen (KU)

[6] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza (Unizar)

[7] Joint Research Centre of de European Commission, IES

RESUMEN

Diversos estudios han demostrado el potencial de las imágenes de satélite para obtener estimaciones globales de diferentes parámetros de la vegetación como el índice de área foliar (LAI), contenido de humedad, contenido de nitrógeno, fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (FPAR), etc. La apropiada caracterización/estimación de estos parámetros es clave para entender el intercambio de flujos en la biosfera a escala global. Sin embargo, estas estimaciones no han sido globalmente validadas de una manera consistente, especialmente en ecosistemas complejos como el Mediterráneo. El proyecto Biospec (http://www.lineas.cchs.csic.es/biospec) trata de contribuir al desarrollo de la red global para la validación y mejora de productos de teledetección estableciendo relaciones entre diversas variables biofísicas (LAI, contenido de agua, nitrógeno, etc.) medidas en terreno, su variabilidad espacio temporal y las mediciones espectrales realizadas a diversas escalas (de la hoja al dosel).

Palabras clave: variables biofísicas, multi-escala, espectro-radiometría de campo, MODIS

ABSTRACT

Several studies have demonstrated the potential of satellite imagery for global estimations of vegetation parameters such as leaf area index (LAI), moisture and nitrogen content, fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR), etc. The proper characterization/estimation of these parameters is a key point to understand the exchange of fluxes in the biosphere at a global scale. However, these estimates have not been validated globally in a consistent manner, especially in complex ecosystems such as the Mediterranean. Biospec (http://www.lineas.cchs.csic.es/biospec) contributes to the development of a global network for the validation and improvement of remote sensing products by establishing relationships between ground measurements of biophysical variables (LAI, water content, nitrogen, etc..) and spectral measurements made at various scales (from leaf to the canopy).

Keywords: *biophysical variables, multi-scale, field spectroscopy, MODIS*

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la teledetección ha contribuido con éxito a la estimación de variables biofísicas de la cubierta vegetal. Los enfoques empíricos basados en el uso de índices de vegetación (IV) han proporcionado un nivel satisfactorio de precisión para la estimación de parámetros como el índice de área foliar (LAI), el contenido de humedad, clorofila, biomasa, etc. Sin embargo, estos métodos requieren un conjunto de datos de referencia exhaustivos y fiables

para calibrar y validar las fórmulas empíricas en diferentes ecosistemas, especialmente para aplicaciones a escala regional y global. Nuevos enfoques sobre la base de la inversión de modelos de transferencia radiativa (RTM), con mayor capacidad de generalización, representan una oportunidad, a la vez que un reto, en la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación. El proyecto Biospec aborda estos aspectos mediante la aplicación de una metodología "scaling-up" a la estimación de parámetros de la vegetación especialmente relevantes para estudios globales, regionales y locales que tratan de analizar complejos procesos como los modelos de flujos de carbono, claves para comprender el ciclo global del carbono y su relación con el cambio climático.

La estimación de los flujos de carbono a escala global se basa actualmente en la medición directa de los flujos de CO_2 y H_2O mediante la técnica micrometeorológica "eddy covariance" (EC) empleada por la red internacional FLUXNET (http://daac.ornl.gov/FLUXNET/fluxnet.shtml). Sin embargo, esta técnica presenta algunas limitaciones importantes relacionadas fundamentalmente con la escasa representatividad espacial de las mediciones. La teledetección ofrece una oportunidad única para salvar estas limitaciones gracias a su visión sinóptica a escalas temporales y espaciales adecuadas para estimar variables directamente relacionadas con los flujos de carbono.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en una dehesa pastoreada situada al noreste de la provincia de Cáceres. El relieve es poco accidentado con una altitud media de 258 m. El clima local se caracteriza por una temperatura media anual de 16,7 ºC y una precipitación media anual de 572 mm. La dehesa se compone de un estrato herbáceo de corta talla y un estrato arbóreo poco denso (20%) donde la encina (*Quercus ilex* L.) es la especie predominante. En la zona opera, desde el año 2004, una torre de medición de flujos de carbono perteneciente a la red FLUXNET y gestionada por la Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM).

METODOLOGÍA

En el proyecto Biospec se ha planteado una metodología basada en la integración multiescala de diversas fuentes de información de tal forma que se combinan conjuntos de datos obtenidos desde plataformas aéreas (sensores AHS y CASI) y espaciales (Landsat TM y TERRA/AQUA-MODIS), así como datos de radiometría de campo. Estos datos se integran con la información adquirida en el terreno sobre determinados parámetros biofísicos de la vegetación, variables meteorológicas, así como medidas de CO_2 y H_20 y flujos a escala de ecosistema (figura 1).



Figura 1: Esquema metodológico del proyecto.

En este trabajo nos centraremos en la descripción de los principales aspectos metodológicos relativos a la toma de datos de variables biofísicas en terreno y de los resultados preliminares obtenidos al relacionarlos con datos espectrales procedentes de espectro-radiometría de campo e imágenes MODIS.

Mediciones de campo de variables biofísicas

Con el propósito de recoger la potencial variabilidad espacio/temporal de las variables biofísicas objeto de estudio (LAI y otros parámetros estructurales, pigmentos, biomasa, contenido de humedad, nitrógeno y carbono) se planteó un exhaustivo muestreo compuesto por 12 parcelas de 25x25 m localizadas de forma aleatoria en un radio de 500 m desde el punto donde se encuentra situada la torre de medición de flujos (*eddy covariance*). En cada parcela se recogieron 3 muestras de la cubierta herbácea (localizadas aleatoriamente) y se muestreó una encina. Por lo que respecta a la componente temporal, las parcelas fueron muestreadas quincenalmente haciendo coincidir el muestreo con el paso del satélite Landsat 5.

Una vez diseñado el muestreo espacial se procedió a elaborar los protocolos y plantillas de recogida de información que describen de forma detallada el equipamiento necesario y procesos a seguir en campo y laboratorio para la recogida, conservación y procesamiento de las muestras. Las medidas de contenido de humedad, biomasa

y LAI del pasto se realizaron mediante muestreo destructivo y posterior proceso en laboratorio (escaneado y secado de las muestras). En las encinas, el contenido de humedad, nitrógeno y carbono fueron medidos mediante muestreo destructivo y posterior procesamiento en laboratorio, mientras que las mediciones de clorofila fueron realizadas *in situ* mediante el medidor Minolta Spad 502 y calibradas posteriormente en laboratorio. El LAI y los parámetros estructurales fueron medidos utilizando medidas no destructivas mediante fotos hemisféricas, hipsómetro y flexómetro.

Los trabajos de campo comenzaron en marzo de 2009 y tienen previsto finalizar en mayo de 2011. Se han realizado un total de 13 muestreos en 2009 y 17 en 2010. Algunos de los muestreos planificados no pudieron llevarse a cabo debido a las condiciones meteorológicas, especialmente en los meses de enero, febrero y marzo de 2010 que fueron excepcionalmente lluviosos. Se realizaron diversos análisis estadísticos (diferencia de medias, análisis de correlación, análisis de cluster) para estudiar la variabilidad espacio/temporal de los parámetros analizados.

Mediciones de radiometría de campo

Se han realizado mediciones de radiometría sobre el terreno utilizando un espectro-radiómetro ASD Fieldspec 3 que recoge información entre 400 y 2500 nanómetros. Como en el caso de las variables biofísicas, se elaboraron protocolos que describían de forma detallada la preparación y configuración de los equipos y los procedimientos a seguir en el campo para la toma de datos. Dado que no existen protocolos estandarizados en este ámbito, se elaboraron de forma específica para el proyecto de acuerdo a la experiencia adquirida en proyectos anteriores y las referencias bibliográficas. Se realizaron dos tipos de mediciones: a nivel de hoja en el caso de las encinas utilizando el accesorio "leaf clip" que permite realizar estas mediciones *in situ* y con condiciones controladas de iluminación; y a nivel de dosel en el caso de las herbáceas. En las encinas se midieron 12 hojas por árbol que se obtuvieron del tercio superior e inferior de la copa y de las exposiciones N y S de la misma. Para las herbáceas no fue posible realizar mediciones a nivel de hoja debido al pequeño tamaño de las mismas y la gran diversidad de especies presentes en la zona. En este caso se optó por realizar 2 transectos por parcela (en las parcelas de nivel 1), uno NW-SE y otro NE-SW. Estas mediciones se realizaron en una franja horaria de ± 2 horas respecto al mediodía solar utilizando una óptica de 25 º y a una distancia aproximada de 1 metro sobre el dosel. Por cada transecto se tomaron una media de 10 mediciones por lo que se contó finalmente con unos 20 espectros por parcela. Las mediciones de radiometría se realizaron quincenalmente en las parcelas de nivel 1 siempre que las condiciones meteorológicas (nubosidad) lo permitieron.

Los datos de radiometría han sido organizados en librerías espectrales para posteriores análisis. Se han calculado diversos índices espectrales, tanto a partir de la información hiperespectral que proporciona el espectro-radiómetro ASD como a partir de las bandas simuladas de los sensores TM y MODIS.

Imágenes MODIS

Se han adquirido imágenes diarias y compuestos multitemporales de los satélites TERRA y AQUA para los años 2009 y 2010. Además de las imágenes de reflectividad con y sin corrección del BRDF (MOD09A1, MYD09A1 y MCD3A4) y temperatura de superficie (MOD11A2 y MYD11A2), se han adquirido una serie de productos derivados: índices de vegetación (MOD13Q1 y MYD13Q1), LAI, fPAR (MOD15A2 y MYD15A2) y GPP (MOD17A2 y MYD17A2). Las imágenes se han obtenido de forma gratuita a través del servidor de la NASA DAAC (http://daac.ornl.gov/MODIS/). Para todos los productos se definió una ventana de 11x11 km centrada en la localización de la torre de medición de flujos. Las imágenes diarias se descargaron de forma gratuita a través del servidor WIST (https://wist.echo.nasa.gov/api/).

Se programó un script en MATLAB para extraer de forma automática el valor del píxel más próximo a la torre de medición de flujos para todas las bandas de información contenidas en los productos MODIS mencionados. Dado que las imágenes y productos analizados presentan diversas resoluciones espaciales los análisis se realizan para tamaños de píxel de 250, 500 y 1000 m. Se ha optado por utilizar el valor de un único píxel en lugar de una ventana para garantizar que el dato analizado es representativo de la zona analizada y no se incorpora ruido procedente de cubiertas vecinas (zonas agrícolas al norte del área de estudio).

A partir de las bandas de reflectividad de los productos MODIS se han calculado un total de 58 índices espectrales: 42 índices normalizados utilizando las posibles combinaciones de las 7 bandas reflectivas, así como otros 16 índices espectrales utilizados en la literatura para el estudio de la vegetación.

RESULTADOS

Por el momento se ha trabajado fundamentalmente en el desarrollo de modelos empíricos que han permitido establecer relaciones consistentes entre los índices espectrales (calculados a partir de los datos de espectro-radiometría y derivados de las imágenes MODIS) y las variables relacionadas con el contenido en humedad de la vegetación medidas en campo (Mendiguren et al. 2010) y el contenido en nitrógeno de las hojas de encina (Pacheco et al. 2011). En el primer caso, el muestreo diseñado permitió calcular tres variables relacionadas con el contenido de humedad de la vegetación: Fuel Moisture Content (FMC), Equivalent Water Thickness (EWT) y Canopy Water Content (CWC) por lo que hemos podido comparar su evolución espacio/temporal y determinar su grado de ajuste con las medidas espectrales tomadas en campo y a partir de imágenes de satélite. La variable CWC muestra siempre las correlaciones más altas con los índices espectrales, tanto los obtenidos a partir de radiometría de campo como los calculados a partir de imágenes MODIS. Las correlaciones son más altas con el CWC estimado con datos de espectros de campo que con imágenes MODIS (r^2 = 0,85 y 0,79 respectivamente). Pensamos que se trata de un efecto de escala relacionado con la posible influencia de la cobertura arbórea en el píxel MODIS.

Los modelos empíricos se han aplicado igualmente a la estimación de nitrógeno foliar de las encinas a partir de la información hiperespectral registrada en campo con el espectro-radiómetro ASD (Pacheco et al. 2011). El análisis de los datos de nitrógeno demuestra que, una vez brotadas y elongadas las hojas de encina, la evolución temporal de contenidos de nitrógeno a lo largo del período vegetativo presentan una tendencia creciente, con una estabilización en verano (González et al. 2011).

Se han establecido regresiones lineales entre los datos de nitrógeno foliar de las encinas obtenidos en 2009 y 2010 y a) cada una de las 2100 bandas espectrales medidas en terreno, b) 66 índices espectrales propuestos en la literatura para estimar contenidos de clorofila y nitrógeno a partir de teledetección y c) índices espectrales normalizados obtenidos a partir de todas las posibles combinaciones de 210 bandas (1 de cada 10 de las 2100 que originalmente proporciona el espectro-radiómetro ASD). Los resultados muestran que las bandas mejor correlacionadas con el contenido en nitrógeno se sitúan en la región conocida como "*red edge*" en torno a 730 nanómetros. Se han obtenido coeficientes de correlación (r^2) de 0,78 en el caso de los índices espectrales y de 0,68 en el caso de las bandas individuales con valores de RMSE inferiores al 10 %.

BIBLIOGRAFÍA

MENDIGUREN, G., MARTÍN, M.P., RIAÑO, D., MARTINEZ, F.J., PACHECO, J. y VILAR L., *Multi-scale estimation of vegetation and soil moisture in a Mediterranean wooded grassland (dehesa) using optical sensors*. 2010. Proc. Third Int. Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Torrent, España. Ed. Sobrino, J.A., pag. 483-485.

GONZÁLEZ, R., PACHECO, J., MARTÍNEZ, F.J. y MARTÍN, M.P. 2011. *Annual variation of foliar nitrogen and chlorophyll contents in mature Holm oak trees as basis for the estimation of canopy nitrogen in a Mediterranean wooded grassland ecosystem.* Proc. Nitrogen and global change: key findings–future challenges. Edimburgo, Escocia.

PACHECO, J., GONZÁLEZ, M.R., RIAÑO, D. y MARTÍN M.P. 2011. *Nitrogen estimation in a Mediterranean wooded grassland ecosystem from hyperspectral normalized ratio indexes*. Proc. EARSEL 7th imaging spectroscopy workshop. Edimburgo, Escocia.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto BIOSPEC (CGL2008-02301/ CLI) ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. La Fundación CEAM ha sido financiada parcialmente por la Generalitat Valenciana, Bancaja y el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 (GRACCIE).

MAPRI, una base de datos para corregir imágenes remotas y análisis de series de tiempo sobre Europa

C. Mattar, J.A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz, Y. Julien, G. Sòria, B. Franch, V. Hidalgo, R. Oltra-Carrió y J. Cuenca.

Unidad de Cambio Global. Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI), Parque científico de la Universidad de Valencia, C/ Catedrático Agustín Escardino nº9, E-46980, Paterna (Valencia – España) Correo electrónico: cristian.mattar@uv.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta la base de datos MAPRI (*Modified Atmospheric Profile from Reanalysis information*). MAPRI es una compilación de datos medios mensuales, diarios y horarios de temperatura de aire, humedad relativa, altura geopotencial y humedad específica entregados por el proyecto reanalysis realizado por el *National Center of Environmental Prediction* (NCEP) y *National Center of Environmental Research* (NCAR). MAPRI permite mejorar la resolución espacial y vertical del reanalysis de 2,5º x 2,5º y 17 niveles verticales de la atmósfera a 0,5º x 0,5º y 34 niveles verticales respectivamente. Con este fin, se han implementado diversos métodos de interpolación vertical y espacial sobre Europa (25º - 70º N; 30ºW - 50ºE). La base de datos MAPRI se ha comparado con datos procedentes de radiosondeos, productos del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) y otras bases de datos (Barsi et al., 2004; ERA interim). Los resultados muestran que MAPRI presenta características útiles para el análisis de tendencias de variables atmosféricas y para la corrección de imágenes remotas provenientes de los sensores térmicos más utilizados, un ejemplo de aplicación se realizó sobre el sensor Landsat-5 TM.

Palabras clave: MAPRI, Reanalysis, perfiles atmosféricos.

ABSTRACT

The Modified Atmospheric Profiles from Reanalysis Information (MAPRI) dataset is presented this paper. MAPRI data base is a compilation of monthly, daily and four times daily geopotential height, air temperature, relative humidity and specific humidity data derived from the National Center of Environmental Prediction (NCEP) and National Center of Environmental Research (NCAR) Reanalysis project. Interpolation methods were applied to improve the original spatial and vertical resolution, generating an atmospheric profile of 34 vertical levels distributed on a spatial grid of 0.5º x 0.5º over Europe (25º - 70º N; 30º W – 50º E). To test the reliability of MAPRI data set, in-situ radiosonde records, MODIS products, atmospheric radiative transfer data (Barsi et al. 2004) and ERA-Interim data have been used. Good results were obtained for thermal remote sensing applications, for instance Landsat -5 TM and atmospheric trends analysis.

Keywords: *MAPRI, Reanalysis, atmospheric profiles.*

INTRODUCCIÓN

Los gases atmosféricos como el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono generan una importante absorción de energía en la banda térmica (8.0 – 14.0 μm). Esta absorción reduce la energía emitida por la superficie que es posteriormente detectada por los sensores a bordo de plataformas satelitales. Este efecto debe corregirse con el fin de estimar la temperatura de la superficie sin efectos atmosféricos (Becker and Li, 1995). Para corregir este efecto es imprescindible utilizar datos auxiliares como perfiles verticales de la atmósfera y modelos de transferencia radiativa. Los perfiles verticales de la atmosfera pueden ser obtenidos a través de un radiosondeo, los cuales no siempre se encuentran disponibles a escala local, regional o incluso continental. Otra forma de obtener un perfil atmosférico es a través de información climática y meteorológica a escala global, como es el caso del proyecto *National Center of Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center of Atmospheric Research* (NCAR) Reanalysis project (Kalnay et al., 1996). Este proyecto reanalysis (NCEP-1) entrega información de

diversas variables climáticas y meteorológicas a escala global (2.5 x 2.5º) desde 1948 hasta la actualidad. La resolución espacial de este proyecto sumado a otras limitaciones, condicionan el uso de estos datos para la corrección de imágenes remotas en el infrarrojo térmico.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es presentar una nueva y útil base de datos denominada MAPRI (*Modified Atmospheric Profile derived from Reanalysis Information*) la cual presenta una serie de perfiles atmosféricos de 34 niveles distribuidos sobre Europa (25º - 70º N; 30º W – 50º E) a una resolución espacial de 0.5º x 0.5º.

BASE DE DATOS

Datos Reanalysis NCEP-1

La generación de MAPRI se fundamenta en la obtención de una serie de variables entregadas por el NCEP-1 tales como temperatura del aire (*Ta*), altura geopotencial (*Hgt*), humedad relativa (*RH*) y humedad específica (*Q*) las cuales están distribuidas en 17 niveles atmosféricos tales como : 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 para todas las variables y 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa para *Hgt* y *Ta* a una resolución espacial de 2.5 x 2.5º. La escala temporal de estos datos corresponde a un nivel medio mensual entre 1948 y 2008, diario y sub-diario entre 1970 y 2008 para el área de estudio de Europa (25º - 70º N; 30º W – 50º E).

Métodos de Interpolación

Para mejorar la resolución espacial y temporal de los datos originales NCEP-1, dos métodos de interpolación fueron aplicados. Un método consistió en el aumento espacial espacial de la dimensión de la malla utilizado para mejorar la resolución de 2.5 a 0.5º y otro para aumentar los niveles mandatarios atmosféricos de 17 a 34 niveles. Estos métodos generaron más de 14000 perfiles atmosféricos por cada unidad temporal en toda el área de estudio.

Aplicaciones de MAPRI

Las aplicaciones de MAPRI están orientadas al cálculo de la transferencia radiativa de una atmósfera en particular y al estudio de la variación temporal de variables climáticas sensibles como la temperatura del aire, el vapor de agua, entre otras.

Para la estimación de valores necesarios para la corrección de imágenes atmosféricas, los perfiles verticales de MAPRI fueron convertidos a formato MODTRAN (Berk et al., 1999). Este modelo de transferencia radiativa fue utilizado para estimar la $L\downarrow$, τ y $L\uparrow$. Estos parámetros son relevantes para la siguiente ecuación de transferencia radiativa:

$$L_s = (\varepsilon B(T_{LST}) + (1-\varepsilon)L^{\downarrow})\tau + L^{\uparrow} \qquad (1)$$

donde *Ls* es la radiancia emitida por la superficie W m^{-2} str^{-1} m^{-2}), τ es la transmisividad de la atmósfera, B es la Ley de Planck, T_{LST} es la Temperatura de la superficie (K), $L\downarrow$ es la radiancia descendente (W m^{-2} str^{-1} m^{-2}), ε es la emisividad de la superficie y $L\uparrow$ = radiancia descendente (W m^{-2} str^{-1} m^{-2}).

Estas variables son dependientes de la longitud de onda y de las concentraciones de vapor de agua, dióxido de carbono u ozono. Para los niveles superiores de 300 hPa, los valores de *HR* fueron completados con datos provenientes de atmósferas standard según el la localización del perfil. Finalmente, debido al importante consumo de recursos informáticos que se necesita para realizar el cálculo de la transferencia radiativa de los más de 14000 radiosondeos, se utilizó un computador cluster llamado Multivac correspondiente al Servicio de Cálculo de la Universidad de Valencia (http://www.uv.es/siuv/cas/zcalculo/calculouv/des_multivac.wiki). Finalmente, los resultados de la simulación radiativa fueron comparados con los datos entregados por Barsi et al (2004) y con los resultados de la simulación de transferencia radiativa utilizando MODTRAN 4.0 y datos de radiosondeos (figura 1).

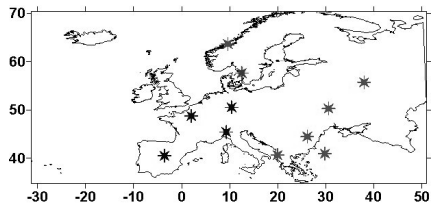


Figura 1: Estaciones de radiosondeos localizadas en el área de estudio.

Por otra parte, se muestra otra aplicación de MAPRI a variables climáticas sensibles como temperatura del aire y del punto de rocío. Para esto, se compilaron una serie de perfiles atmosféricos a nivel diario correspondientes a las coordenadas descritas en el apartado anterior com-

parándose la *Ta* y la temperatura del punto de roció (*Tdr*) con los datos provenientes del producto MOD07. La temperatura del punto de roció se calculó utilizando la siguiente ecuación.

$$Tdr = ((112 + 0.9(Ta)) * (RH + 0.01)\,\hat{}\,1/8)) - 112 + 0.1(Ta)) \quad \textbf{(2)}$$

Donde *Ta* y *RH* son la temperatura del aire y la humedad relativa respectivamente.

RESULTADOS

La figura 2 muestra los resultados de las simulaciones de L↓, τ y L↑ para la aplicación térmica del sensor Landsat-TM sobre toda el área de estudio. Se muestra el promedio mensual entre 1968 y 1996 para Enero y Julio, sobre los cuales se distinguen los valores mínimos y máximos asociados a formaciones orográficas como las zonas altas y el efecto de la línea de costa sobre el continente africano. Un efecto similar se aprecia para el periodo de invierno aunque la transmisividad es similar en casi toda el área de estudio.

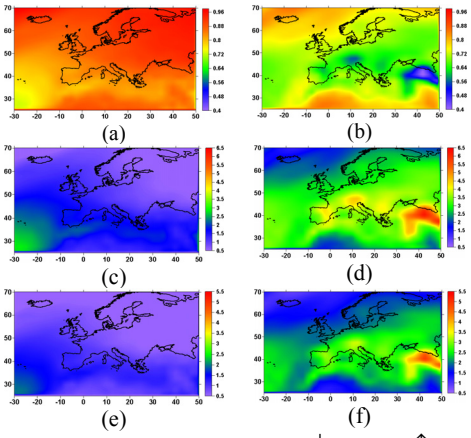


Figura 2: Valores de τ (a,b), L↓(c,d) y L↑(e,f) para los perfiles medios mensuales de Enero (izquierda) y Julio (Derecha.) entre 1968 y 1996- Se muestran los valores para la banda térmica del sensor Landsat-5 TM (10.45 – 12.42 µm).

A partir de estos datos, se calculó la temperatura de brillo a nivel del sensor utilizando la ecuación (1). Esta simulación se utilizó variando la temperatura de la superficie y la emisividad de manera lineal entre 0.94 hasta 1.0 (paso de 0.1) y 290 hasta 308 K (paso de 2 K).

La temperatura de brillo simulada por MAPRI fue comparada con la temperatura simulada con radiosondeos y con la base de datos Barsi et al. (2004) (Figura 3). Los resultados muestran una relación lineal entre la temperatura simulada por MAPRI y por los radiosondeos, siendo el RMSE promedio no superior a 1K. Para el mes de Julio los resultados muestran un RMSE promedio menor a 1 K para las dos comparaciones (MAPRI radiosonde y MAPRI datos Barsi).

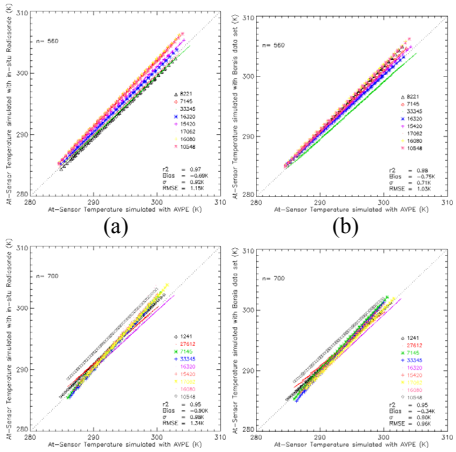


Figura 3: Comparación entre MAPRI y radiosondeos para Enero y Julio (a, c) respectivamente. Idem para comparación MAPRI y datos Barsi (b, d).

En relación a la comparación entre MAPRI y los productos MODIS la figura 4 muestra la serie temporal de *Hgt, Ta* y *Tdr* para dos coordenadas de Madrid y la Península escandinava entre el 2003 y el 2008.

Para los valores de *Ta*, existe un patrón común entre MAPRI y los productos MOD07. Es impotante destacar que los productos MOD07 están a una resolución de 5 km y MAPRI a 60 km (aprox). Para la *Tdr*, los valores no son del todo comparables a los 300 hPa debido a la fuerte variabilidad que posee la humedad relativa en ese nivel atmosférico. Sin embargo, para los primeros niveles, los valores muestran menos diferencias. La tabla 1 resume las comparaciones para todas las alturas analizadas.

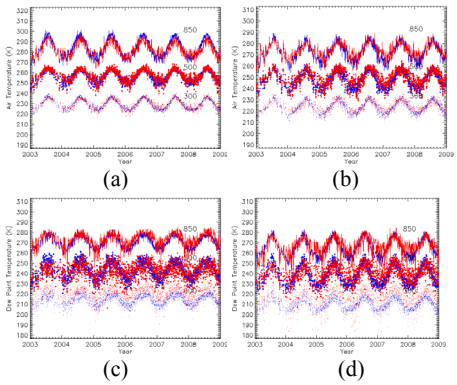


Figura 4: Valores de *Ta* (a,b) y *Tdr* (c,d) para el punto localizado sobre Madrid (izquierda) y sobre la península escandinava (derecha). Se muestra la comparación a 3 niveles atmosféricos, 850, 500 y 300 hPa.

En promedio, las comparaciones entre MAPRI y los productos MOD07 presentan RMSE que varía entre 2 a 4 K. Un caso opuesto presentan las comparaciones para *Tdr* donde a mayores alturas se posible apreciar valores de RMSE superiores a los 7 K.

		Madrid 40,0º N; 3,5º W			**Scandinavia 60,0º N; 14,0º E**		
Variable	***hPa***	**Bias**	**σ**	**RMSE**	**Bias**	**σ**	**RMSE**
Ta	850	1.50	4.09	4.36	-1.01	4.27	4.39
	700	0.51	3.46	3.50	-0.68	4.27	4.33
	500	-0.73	2.93	3.02	-1.20	4.47	4.63
	400	-0.64	2.87	2.94	-1.10	4.26	4.40
	300	-0.11	2.36	2.36	-0.68	3.18	3.25
Tdr	850	-2.47	4.54	5.17	-0.80	6.53	6.58
	700	-0.17	6.50	6.50	0.48	7.71	7.73
	500	1.32	7.73	7.84	-0.84	7.65	7.70
	400	-0.15	7.21	7.21	-2.06	7.18	7.47
	300	-5.23	5.78	7.79	-3.60	10.47	11.07

Table 1: Comparación entre MAPRI y MOD07 para la Temperatura del aire (*Ta*) y del punto de rocío(*Tdr*).

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado a la base de datos MAPRI, la cual es una óptima transformación de los productos provenientes de NCEP-1. Todas las variables presentes en MAPRI se encuentran disponibles en formato MODTRAN, con el fin de ser utilizadas para la corrección de imágenes térmicas en teledetección. El total de la base de datos MAPRI ocupa 2 terabytes y pronto estarán disponibles las plataformas informáticas para su eventual descarga. Finalmente, otras aplicaciones de MAPRI se presentan en Jiménez-Muñoz et al. (2010).

BIBLIOGRAFÍA

BARSI, J., et al. 2004. *An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earth-Sensing Instrument.* IGARSS. 21-25 July 2003, Centre de Congres Pierre Baudis, Toulouse, France.

BECKER, F. & LI, Z-L. 1995. *Surface Temperature and Emissivity at various scales: Definition, Measurement and Related Problems.* Remote Sensing Reviews, 12, 225 – 253.

BERK, A. et al. 1999. *MODTRAN4 user's manual*. Hanscom AFB, MA: Air Force Research Laboratory.

KALNAY, E. et al. 1996. *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437-470.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., et al. 2010. *Atmospheric correction of optical imagey from MODIS and Reanalysis atmospheric products.* Rem. Sens. Environment, 144, 2195 – 2210.

MCMILLIN LM, et al. 2007. *Radiosonde humidity corrections and potential atmospheric infrared sounder moisture accuracy.* Journal of Geophysical Research 112:D13S90.

SIMMONS, A.J., et al. 2007. *Era interim. New ECMWF reanalysis product from 1989 onwards*. ECMWF Newsl., 110, 25 – 35.

Seemann, S.W., et al. 2006. *MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document*, version 6, October 25.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unión Europea (proyectos CEOP-AEGIS y WATCH) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto EODIX) por la ayuda financiera así como al proyecto NCEP NCAR reanalysis por la entrega de datos necesarios para este trabajo.

Caracterización geomorfológica mediante imágenes ASTER de la Cuenca de El Bierzo y zonas adyacentes (León, España)

A. Mínguez[1], E. García-Meléndez[2], Á. Martín-Serrano[3] y S. Martín-Alfageme[4]

[1] IGME. Área de Cartografía Geocientífica. Parque científico, Av. Real 1, 24006, León a.minguez@igme.es

[2] Universidad de León. Área de Geodinámica Externa. Facultad de CC. Ambientales. Campus de Vegazana s/n 24071 egarm@unileon.es

[3] IGME. Área de Cartografía Geocientífica. C/ La Calera 1, 28760, Tres Cantos, Madrid. am.serrano@igme.es

[4] IGME. Área de Investigación en Cambio Global. C/ La Calera 1, 28760, Tres Cantos, Madrid. s.martin@igme.es

RESUMEN

En este trabajo se realiza la caracterización geomorfológica de un área de estudio situada en la zona occidental de la provincia de León, correspondiente a los valles de los ríos Sil, Boeza y Noceda, mediante la identificación de Unidades Homogéneas de Terreno (UHT) empleando un método de Cartografía Geomorfológica Aplicada. A través del tratamiento digital de imágenes ASTER y su análisis utilizando técnicas de fotointerpretación mediante observación estereoscópica, se delimitan y cartografían unidades sintéticas que representan cierta homogeneidad en cuanto a parámetros físicos de base geológica- geomorfológica a escala 1:100.000. Para el estudio en tres dimensiones de las imágenes se emplean las bandas 3N y 3B, ambas con una longitud de onda en el infrarrojo cercano. Para completar el análisis se utilizaron una composición en color RGB de las bandas 3N, 1, 2, y el mapa de pendientes derivado de un modelo digital de elevación. Como resultado se obtiene una delimitación en dieciocho unidades distribuidas en dos grandes grupos, las pertenecientes a la Cuenca de El Bierzo, en las que predominan entre otros los procesos activos de tipo fluvial; y las localizadas en los relieves circundantes a la cuenca, donde los procesos que predominan son entre otros de origen gravitacional.

Palabras clave: ASTER, análisis visual, geomorfología, Unidades Homogéneas de Terreno, Modelo de Elevación Digital.

ABSTRACT

Using an Applied Geomorphological Mapping method by the identification of Terrain Mapping Units (TMU), the geomorphologic characterization of a study area located in the west of the León province (corresponding to the Sil, Boeza and Noceda river valleys) is analysed. These units, defined by physical parameters (geological-geomorphological), were differentiated based on ASTER imagery, through digital image processing and visual analysis by means of photointerpretation techniques in stereoscopic vision. Aimed to the tree-dimensional study were used 3N and 3B ASTER bands, both with a wavelength in the near infrared. To complete the analysis a RGB composition of 3N, 1, 2 bands and a sloped derived map from a Digital Elevation Model were used. As a result eighteen terrain units were differentiated in the study area. Those belonging to the Bierzo basin are dominated by fluvial-type active processes among others. Units to the surrounding reliefs are characterized, among others, by gravitational processes.

Keywords: *ASTER, visual analysis, geomorphology, Terrain Mapping Units, Digital Elevation Model.*

INTRODUCCIÓN

Tener un buen conocimiento del terreno, y más concretamente de la geomorfología de un área, es fundamental para futuras acciones en ella, ya sean de planificación espacial del territorio, susceptibilidad de riesgos naturales o intervenciones ambientales de distinto tipo. Este conocimiento del terreno se puede adquirir por diferentes métodos, pudiendo así subdividir una zona de estudio en distintas unidades cartográficas. En este trabajo se utiliza un método de Cartografía Geomorfológica Aplicada que tiene como objetivo la división del terreno en una serie

de unidades sintéticas cuyas características principales son "homogéneas" en términos de relieve, litología, usos del suelo, etc. a una escala de trabajo de 1:100.000.

Estos estudios cartográficos se han venido realizando desde hace tiempo, sin embargo, hasta ahora, muy pocos trabajos han empleado imágenes ASTER en visión estereoscópica (Mínguez et al., 2010). En este trabajo, la base para la delimitación de las unidades geomorfológicas es el empleo de dichas imágenes en visión tridimensional, junto con comprobaciones de trabajo de campo y la generación de una base de datos espaciales y de atributos en un SIG, utilizando datos derivados del modelo digital de elevación SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para cuantificar características de las unidades cartográficas diferenciadas como pendientes, rangos de altitud, etc.

Zona de estudio

La zona de estudio (figura 1) se encuentra localizada en la parte occidental de la provincia de León (comarca de El Bierzo).

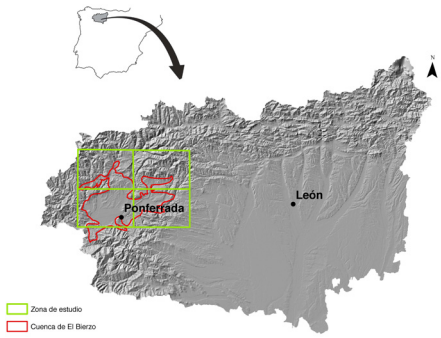


Figura 1: Mapa de situación de la zona de estudio, mostrando la división en hojas 1:50.000.

La Cuenca sedimentaria neógeno-cuaternaria de El Bierzo está formada por materiales sedimentarios continentales que alcanzan los centenares de metros de potencia (Barba et al., 1994). Durante el Cuaternario se generaron una serie de abanicos aluviales que representan la colmatación de la cuenca y, a partir de ellos, y en relación con el encajamiento de la red de drenaje del río Sil se han ido formando sistemas de terrazas en distintas fases. En cuanto a los relieves circundantes, pertenecen a la macroestructura de las Montañas Galaico-Leonesas, producto de una tectónica de bloques desarrollada sobre materiales paleozoicos (Martín-Serrano, 1994) del Macizo Ibérico, concretamente de la Zona Asturoccidental-Leonesa formada por rocas siliciclásticas que han sufrido metamorfismo (Marcos, 2004). Estos relieves son la Sierra de Ancares y la de Gistredo en el norte, los Montes Galaico-leoneses en el este, los Montes Aquilianos en el sur y en el oeste la Sierra del Caurel.

MÉTODO

Para la caracterización geomorfológica mediante delimitación de Unidades Homogéneas de Terreno se han utilizado parámetros físicos de base geológico-geomorfológicos como son las formas del relieve, litología, procesos geomorfológicos activos, morfogénesis, drenaje, etc. (García-Meléndez, 1997). Los datos se han generado mediante el análisis de imágenes ASTER y trabajo de campo. Este método de clasificación del terreno con Unidades Homogéneas de Terreno es abierto, independiente de la escala, y acepta alternativas definidas por el usuario haciéndolo así aplicable universalmente (Meijerink, 1988).

Imágenes ASTER

Para la delimitación de las unidades se han utilizado imágenes ASTER analizadas e interpretadas estereoscópicamente correspon-dientes a cuatro escenas de los años 2000, 2003 y 2004. El sensor ASTER es el único sensor de alta resolución espacial incluido en el satélite TERRA (Chuvieco, 2006) y cuenta con 15 canales, desde el visible e infrarrojo cercano al infrarrojo térmico pasando por el infrarrojo de onda corta.

En el presente trabajo se emplearon las cuatro bandas pertenecientes al visible e infrarrojo cercano, las cuales poseen una resolución espacial de 15 metros: la banda 1, correspondiente al color verde y con una longitud de onda de 0,556 nm, la banda 2, la del color rojo, con una longitud de onda de 0,661 nm y las bandas 3N y 3B, pertenecientes al infrarrojo cercano y con una longitud de onda de 0,804 nm. De estas cuatro bandas, las 3N y 3B permiten ser vistas en tres dimensiones y fueron las empleadas para la interpretación y delimitación de las unidades cartográficas mediante técnicas de análisis visual de imágenes (fotointerpretación).

El primer paso fue el recorte del área aproximada de interés en cada escena, ya que la zona de estudio era más pequeña que el área total que abarcaban las imágenes. Previamente a la interpretación de las imágenes ASTER se realizaron

una serie de operaciones de tratamiento digital de imágenes con el *software* ENVI 4.3, como son el ajuste del contraste, composiciones en color y la georreferenciación de las mismas, creando un mosaico con las zonas de las escenas que abarcan el área de estudio.

Para georreferenciar se tomaron puntos de control (GCP) en función de la extensión de cada escena, equitativamente por toda la zona de estudio para obtener un resultado óptimo. El método elegido para el remuestreo fue el bilinear, por considerar que la imagen obtenida era más nítida que con otros métodos. Una vez georreferenciadas todas las escenas, se unieron en mosaico que abarcara toda la zona de estudio. A continuación, este mosaico fue recortado en las cuatro hojas del MTN50 y se imprimieron en papel fotográfico a escala 1:100.000.

Las zonas necesarias de la banda 3B de cada escena, fueron impresas en papel fotográfico a escala 1:100.000, tras haberlas sometido a operaciones de realce del contraste.

Además, se utilizó una composición en color RGB de las bandas 3N, 1 y 2 como apoyo al análisis, pudiendo detectar detalles que en modo pancromático eran difíciles de diferenciar. Esta composición permite ver el infrarrojo en el canal del rojo, de forma que la vegetación más vigorosa se percibe en este color, mientras que los materiales con reflectividad menor se observan en colores próximos al negro. En la figura 2 se observa la imagen correspondiente al sector noroeste de la zona de estudio, en donde se aprecia que las zonas de rojo más intenso corresponden a los fondos de valle, debido al vigor de la vegetación en estas zonas donde el terreno llano está ocupado principalmente por cultivos de regadío y vegetación de ribera; en color rojo oscuro se advierte la vegetación con menos vigor que la anterior, zona montañosa en donde los cultivos presentan una menor importancia y donde los usos forestales son los predominantes, junto con matorrales, monte bajo y prados naturales. Finalmente se muestran en color verde claro y tonos azulados las áreas con poca densidad de vegetación, ya sean terrenos al descubierto o improductivos que se corresponden con canchales, derrubios de ladera, bloques de roca caídos o modificaciones antrópicas, principalmente en esta zona explotaciones mineras y todas las infraestructuras que las acompañan, o campos de cultivo en estado de barbecho. Además, se observan pequeños polígonos negros que representan masas de agua, tales como lagos y lagunas o embalses.

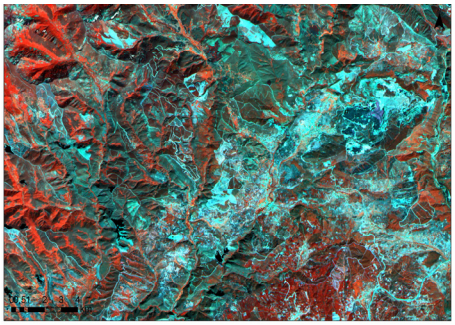


Figura 2: Imagen ASTER correspondiente a la hoja del MTN50 nº 126 del municipio de Vega de Espinareda. Composición de color RGB de las bandas 3N,1,2.

Mapas derivados

Mediante el empleo del modelo digital de elevación SRTM (resolución espacial de 90 metros) se obtuvo el mapa temático de pendientes (figura 3), a través del software ArcGIS 9.2, utilizado para complementar la fotointerpretación de las unidades de terreno.

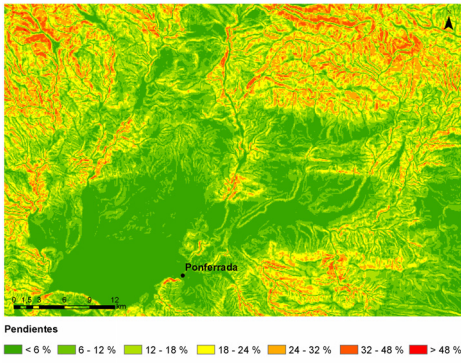


Figura 3: Mapa de pendientes derivado del MDT

Una vez delimitadas las unidades se procedió a su digitalización e inclusión en un SIG (ArcGIS 9.2), creando además una base de datos asociada a la información cartográfica, con los atributos descriptivos de cada una de ellas.

UNIDADES HOMOGÉNEAS DE TERRENO

Como resultado del análisis de las imágenes y del resto de datos disponibles se genera un mapa de unidades homogéneas y una tabla de atributos de cada una de ellas.

Las unidades delimitadas se dividen en dos grandes grupos según sus características geomorfológicas. Las pertenecientes a la cuenca neó-

geno-cuaternaria de El Bierzo son cinco de origen fluvial y denudacional, cuyas litologías están formadas por arenas, gravas, limos y arcillas principalmente. Los procesos activos que se encuentran en ellas están directamente relacionados con la dinámica fluvial, como erosión lateral de los cauces, procesos de inundación-sedimentación, meandros abandonados inundables estacionalmente y generación de abanicos aluviales. También destacan diversos procesos antrópicos como restos de actividad minera y de extracción de áridos en llanuras aluviales.

En los relieves circundantes a la cuenca de El Bierzo, se han cartografiado trece unidades cuya geomorfología está condicionada por las características litológicas, principalmente areniscas, pizarras, cuarcitas, además de micasquistos y granitos. Estas rocas condicionan distintos tipos de drenaje, con densidades de drenaje generalmente altas a la escala de observación. Las laderas están caracterizadas por unas pendientes de moderadas a altas. Los procesos geomorfológicos más comunes son de tipo gravitacional, como caídas de bloques, generación de canchales y derrubios de ladera, deslizamientos, etc. También aparecen procesos erosivos relacionados con la escorrentía superficial, ligados al encajamiento de la red fluvial y al desmantelamiento de las litologías menos competentes, procesos que se agravan en los montes donde se han practicado cortafuegos y pistas forestales sin mantenimiento. En cuanto a los procesos antrópicos, existen numerosas explotaciones mineras con acumulaciones de residuos en escombreras cuyos taludes presentan procesos de movimientos gravitacionales.

CONCLUSIONES

El método aplicado mediante el análisis de imágenes ASTER ha servido para la delimitación de determinadas Unidades Homogéneas de Terreno a escala 1:100.000, cinco en la cuenca de El Bierzo y trece en los relieves adyacentes. Se ha realizado un estudio geomorfológico sintético aplicable a estudios más detallados de tipo, tanto científico y analítico de las formas del relieve como de tipo aplicado para estudios de susceptibilidad de riesgos geológicos y de planificación espacial del territorio.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO SALINERO, E., 2006. *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel, Madrid, 592 pp.

GARCÍA-MELÉNDEZ, E., GOY GOY, J.L., ZAZO CARDEÑA, C., SOETERS, R. y FERRER JULIÀ, M., 1997. *Clasificación del terreno de la Cuenca de Huércal-Overa y la Sierra de las Estancias mediante un método de geomorfológica aplicada, (Almería, SE de España)*. Instituto de Estudios almerienses, ayto. de Cuevas de Almanzora, Almería, pág. 185-203.

BARBA, P., HEREDIA, N., RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L.R. y SUÁREZ, A. (1994): *Estratigrafía*. En: Mapa geológico de la provincia de León. Diputación de León. pág. 13-90

MARCOS, A. (2004): *Zona Asturoccidental-Leonesa*. En: Geología de España (J.A. VERA Ed.), SGE-IGME, Madrid (España). 49-68

MARTÍN-SERRANO, Á., 1994. *Macizo Hespérico septentrional.* En: Gutiérrez Elorza (Ed.), Geormorfología de España. Rueda, pág. 25-62.

MEIJERINK, A.M.J., 1988. *Data acquisition and data capture through terrain mapping units.* ITC Journal, pág. 23-44.

MÍNGUEZ, A., 2010. *Aplicación de técnicas de teledetección para la caracterización geomorfológica del sector suroccidental de la provincial de León, España*. Tecnologías de la Información Geográfica. Publicaciones de la U. de Sevilla. Sevilla 2010. Pág. 230-236

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto LE045A08 de la Junta de Castilla y León.

Trabajo financiado por el proyecto Consolider Ingenio 2006 CSD2006-41, Topo-Iberia, Geociencias en Iberia.

Cuantificación mediante teledetección de la superficie regada en las Islas Baleares en los años 2008 y 2009

S. Montesinos[1], M. Bea[1], A. Barón[2] , L. Fernández[1] y C. González[2]

[1] GEOSYS S.L. Sector Foresta, 23: locales 7-8. 28.760. Tres Cantos (Madrid). Correo electrónico: smontesinos@geosys.es

[2] Servicio de Estudios de la Dirección General de Recursos Hídricos de la Comunidad Autónoma de las Islas Baleares. C/ Gremi de Corredors, 10 (Polígon Son Rossinyol) – 07009. Palma de Mallorca.

RESUMEN

La D.G. de Recursos Hídricos de las Islas Baleares ha puesto en marcha un programa de trabajo para estudiar y valorar la evolución del regadío, con vistas a una mejor planificación y gestión de un recurso de vital importancia en las islas. La teledetección a partir de datos de alta resolución y su integración con datos complementarios a nivel de subparcela catastral ha permitido obtener información a escala de detalle. El análisis integrado de los datos de teledetección permite establecer un escenario probable de la superficie regada anual y de la demanda hídrica agrícola existente.

Palabras clave: superficies en regadío, planificación hidrológica.

ABSTRACT

Water Authority in Baleares Islands have launched a working program addressed to analyse irrigation evolution within their territory. Aim of this approach is the improvement of water use planning and management, since it is a critical resource in the area. Remote sensing and ancillary data integration has allowed to map irrigation distribution with high precision. Integrated analysis of available data has provided suitable scenarios on water consumption and irrigated areas distribution.

Keywords: *irrigated areas, water use planning.*

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En el archipiélago Balear, tanto la situación geográfica como la bondad de su clima han favorecido el desarrollo de una importante actividad turística. Este fenómeno, que ha supuesto un aumento importante de la población en las Islas, representa en la actualidad las dos terceras partes del producto interior bruto y reclama, cada vez más, una mayor demanda de agua. Otro motor importante de la economía de las Islas Baleares es la agricultura, que a su vez representa la actividad económica que más agua demanda. Concretamente, la demanda de agua para regadío supone aproximadamente un 50% de la demanda total existente.

Estos dos factores, unidos al hecho de que en las Islas Baleares los recursos hídricos superficiales son muy escasos y esporádicos, debido principalmente al reducido tamaño de las cuencas hidrográficas y a la irregularidad de las precipitaciones, determinan que más del 95% del agua utilizada proceda de acuíferos.

La entrada en vigor, el 1 de enero de 1986, de la Ley de Aguas, incorpora la importante novedad respecto a la legislación anterior, de declarar el dominio público de las aguas subterráneas. Ante esta situación, la *Junta D'Aigües de Balears* puso en marcha un programa de trabajo para estudiar y valorar la evolución del regadío, con vistas a una mejor planificación y gestión de un recurso de vital importancia para la zona. Fruto de este plan se llevaron a cabo varios estudios específicos de teledetección y se participó como usuario final en el proyecto ISLA, financiado por el IV Programa Marco de la CE (Barón, 1999).

Los datos generados durante todo este conjunto de estudios sirvieron como base para la elaboración del Plan Hidrológico de Les Illes Balears, cuya propuesta se terminó y presentó en febrero de 1999 y que fue aprobado y publicado en el BOE de 21 de abril de 2001. La posterior entrada en vigor de la Directiva Marco del agua y su transposición a la legislación nacional ha obligado a una actualización de los Planes

Hidrológicos, para lo cual ha sido necesario revisar los datos referentes a la distribución de superficies regadas.

DETERMINACIÓN DE LOS MAPAS DE CULTIVOS EN REGADÍO

La metodología se ha basado en el uso de técnicas de teledetección, si bien se han tenido presentes los condicionantes asociados a la utilización, en un contexto operativo, de datos con resolución espacial y espectral limitada.

La teledetección ha demostrado su potencial como una herramienta efectiva para delimitar superficies regadas (Montesinos et al, 1999), proporcionando una visión sinóptica sobre el territorio y proporcionando datos relacionados con varios parámetros agronómicos sensibles a la presencia de riego, así como con su evolución temporal.

Sin embargo, los resultados de una revisión reciente del estado del arte en este campo (Ozdogan et al, 2010), resultan sorprendentes. Estos autores sólo encontraron 65 publicaciones en revistas de impacto centradas en el uso de la teledetección para la cartografía del riego frente a los miles de trabajos donde se aplica esta técnica para cartografiar otros usos del suelo o analizar características de los cultivos. Este hecho se explica por la complejidad asociada al concepto de cartografía del riego, que es una práctica agrícola dinámica y variable, frente al concepto típico de cartografía de usos del suelo (Montesinos y Bea, 2008). Este matiz implica la necesidad de combinar un conocimiento técnico y metodológico con un conocimiento práctico relacionado con la cultura agrícola de cada zona.

Datos de Partida

Para obtener los mapas de superficie regada, se han adquirido y recopilado imágenes de satélite y diversos datos geográficos auxiliares. Estos datos de apoyo han comprendido delimitaciones administrativas, un modelo digital de elevaciones, ortofotografía digital, y los límites de las parcelas catastrales.

Las imágenes de alta resolución (de 10 a 60 metros de resolución espacial) se han posicionado como la alternativa más extendida para acometer estudios de cuantificación de superficies regadas en el ámbito regional (GEO, 2007), por lo que el enfoque propuesto se basa, en el uso de este tipo de datos. Las fechas más adecuadas para abarcar el análisis de áreas regadas en el archipiélago Balear deben comprender la primavera, verano y principios del otoño, se ha analizado la lista de imágenes Landsat adquiridas en el marco del Plan Nacional de Teledetección (PNT), y se han elegido aquellas que presentaban una cobertura nubosa menor. Igualmente, se han recopilado las escenas SPOT de los años 2008 y 2009 adquiridas en el PNT. Todas las imágenes han sido corregidas geométrica y radiométricamente.

Campañas de campo

Con objeto de extraer la cobertura de regadío se ha utilizado la información recopilada durante las campañas de campo efectuadas los años 2008 y 2009, con el objetivo de obtener la *verdad terreno* necesaria para poner en relación los valores digitales de reflectividad de las imágenes con las características de los cultivos existentes.

La planificación de las campañas de campo se ha basado en el desarrollo fenológico de los cultivos más representativos de la zona. El método de muestreo elegido para recoger datos significativos de la existencia y distribución de cultivos regados en el área de estudio ha sido de tipo *opinático* y ha consistido en itinerarios dentro de las zonas donde se conoce la existencia de explotaciones en regadío.

Los equipos de campo realizaron el trabajo con ordenadores portátiles equipados con un sistema integrado de SIG-GPS dinámico, especialmente diseñado para el desarrollo de este tipo de trabajos, con el apoyo de imágenes de fecha cercana a la de la realización de la correspondiente campaña y de la cartografía catastral integrada, recogiendo información en una muestra significativa de parcelas a lo largo de la totalidad del área de estudio.

Zonificación del ámbito de estudio

Se ha realizado una zonificación para cada una de las islas con el objetivo de delimitar regiones con características similares y que por tanto, presentarán una homogeneidad en cuanto a tipos de cultivos existentes, densidad de explotaciones en riego y calendario agrícola. Esta zonificación ha permitido ajustar el proceso de discriminación de riego por separado para cada una de las áreas definidas, permitiendo una mejor aplicación de la metodología de trabajo.

Los criterios de zonificación se han basado en observaciones de campo, datos previos acerca de distribución del riego, datos climáticos y de altitud y factores relacionado con la accesibilidad

a los recursos hídricos subterráneos. Como ejemplo, en la isla de Mallorca, se han definido 10 zonas, agrupadas en tres niveles (ver Figura 1)

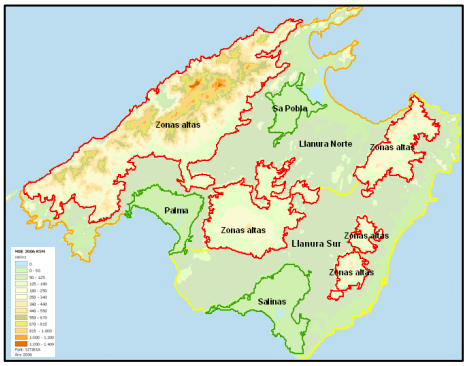


Figura 1: Zonificación para la isla de Mallorca, dividida en llanuras costeras, penillanuras y zonas altas y de media montaña.

Determinación de cultivos en regadío

La determinación del riego ha seguido aproximaciones diferentes dependiendo de la fenología y fenotipo de los cultivos, así como de la zona de trabajo.

En el caso de los leñosos, se ha comenzado por delimitar las parcelas ocupadas por este tipo de cultivos. Para ello, se han realizado procesos texturales de imagen sobre las imágenes aéreas, que han sido complementados y refrendados mediante un trabajo específico de interpretación. Los cultivos leñosos han sido divididos en dos categorías de acuerdo a su fracción de cubierta vegetal sobre el terreno: alta cubierta (cítricos, frutales, olivo en seto) y baja cubierta (olivo, almendro, viña).

En cuanto a los cultivos herbáceos, se han determinado las zonas cultivadas, distinguiendo según la época de cultivo. Las zonas cultivadas en verano son regadas en la práctica totalidad de los casos, mientras que los cultivos de primavera (predominando el cereal) y de otoño, incluyen tanto riego como secano.

En todos los casos, se ha procedido a una integración de los mapas ráster de distribución de zonas cultivadas con los límites parcelarios del catastro de rústica, lo que ha permitido aumentar, de forma considerable, la escala de trabajo.

En los casos de cultivos leñosos de alta cobertura y de herbáceos de verano, la existencia de riego se ha discriminado a partir del uso exclusivo de técnicas de teledetección, usando valores umbrales sobre índices de vegetación, ajustados a partir de la muestra de campo.

Para los restantes cultivos, la discriminación del riego ha usado datos de teledetección como base, aunque apoyándose en procesos complementarios de análisis espacial (Bea, 2011). Este análisis se ha enfocado a la caracterización previa de la probabilidad de riego en las diferentes parcelas, teniendo presentes criterios de acceso, tamaño, disponibilidad de agua, usos del suelo en años previos, densidad de riego en la zona y datos de tipo administrativo.

Finalmente, se ha llevado a cabo un proceso de clasificación supervisada, integrado en un árbol de decisión, que ha permitido asignar cada una de las parcelas en riego a uno de los elementos de la leyenda temática del mapa final de cultivos en regadío.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La superficie en regadío cuantificada dentro de las Islas Baleares es de 13.010 ha para el año 2008, y de 12.780 ha para el año 2009. Las cifras de superficie regada se han mantenido bastante estables en los dos años estudiados, tanto a nivel general como cuando se comparan a nivel de municipios o masas de agua (Tabla 1).

	Superficie regada (ha)		**Superficie en regadío** (ha)
	2008	**2009**	**2008 + 2009**
Mallorca	11.192	10.964	14.945
Menorca	1.278	1.247	1.976
Ibiza	542	568	725
Islas Baleares	13.012	12.779	17.647

Tabla 1: Distribución de superficie regada en las Islas Baleares en los años 2008 y 2009, por isla.

La leyenda temática de cultivos ha sido generada teniendo en cuenta el porte y periodo de riego de los cultivos, lo que permite asignar dotaciones medias a cultivos con necesidades de riego y consumos similares. Los datos desglosados por tipología de cultivo resultan igualmente muy similares para los dos años analizados.

	Superficie regada (ha)	
TIPO DE CULTIVO	**2008**	**2009**
Cultivo regado de Ciclo largo	1.716	1.638
Cultivo regado en Primavera	3.363	3.498
Cultivo regado en Verano	7.739	7.404
Cultivo regado en Otoño	194	239

Tabla 2: Superficie regada en las Islas Baleares en los años 2008 y 2009, por tipo de cultivo.

Los resultados han sido sometidos a controles de calidad, comparándolos con otros estudios que proporcionan datos comparables acerca de la cuantificación de superficie regada. Salvando distancias propias de los objetivos diferentes perseguidos por cada estudio, los resultados obtenidos a partir de técnicas de teledetección han demostrado ser coherentes con las restantes cifras disponibles, aportando información adicional de interés. En este sentido cabe destacar que el uso de la teledetección permite conocer la distribución espacial del riego sobre el territorio, lo cual permite la desagregación de los resultados por cualquier unidad administrativa de referencia.

Además, el mapa de superficie regada para cada año se ha calculado siguiendo una misma metodología de trabajo, lo cual proporciona una robustez a los resultados muy superior a la conseguida con métodos de tipo estadístico.

CONCLUSIONES

La teledetección espacial es, sobre todo, una *"fuente de datos"* que introduce una fuerte componente de objetividad en el análisis. El proceso de las imágenes de satélite proporciona un gran volumen de datos, que pueden ser integrados en el marco de un SIG junto con datos georreferenciados procedentes de otras fuentes para la obtención de información específica y la realización de análisis territoriales.

Algunos autores destacan en las conclusiones de sus trabajos las *"limitaciones"* de la teledetección. Sin embargo, estas limitaciones suelen ser producto de una aplicación en situaciones problemáticas, que poco o nada tienen que ver con las características que avalan estas técnicas.

El análisis integrado de los datos existentes para los últimos años en las Islas Baleares permite establecer un escenario probable sobre superficie regada anual. Este escenario sin duda se precisará en la medida que se vaya actualizando el mapa de distribución de superficies en riego en los próximos años mediante la realización de nuevos estudios, campañas de campo y la integración de información facilitada por agricultores y organismos agrarios.

BIBLIOGRAFÍA

BARÓN, A. 1999. *Experiencia sobre la evaluación de las extracciones de agua subterránea en las Islas Baleares*. En BALLESTER *et al* (eds.): *Medida y evaluación de las extracciones de aguas subterráneas*: pp. 43-54. Madrid, ITGE, 1999.

BEA, M. 2011. *Delimitación de superficies regadas mediante técnicas geográficas: aplicación en la Cuenca Alta del Guadiana*. Universidad Autónoma de Madrid. Tesis doctoral.

GEO – Group of Earth Observations 2007. *Developing a Strategy for Global Agricultural Monitoring in the Framework of Group on Earth Observations Workshop Report*. FAO, Rome, 16-18 July 2007

MONTESINOS, S. y DE STEFANO, L. 1999. *Aplicación de las técnicas de Teledetección a la gestión integral de recursos hídricos* En CASTAÑO, S. y QUINTANILLA, A. (eds.): *Teledetección: avances y aplicaciones*: pp. 127-130. Diputación de Albacete, 1999.

MONTESINOS, S y BEA, M. 2008. *Aplicaciones operativas de la Teledetección en la planificación y gestión del medio hídrico*. Revista de la Asociación Española de Teledetección, nº 29: pp. 91-100. 2008.

OZDOGAN, M., YANG, Y., ALLEZ, G. & CERVANTES, C. 2010: *Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and Challenges*. In Remote Sensing: Special issue in Global Croplands: pp 2274-2304, 2010.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Servicio de Estudios de la D.G. de Recursos Hídricos de la Comunidad Autónoma de las Islas Baleares.

Evaluación de los cambios de uso del suelo en la cuenca del Vinalopó (Alicante, España) entre 1994 y 2007 a diferentes escalas

H. Moutahir, I. Touhami y J. Bellot

Dpto. de Ecología. Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig s/n - 03690 San Vicente del Raspeig – Alicante. E-mail: hassane_moutahir@yahoo.fr

RESUMEN

Este trabajo se realizó dentro de un proyecto para la evaluación del efecto de los cambios de uso del suelo sobre el balance hídrico a escala de la cuenca del Vinalopó, provincia de Alicante. Una zona muy poblada, industrial, agrícola y de gran atracción turística, lo que supone una gran presión sobre los recursos naturales, sobre todo de agua y de suelo. Los elevados precios del suelo y de los servicios en las zonas costeras han hecho de los pueblos del Vinalopó, por su cercanía, una dirección preferida por los turistas ocasionales o los que se instalaron definitivamente en la zona.

En este estudio se utilizaron, de un lado dos imágenes Landsat TM para cartografiar los usos del suelo de una gran parte de la cuenca del Vinalopó en 1994 y 2007 y de otro lado fotos aéreas de 1997 y imágenes de Google Earth para la detección de los usos del suelo en la parte sur de la cuenca (subcuenca de Elche). En efecto la complejidad del paisaje debido a la existencia de un número muy alto de casas rurales con piscinas y varios usos en un espacio reducido ha dificultado el uso de las imágenes Landsat. La evaluación de los cambios de uso del suelo se hizo a escala de toda la cuenca del Vinalopó pero también a escala de sus cinco subcuencas. Los resultados indican que la tendencia del cambio a escala de toda la cuenca no se manifieste de la misma manera a escala de las cinco subcuencas. Hay una gran diferencia entre las subcuencas del norte y las del sur, coincidente con el gradiente desde el interior a la costa.

Palabras clave: Cartografía, Cambios de uso del suelo, Landsat, Vinalopó

ABSTRACT

This work was carried out within a project attempting to evaluate the effect of land use changes on the water balance in the Vinalopó Basin, province of Alicante. It is industrial, agricultural, touristic and densely populated area, which suppose a big pressure on natural resources, especially water and soil. Indeed, high land prices and services costs in coastal areas have made of Vinalopó villages and cities a preferred destination for the occasional tourists or those who settled permanently in the area.

In this study, on the one hand we used two Landsat TM images to map land uses in the major part of the Vinalopó basin in 1994 and in 2007 and on the other hand we used aerial photographs of 1997 and Google Earth images to detect land uses in the southern part of the basin (sub basin of Elche). In fact, the complexity of the landscape due to the existence of a very high number of rural houses with swimming pools and several uses in a limited space has hindered the use of Landsat images in that area. The land use changes were evaluated at the Vinalopó basin scale and also at its five sub-basins scale. The results show that the change trend at the whole basin scale does not manifest in the same way as at the five sub-basins scale. There is a big difference between the sub-basins located in the north and those located in the south, coinciding with the gradient from the interior to the coast.

Keywords: *Cartography, land use changes, Landsat, Vinalopó*

INTRODUCCIÒN

Los usos y coberturas del territorio han cambiado constantemente a lo largo de la historia. Sin embargo, en los últimos años estos cambios se producen de forma más acelerada, y hacia usos y coberturas menos naturales y más persistentes en el tiempo. El ritmo, magnitud y alcance espacial de esas alteraciones humanas en la superficie de la tierra no tienen precedentes (Lambin *et al.*, 1999).

A escala regional, la zona alicantina ha sufrido importantes cambios que consisten en el

abandono de los cultivos en suelos menos productivos que se colonizan luego por vegetación natural (Bonet, 2004), en la intensificación agrícola y en el crecimiento urbanístico provocado por la atracción turística de la zona (Bellot *et al*. 2007). Estos dos últimos cambios están afectando al balance hídrico ya que el territorio alicantino se encuentra en la zona semiárida del sureste español más castigada por la escasez del recurso de agua (Bellot *et al*, 2007) el factor más limitante del desarrollo socioeconómico de la región.

El conocimiento de las tendencias de cambios de uso del suelo en un territorio ayuda a tomar las mejores decisiones para alcanzar un desarrollo sostenible. Para ello se realizan estudios de evaluación de cambios de uso del suelo en periodos de tiempo pasados para predecir los cambios futuros. Sin embargo, la evaluación de esos cambios a escala de todo el territorio no refleja realmente los cambios a escalas parciales de ese territorio.

En este trabajo hemos realizado una evaluación de los cambios de uso del suelo a escala de toda la cuenca del Vinalopó y a escala de sus cinco subcuencas entre 1994 y 2007 para poner de manifiesto la variabilidad en los cambios y sus tendencias a esas dos escalas ya que eso puede tener mucha importancia a la hora de planificar un territorio.

ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Vinalopó, situada al oeste de la ciudad de Alicante, tiene una superficie de 1758 km^2 y está compuesta por cinco subcuencas (figura 1). Es una cuenca conocida por su vocación y tradición agrícola y turística donde el agua es el motor del desarrollo. Sin embargo, el río Vinalopó, el principal curso de agua, tiene un caudal muy modesto que no sobre pasa 1 m^3/s y que se pierde antes de llegar al mar. Los recursos hídricos subterráneos se encuentran sobreexplotados sobre todo que la demanda por el agua es muy grande ya que la población de la cuenca sobrepasa los 445 000 habitantes además de la agricultura y el turismo. Las precipitaciones varían entre 240 mm en el sur de la cuenca y 474 mm al norte. La temperatura media es del orden de 17ºC.

MATERIALES Y METODOS

Para la detección de los usos del suelo en la cuenca del Vinalopó se utilizaron: de un lado dos imágenes Landsat TM para cartografiar la mayor parte de los usos de la cuenca y de otro lado fotos aéreas e imágenes de Google Earth para la estimación de la superficie de los usos del suelo en la parte sur de la cuenca del Vinalopó.

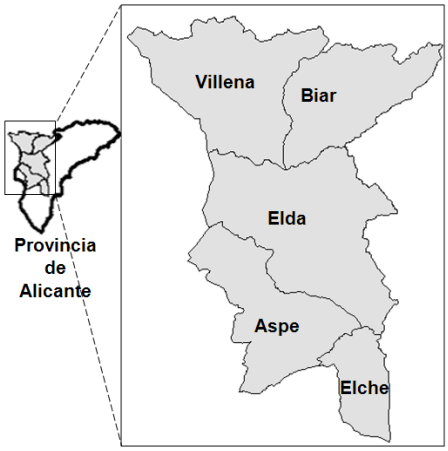


Figura 1: Ubicación de la cuenca del Vinalopó con sus cinco subcuencas

Uso de imágenes Landsat TM

Las dos imágenes Landsat TM utilizadas en este estudio, cuyas fechas del 29-06-1994 y del 03-07-2007, han sido proporcionadas por el grupo de SIG y Teledetección del Instituto de Desarrollo Regional de Albacete con las correcciones geométrica y atmosférica hechas.

La clasificación de las dos imágenes se realizó en dos etapas:

- Una primera clasificación utilizando el método de Máxima verosimilitud (Maximum Likelihood), el método de clasificación supervisada más utilizado en teledetección (Richards y Xiuping, 2006). Esta clasificación se realizó sobre imágenes compuestas por 7 nuevas bandas, 4 bandas del análisis de componentes principales y 3 índices de vegetación, creadas a partir de las 6 bandas originales de la imagen Landsat TM, después de aplicarle una mascara compuesta por el limite de la zona, el urbano y las carreteras digitalizados sobre las dos imágenes con la ayuda de capas vectoriales de la Generalitat Valencia. El uso de las 4 componentes principales se justifica por el hecho de que resumen la mayor parte de la información en solo 2 bandas en lugar de 6 y porque las componentes 3 y 4 recogen la información no común entre las 6 bandas. Y el

uso de los 3 índices de vegetación se hizo con el objetivo de resaltar la vegetación y diferenciar al máximo los distintos usos del suelo.

- Una depuración de la clasificación obtenida anteriormente utilizando el método del árbol de decisiones. En efecto, el resultado obtenido en la primera etapa no ha sido satisfactorio ya que con una comprobación visual asistida por ordenador se ha visto que las diferentes clases no están bien diferenciadas. Por ello se utilizaron las diferentes clases obtenidas anteriormente como mascaras (valor 1 dentro de la clase) aplicadas sobre las dos imágenes de las 7 nuevas bandas y se han elegido 20 puntos dentro de cada clase con la ayuda las fotos aéreas y Google Earth. Estos 20 puntos han servido para elegir unos umbrales que diferencian las distintas clases en cada banda. Estos umbrales se utilizaron luego dentro de un árbol de decisiones para asignar los pixeles mal clasificados a sus verdaderas clases.

La comprobación de la calidad de la clasificación se hizo a través las matrices de confusión y calculando el índice de Kappa. Este índice, después de la depuración de la clasificación, ha mejorado pasando de k=0.71 a k=0.88 para la clasificación del año 1994 y de k=0.86 a k=0.92 para la clasificación del año 2007. Por lo que se dio por definitiva esta clasificación.

Uso de fotos aéreas y imágenes de Google Earth

La complejidad del paisaje, la variedad de usos del suelo, la presencia de un número muy alto de viviendas rurales aisladas con piscinas complican la detección y la diferenciación de los usos del suelo en la parte sur del Vinalopó, que coincide con la subcuenca de Elche, mediante imágenes Landsat. Como alternativa se utilizaron fotos aéreas de 1997 e imágenes de Google Earth. Gracias a su alta resolución estos materiales pueden servir como herramienta efectiva y más precisa para inventariar y monitorear hábitats con el objeto de asistir a la diversidad estructural de los paisajes (Holopainen y Wang, 1998) y de hecho una detección más precisa de los usos del suelo a través de la digitalización a mano.

La digitalización manual consume mucho tiempo ya que la zona donde se utilizaron las fotos aéreas tiene una superficie de 89.5 km^2. Pero como el objetivo es estimar la superficie de los diferentes usos del suelo se ha recurrido a un muestreo al azar de 11 cuadrados de 1 km^2 de lado después de dividir la zona en dos partes homogéneas en cuanto a la distribución de los usos del suelo y de aplicar una mascara compuesta por el urbano y el palmeral (4 cuadrados en la parte norte y 7 en la parte sur distribuidos según la superficie de cada parte) (figura 2). La digitalización se hizo únicamente dentro de esos 11 cuadrados sobre las fotos aéreas y sobre las imágenes captadas desde Google Earth y georeferenciadas con respecto a las fotos aéreas.

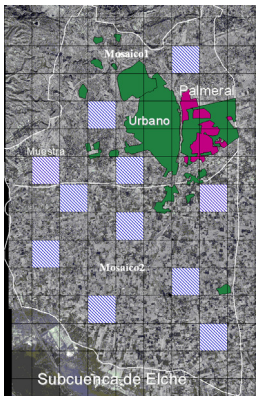


Figura 2: Elección de las muestras sobre las ortofotos de 1997 en subcuenca de Elche

RESULTADOS

La distribución de los usos del suelo en la cuenca del Vinalopó sigue un patrón espacial característico de los espacios altamente antropizados. Las zonas agrícolas y urbanizadas ocupan los fondos de los valles. La vegetación natural compuesta por bosques de pino, matorral, arbustivo y espartal ocupan las zonas altas y las laderas.

A escala de toda la cuenca del Vinalopó los cambios más destacados se resumen en el aumento de los suelos desnudos (35.8%), las zonas urbanas (25%) y los regadíos (3.5%) y el descenso de los secanos (-21.9%), los cultivos leñosos (-3.2%) y la clase bosque-matorral (-2%) (tabla 1). El aumento del urbano es debido al crecimiento de los núcleos urbanizados como es el caso en toda la zona alicantina donde algunos autores hablan de un aumento de hasta seis veces entre 1956 y 1998 (Valera *et al*., 2007). El aumento de los suelos desnudos se debe al aumento de las zonas peri-urbanas y a la aparición de algunas canteras de grandes tamaños. Mientras que el descenso del secano se debe al abandono de los cultivos en tierras menos productivas.

A escala de las subcuencas, los cambios no

tienen la misma tendencia que a escala de la cuenca total. Aquí se presentan solo los porcentajes de cambio a escala de dos subcuencas, la subcuenca de Biar en el norte y la subcuenca de Elche en el sur (tabla 1). Mientras que la superficie de la vegetación natural disminuye ligeramente a escala de toda la cuenca, a escala de la subcuenca de Biar aumenta. Y mientras los cultivos leñosos están perdiendo superficie a escala total, están ganando terreno a escala de la cuenca de Elche. Eso mismo pasa en el resto de las subcuencas donde la tendencia del cambio es relativa a la escala de evaluación de los cambios de uso del suelo (Moutahir, 2009).

	% de cambio		
	Cuenca	Subcuenca de	
Clases	Total	Biar	Elche
Bosque-matorral	-2.0	+1.6	-6.0
Arbustivo-espartal	-0.3	+8.4	-9.7
Cultivos leñosos	-3.2	-5.0	+14.3
Secano	-21.9	-17.7	-
Regadío	+3.5	-28.3	-2.7
Vegetación de ribera	+9.6	+122	+25.7
Agua	+109.7	+350	+50.3
Suelo desnudo	+35.8	+158	-8.9
Urbano	+25.0	+44.0	+21.7
Carreteras	+12.3	+15.7	+20.1
Palmeral	-4.9	-	-4.9

+ Aumento, - Disminución

Tabla 1: Comparación entre % de cambio con respecto a la superficie inicial en 19994 entre la cuenca del Vinalopó y dos de sus subcuencas

CONCLUSIÓN

La escala tiene mucha importancia a la hora de estudiar una zona y sobre todo a la hora de tomar decisión para actuar sobre un territorio.

Los cambios de uso del suelo en el Vinalopó a escala de las cinco subcuencas no siguen la misma tendencia de cambio que a escala de toda la cuenca. Eso tiene su consecuencia a la hora de evaluar el balance hídrico. A escala de la cuenca total hay un gran déficit hídrico que disminuye entre 1994 y 2007, mientras que ese déficit aumenta en la subcuenca de Elche. A escala de la subcuenca de Biar situada en el norte hay un exceso de agua por demandas moderadas y la mayor cantidad de precipitaciones recibidas en esa zona.

BIBLIOGRAFÍA

BONET, A., BELLOT, J. Y PEÑA, J. (2004). *Landscape dynamics in a semiarid Mediterranean catchment (SE Spain) en* "Recent dynamics of Mediterranean vegetation landscape", ISBN: 0–470–09369–2, Reading, UK, John Wiley & Sons (UK), 47-56

BELLOT, J., BONET, A., PEÑA, J. AND SÁNCHEZ, J.R (2007). *Human impacts on land cover and water balances in a coastal Mediterranean county*. Environmental Management , 39: 412–422.

HOLOPAINEN, M. Y WANG, G. (1998). *Accuaracy of digitized aerial photographs for assessing forest habitats at plot level. Scand.* J. For. Res. 499-508

LAMBIN EF, BAULIES X, BOCKSTAEL N, FISCHER G, KRUG T, LEEMANS, R., MORAN, E. F., RINDFUSS, R. R., SATO, Y., SKOLE, D., TURNER II, B. L., Y VOGEL, C. (1999). *Land-use and land-cover change (LUCC): Implementation strategy*. IGBP Rep. 48, IHDP Rep. 10, Stockholm/Bonn.

MOUTAHIR, H. (2009). *Consecuencias de los cambios de uso del suelo en el balance hídrico a escala regional: Cuenca del Vinalopó, Alicante, España*. Tesis de Máster. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza. 162

RICHARDS J. A., XIUPING J., (2006). *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Birkhäuser, 439 pp

VALERA L. A., AÑÓ V. C. Y SÁNCHEZ D. J. (2007). *Crecimiento urbano (1956-1998) en el entorno metropolitano de Alacant-Elx (Comunidad Valenciana)*. Boletín de la A.G.E. Nº 44 - 2007: 169-186

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de: Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (IAMZ-CIHEAM), Generalitat Valenciana (ACOMP/2010/272), Plan Nacional I+D+I (CGL2008-03649), Consolider-Ingenio(Proyecto GRACCIE, CSD2007-00067), Comisión Europea (PRACTICE Project) y agradecen también el apoyo de Planet-Action y a ESRI por la licencia de ArcGis 9.

SMOS: hacia la obtención de mapas de humedad en alta resolución

M.Piles[1, 2], A. Monerris[2, 3], M. Vall-llossera[1, 2] y A. Camps[1, 2]

[1] RSLab, Dept. de Teoria del Senyal i Comunicacions, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) & IEEC CRAE/UPC, C/Jordi Girona 1-3, Campus Nord, 08034, Barcelona (España).
Correo electrónico: maria.piles@tsc.upc.edu; merce@tsc.upc.edu; camps@tsc.upc.edu

[2] SMOS Barcelona Expert Centre (SMOS-BEC), Pg. Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003, Barcelona (España)

[3] Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Pg. Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003, Barcelona (España). Correo electrónico: monerris@icm.csic.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una nueva técnica para la mejora de resolución espacial de las estimaciones de humedad del suelo obtenidas con la misión Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), a partir del uso de datos auxiliares en el visible/infrarrojo (VIS/IR) a más alta resolución espacial. El algoritmo utiliza el llamado "triángulo universal" para relacionar parámetros en el VIS/IR, como el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) y la temperatura superficial de la Tierra (Ts), con datos de humedad del suelo de SMOS, y combina la precisión de las observaciones radiométricas de SMOS con la alta resolución espacial de los datos del VIS/IR en un producto óptimo de humedad.

En preparación para la lanzamiento de SMOS, el algoritmo se probó con medidas adquiridas con el Airborne RadIomEter at L-band (ARIEL) de la UPC en la REd de MEDición de la HUmedad del Suelo (REMEDHUS) de la Universidad de Salamanca en Zamora, España, e imágenes LANDSAT. Tras el lanzamiento de SMOS, el algoritmo se aplicó con éxito a una serie de imágenes SMOS obtenidas durante la fase de comisionado sobre la red de medición de humedad del suelo OZnet, en el Sudeste de Australia, utilizando datos MODIS. Los resultados se compararon con observaciones *in situ* de humedad del suelo, y muestran que es posible capturar la variabilidad de la humedad del suelo a escalas espaciales de 10 km y 1 km sin una degradación significativa del error cuadrático medio. En la actualidad se está evaluando la viabilidad de aplicar este algoritmo para la generación de mapas de humedad a alta resolución de la península Ibérica en casi tiempo real.

Palabras clave: teledetección, SMOS, MODIS, radiometría microondas, humedad terreno.

ABSTRACT

A downscaling algorithm to improve the spatial resolution of SMOS soil moisture estimates using higher resolution visible/infrared (VIS/IR) data is presented. The algorithm relates VIS/IR parameters such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and land surface temperature (Ts) to SMOS soil moisture using the "universal triangle" concept, and gracefully combines the high accuracy of SMOS radiometric observations with the high spatial resolution of VIS/IR data into an optimal soil moisture product.

In preparation for the SMOS launch, the algorithm was tested using acquisitions of the UPC Airborne RadIomEter at L-band (ARIEL) over the Soil Moisture Measurement Network (REMEDHUS site, Zamora, Spain) and LANDSAT imagery. After SMOS launch, the algorithm was applied to a set of SMOS images acquired during the commissioning phase over the OZnet soil moisture monitoring network site (South-Eastern Australia), and MODIS NDVI/Ts data. Results from comparison with in situ soil moisture measurements showed that the soil moisture variability was effectively captured at 10 and 1 km spatial scales, without a significant degradation of the root mean square error. The potential application of this downscaling approach to generate high resolution soil moisture maps over the Iberian Peninsula in near-real time is now being assessed.

Keywords: *remote sensing, SMOS, MODIS, microwave radiometry, soil moisture.*

INTRODUCCIÓN

La misión Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) de la Agencia Espacial Europea (ESA), en órbita desde el 2 de Noviembre de 2009, es el primer satélite dedicado a la medición global de la humedad del suelo. SMOS proporciona datos globales de humedad del suelo y de salinidad de los océanos cada 3 días con una resolución espacial de ~40 km (Font *et al.*, 2010; Kerr *et al.*, 2010). Estos datos permitirán mejorar nuestros conocimientos del intercambio continuo de agua y energía que se produce entre los océanos, la atmósfera y las masas continentales, y son necesarios para estudios globales de meteorología y climatología, entre otros. Sin embargo, la resolución espacial de los datos de humedad es insuficiente para aplicaciones regionales –como por ejemplo predicciones locales de meteorología, climatología, estudios hidrológicos, mejora de la productividad agrícola y gestión sostenible de recursos hídricos–, donde se requiere una resolución espacial de 1 a 10 km.

En este contexto, la combinación de datos SMOS con datos provenientes de otros satélites a más alta resolución podría ser la solución para obtener un producto de humedad a la resolución requerida. El uso de sensores en el visible/infrarrojo (VIS/IR) para la detección de humedad se ha estudiado ampliamente en el pasado, y diferentes estudios han demostrado la posibilidad de utilizar sensores en el VIS/IR para proporcionar una medida indirecta de humedad del suelo. Nótese que los sensores en el VIS/IR tienen la ventaja de que su resolución espacial es típicamente alta (del orden de decenas de metros en el caso de LANDSAT o centenares de metros en el caso de MODIS).

Este trabajo presenta resultados de la aplicación de un algoritmo para la mejora de resolución de los datos de humedad de SMOS utilizando datos MODIS. El algoritmo se basa en el concepto de "triángulo universal", que relaciona parámetros en el visible/infrarrojo, como el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), y la temperatura superficial del suelo (T_s), a la humedad del suelo (Carlson 2007). Esta relación se ha fortalecido mediante la incorporación de datos de temperatura de brillo proporcionada por SMOS (T_B). El algoritmo combina pues la precisión de las observaciones radiométricas de SMOS, con la alta resolución espacial de los datos del satélite MODIS en el VIS/IR.

En preparación para el lanzamiento de SMOS, el algoritmo se probó con medidas adquiridas con el Airborne RadIomEter at L-band (ARIEL) de la UPC en la REd de MEDición de la HUmedad del Suelo (REMEDHUS) de la Universidad de Salamanca en la provincia de Zamora (España), e imágenes LANDSAT. Los resultados mostraron una buena correlación con las observaciones *in situ* de la humedad del suelo, e ilustraron la fortaleza de la relación entre los datos de satélite VIS/IR y la humedad del suelo (Piles *et al.*, 2010).

Tras el lanzamiento de SMOS, el método se aplicó a una serie de imágenes SMOS de humedad del terreno (versión del procesador de humedad de Octubre 2010) adquiridas durante la fase de comisionado de la misión sobre la red de medición de la humedad del suelo OZnet, en el Sudeste de Australia, y utilizando datos NDVI y T_s de MODIS. Los resultados se han validado con datos *in situ* de humedad y muestran que la variabilidad de la humedad del suelo es efectivamente capturada a escalas espaciales de 10 km y 1 km sin una degradación significativa del error cuadrático medio (Piles *et al.*, 2011).

METODOLOGÍA

El algoritmo para la obtención de mapas de humedad a alta resolución a partir de la combinación de datos SMOS y MODIS consiste en dos pasos, que se describen brevemente a continuación.

Paso 1: Modelo de enlace

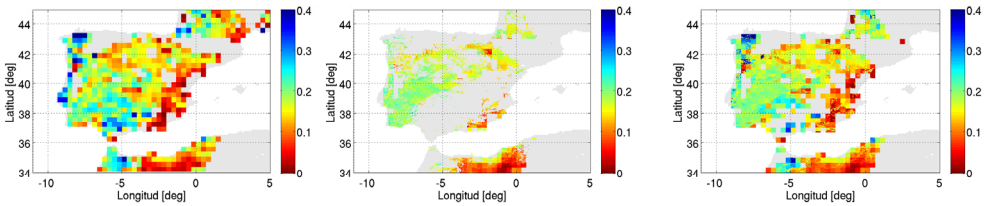
Un modelo de enlace basado en el concepto del triángulo se ha desarrollado para relacionar de forma óptima las observaciones de los dos sensores. Este modelo es una fórmula de regresión que relaciona las observaciones de humedad (s_m), y las temperaturas de brillo de SMOS (T_B) a 40 km de resolución espacial, con datos NDVI y T_s de MODIS a 1 km, agregados a 40 km:

$$s_m = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=0}^{n} a_{ijk} NDVI^i T_s^j T_B^k \qquad (1)$$

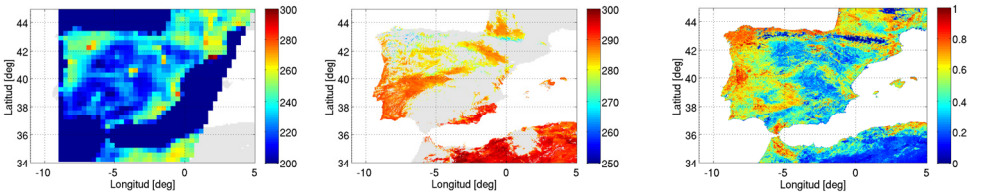
La siguiente aproximación de (1) se ha utilizado como modelo de enlace en este estudio:

$$\begin{aligned} s_m = {} & a_{000} + a_{001}T_{BN} + a_{010}T_N + a_{100}F_r \\ & + a_{002}T^2_{BN} + a_{020}T^2_N + a_{200}F_r^2 \\ & + a_{011}T_N T_{BN} + a_{101}F_r T_{BN} + a_{110}F_r T_N \end{aligned} \qquad (2)$$

donde T_{BN} son temperaturas de brillo de SMOS normalizadas, T_N son las temperaturas de superficie de MODIS normalizadas, y F_r son los índices NDVI de MODIS normalizados. Las normaliza-



(a) SMOS s_m [m^3/m^3] a 40 km (b) s_m [m^3/m^3] a 1 km (c) s_m [m^3/m^3] combinado a 1 y 40 km



(d) SMOS T_B [K] a 40 km (e) MODIS/TERRA Ts [K] a 1 km (f) MODIS/TERRA NDVI a 1 km

Figura 1: Resultados de la aplicación del algoritmo de mejora de resolución a una imagen SMOS sobre la península ibérica, adquirida el 20 de Noviembre de 2010 (18 h). **(a)** Datos de humedad SMOS [m^3/m^3] con una resolución de 40 km; **(b)** Datos desagregados de humedad [m^3/m^3] a 1 km resultantes de la aplicación del algoritmo propuesto; **(c)** Imagen compuesta de humedad a partir del producto desagregado a 1 km y de datos SMOS a 40 km (cuando no hay datos disponibles a 1 km) [m^3/m^3]; **(d)** Temperaturas de brillo de SMOS T_{Bh} [K] a 42.5º; **(e)** Temperaturas de MODIS/TERRA [K] a 1 km; **(f)** Índice NDVI de MODIS/TERRA. Las áreas sin datos corresponden a zonas en las que no se ha podido recuperar humedad con SMOS, o a zonas en las que las nubes han enmascarado los datos de temperatura de MODIS.

ciones son respecto a los valores máximo y mínimo de cada día y región de estudio.

Utilizando el modelo (2), se construye un sistema de ecuaciones para todos los píxeles de una imagen. Este sistema se resuelve para obtener los coeficientes de regresión a_{ijk}, que son específicos para cada día y región de estudio.

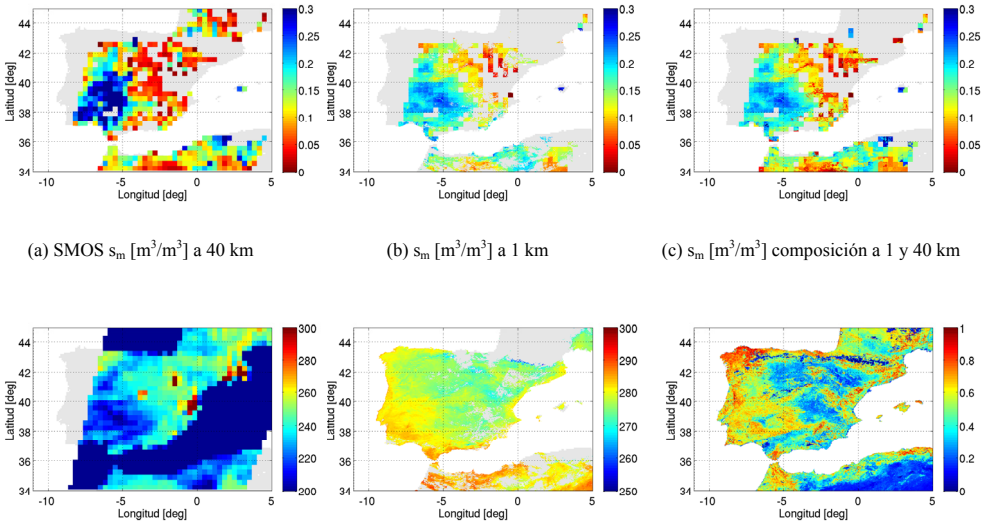
Paso 2: Mapas de humedad a alta resolución

Los mapas de humedad a 1 km se obtienen aplicando (2) con los coeficientes de regresión a_{ijk} del paso 1, T_N y F_r a 1 km y T_{BN} remuestreado a una malla de 1 km x 1 km.

RESULTADOS

Las Figuras 1 y 2 muestran resultados de la aplicación del algoritmo sobre dos órbitas descendentes de SMOS adquiridas los días 20 de Noviembre y 16 de Diciembre, 2010, respectivamente. Estos resultados evidencian cómo la variabilidad de la humedad del suelo que se aprecia en la imagen SMOS a 40 km (Figura 1a y Figura 2a) es capturada a la resolución de MODIS (1 km, Figura 1b y Figura 2b). También se puede ver que hay zonas en las que no hay posibilidad de llegar a alta resolución debido a la presencia de nubes en las imágenes MODIS T_s (Figura 1e y Figura 2e). En las imágenes compuestas presentadas en Figura 1c y Figura 2c se ha procedido a rellenar las imágenes de humedad a 1 km en las que no hay datos MODIS con los datos de humedad SMOS a 40 km remuestreadosa 1 km. Ésta sería una forma de entregar a los usuarios finales un mapa de humedad a la más alta resolución posible, dependiendo de la cobertura de nubes de MODIS.

Actualmente, se está estudiando la posibilidad de utilizar otro sensor en el VIS/IR que nos permitiera obtener una mayor cobertura de NDVI y T_s, como podría ser el Meteosat de Segunda Generación (MSG). Asimismo, se está preparando una validación del algoritmo utilizando datos aerotransportados en banda L para obtener una estimación del error de las estimaciones y de este modo consolidar la estrategia de mejora de resolución.



(a) SMOS s_m [m^3/m^3] a 40 km (b) s_m [m^3/m^3] a 1 km (c) s_m [m^3/m^3] composición a 1 y 40 km

(d) SMOS T_B [K] a 40 km (e) MODIS/TERRA Ts [K] a 1 km (f) MODIS/TERRA NDVI a 1 km

Figura 2: Ídem Figura 1, pero utilizando una imagen SMOS sobre la península Ibérica, adquirida el 16 de Diciembre de 2010 (18 h).

CONCLUSIONES

Este estudio presenta los primeros mapas de humedad del suelo a 1 km obtenidos sobre la península Ibérica a partir de imágenes SMOS a 40 km y datos auxiliares de MODIS a 1 km. El algoritmo utilizado para generar estas imágenes ha sido previamente validado sobre la red de sensores de humedad del suelo OZnet en Australia.

BIBLIOGRAFÍA

CARLSON T., 2007. *An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite Imagery.* Sensors, vol. 7, pp. 1612–1629.

FONT J., CAMPS A., BORGES A., MARTIN-NEIRA M., BOUTIN J., REUL N., KERR Y., HAHNE A., MECKLENBURG S., 2010. *SMOS: The Challenging Sea Surface Salinity Measurement from Space*, Proc. IEEE, vol. 98, no. 5, pp. 649-665

KERR Y.H., WALDTEUFEL P., WIGNERON J.-P, DELWARD S., et al., 2010. *The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle*, Proc. IEEE, vol. 98, no. 5, pp. 666–687.

PILES M., CAMPS A., VALL-LLOSSERA M., SÁNCHEZ N., et al., 2010. *Soil moisture downscaling activities at the REMEDHUS Cal/Val site and its application to SMOS*. Proc. 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications.

PILES M., CAMPS A., VALL-LLOSSERA M., CORBELLA I., PANCIERA R. et al., 2011. *Downscaling SMOS-Derived Soil Moisture Using MODIS Visible/Infrared Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensings, in press.

AGRADECIMIENTOS

Los autores querrían agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia de España por proporcionar la financiación necesaria para la realización del presente trabajo (proyectos ESP2007-65667- C04-02 y AYA2008-05906-C02-01/ESP).

Clasificación de imágenes multiespectrales mediante técnicas orientadas a objetos (CIMTOO): una aplicación a la cuantificación de la turbidez de un lago

C. Quintana-Sotomayor[1], M. Lillo-Saavedra[1] y C. Gonzalo-Martin[2]

[1]Dpto. de Mecanización y Energía. Fac. Ingeniería Agrícola, Univ. de Concepción (Chile). carquint@udec.cl

[2]DATSI. Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid. 28660 (España) consuelo.gonzalo@upm.es

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló una metodología de clasificación de imágenes multiespectrales mediante técnicas orientadas a objeto (CIMTOO) para cuantificar niveles de turbidez en la Laguna Grande de San Pedro (Chile). En una primera etapa se llevó a cabo la segmentación multi-resolución de una imagen multiespectral. En una segunda etapa se definió e implementó cada prueba de clasificación, donde se utilizó el método del vecino más próximo, lógica difusa para evaluar la pertenencia de los objetos a las clases y datos de turbidez registrados *in situ*. En términos generales, la precisión alcanzada en cada prueba se comparó mediante dos índices propuestos: Pertenencia Global y Estabilidad Global. En el estudio se utilizó el software eCognition Professional 4.0.

Palabras claves: teledetección ambiental, análisis de imágenes orientado a objetos, lago, turbidez.

ABSTRACT

In this work was implemented a methodology for multispectral image classification by object-oriented techniques to quantify levels of turbidity in the Laguna Grande de San Pedro (Chile). In the first stage was carried out multi-resolution segmentation of a multispectral image. In a second stage was defined and implemented the classification tests, which used the nearest neighbor method, fuzzy logic to evaluate the membership of objects to classes and turbidity data registered in situ. Overall, the accuracy achieved in each test was compared with two proposed indices: Global Membership and Global Stability. In this study was used eCognition Professional 4.0 software.

Keywords: *environmental remote sensing, object-based images analysis, lake, turbidity.*

INTRODUCCIÓN

El estado trófico de lagos es un indicador relevante de la calidad y potencial uso. Olmanson et al. (2008) señala que éste puede determinarse por al menos cuatro parámetros: cantidad de nitrógeno y fósforo, turbidez y concentración de clorofila-a. En particular, las concentraciones de sólidos en suspensión y de materia orgánica disuelta condicionan la turbidez del agua. La turbidez mide el grado de opacidad o transparencia de un líquido, usualmente en unidades de turbidez nefelométricas (NTU). Para un lago, las estrategias de monitoreo *in situ* apoyadas en técnicas de teledetección han ayudado a orientarlas hacia un mejor uso de recursos económicos y humanos. En esta línea, las imágenes satelitales permiten contar con una visión sinóptica a distintas escalas espaciales y temporales de parámetros que reflejan el estado trófico de un sistema léntico.

Para el análisis de imágenes satelitales los métodos de clasificación por objeto han sido aplicados para distinguir cubiertas fuertemente texturadas con imágenes de alta y muy alta resolución (Baatz, y Schäpe, 2000). En estos casos, el uso de clasificadores basados en píxel implica un incremento en el ruido contenido en los mapas temáticos generados (Chuvieco, 2002). En contraste, los clasificadores orientados a objeto se basan en la agrupación inicial de píxeles contiguos en un proceso de segmentación, formando regiones según criterios de homogeneidad y escala (Baatz, y Schäpe, 2000). La clasificación por objetos permite integrar información espectral, textural y de contexto. Sin embargo, se ha constatado un fuerte compromiso entre la precisión de los resultados y la magnitud asignada a los parámetros de segmentación (Blaschke, T. y Strobl, J., 2001). El objetivo de este trabajo ha sido proponer una metodología que permita llevar a cabo la clasificación de imágenes multiespectrales mediante técnicas orientadas a objeto (CIMTOO), aplicada a la detección de niveles de turbidez de un sistema léntico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y datos *in situ*

El área de estudio corresponde a la Laguna Grande de San Pedro en Chile (36°51"S, 73°06"W). Los datos de turbidez se registraron con una sonda Hydrolab DS5 el día 24/12/2008, abarcando un rango de 0.9 a 2.7 NTU.

Imagen multiespectral

Se utilizó una imagen SPOT5 captada el día 18/12/2008. La resolución espacial de la imagen fue aumentada de 10 a 2.5 m mediante un proceso de co-registro y fusión de las bandas multiespectrales con la imagen pancromática. Para esto se utilizó un algoritmo basado en una representación conjunta MRMD (Gonzalo-Martin y Lillo-Saavedra, 2007).

De la imagen SPOT5 fusionada se utilizaron las bandas correspondientes al espectro electromagnético verde, rojo, IRC e IRM (B1, B2, B3 y B4, respectivamente). Éstas se utilizaron en la generación de bandas sintéticas, que han sido utilizadas en otros estudios para la detección de niveles de turbidez en cuerpos de agua (Olmanson et al., 2008; Zhang et al, 2002; Doxaran et al, 2002). Las bandas sintéticas generadas fueron: BS1=B1/B2, BS2=B1/B3, BS3=B2/B3, BS4=(B2-B3)/B1 y BS5=(B1-B4)(B1+B4), donde BS5 es el índice de agua de diferencia normalizada modificado (MNDWI) propuesto por Xu (2006).

Segmentación orientada a objetos

El proceso de segmentación se implementó en el software eCognition Professional 4.0 (Definiens, 2004). Éste utiliza un algoritmo de tipo *bottom-up*, iniciando la segmentación con objetos del tamaño de un píxel que se fusionan de acuerdo a las magnitudes asignadas a los parámetros de heterogeneidad (Baatz, y Schäpe, 2000). Los parámetros son: factor de escala, factor de color y factor de forma. Este último se compone a la vez por dos subcriterios: compacidad y suavidad. El factor de escala determina el tamaño de los objetos actuando como un umbral de heterogeneidad. Los factores de color y forma permiten ponderar en mayor o menor medida la información espectral de las imágenes. Para establecer un rango de magnitud de los parámetros se realizó un análisis de sensibilidad, observándose el número de objetos, área promedio, forma y homogeneidad de textura.

Clasificación de los objetos

Se utilizó el método del vecino más próximo, operando de modo similar a una clasificación supervisada orientada a píxeles. Para ello, se seleccionaron objetos ubicados en los puntos muestreado de la laguna y se asignaron como áreas de entrenamiento a las clases. La proximidad de un objeto a una clase se evaluó con la distancia euclidiana normalizada en base a diez descriptores de los objetos (Figura 1). Las clases se crearon en base a las magnitudes de turbidez detectadas *in situ*, para posteriormente agrupar las más próximas.

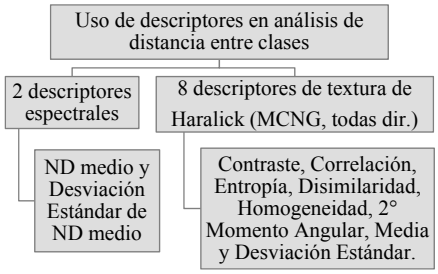


Figura 1: Descriptores utilizados en la clasificación con el método del vecino más próximo; MCNG = matriz de co-ocurrencia de niveles de gris.

Las pruebas de clasificación se detallan en la Tabla 1. El total de bandas utilizadas en las pruebas fueron: B1, B2, B3, BS1, BS2, BS3, BS4 y BS5. Las pruebas A1, A2 y A3 utilizaron todas las bandas, mientras la prueba B1 utilizó sólo las bandas sintéticas y la prueba C1 utilizó sólo las tres bandas espectrales. Así, el número de rasgos quedó determinado por el producto entre el número de descriptores (10) y el número de bandas de datos utilizadas en cada prueba.

Constatada la homogeneidad de los datos *in situ*, así como de la respuesta espectral captada en la imagen, se utilizó el total de datos para definir las clases y maximizar su separabilidad. Así, la evaluación de la clasificación se consideró como más precisa cuanto mayor fue la pertenencia de los objetos a su mejor clase y mayor fue la diferencia con la pertenencia a una segunda mejor clase. Para comparar la precisión de las pruebas, se propuso los índices de Pertenencia Global (Ecuación 1) y Estabilidad Global (Ecuación 2) calculados, respectivamente, como un promedio ponderado por superficie de la pertenencia (Z) y estabilidad (ΔZ) alcanzada por los objetos clasificados:

$$\mathcal{P}_G = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i \cdot Z_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_G = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i \cdot \Delta Z_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \quad (2)$$

donde, A_i es el área de un objeto i-ésimo que se ha clasificado y que no forma parte donde los objetos asignados a las área de entrenamiento de una clase; con i desde 1 al número de objetos clasificados (n); con $0 \leq \mathcal{P}_G \leq 1$ y $0 \leq \mathcal{E}_G \leq 1$.

Prueba	Nº de bandas	Parámetros de segmentación			Nº máximo de Rasgos
		Escala	Forma / Color	Compacidad / Suavidad	
A1	8	1, 3, 5	0.1 / 0.9	0.1 / 0.9	80
A2	8	1, 3, 5	0.05 / 0.95	0.0 / 1.0	80
A3	8	1, 3, 5	0.0 / 1.0	-	80
B1	5	1, 3, 5	0.0 / 1.0	-	50
C1	3	1, 3, 5	0.0 / 1.0	-	30

Tabla 1: Pruebas de clasificación.

En base a la clasificación más precisa (mayores magnitudes de $\mathcal{P}_G$ y $\mathcal{E}_G$), se aplicó un proceso de refinamiento de los resultados, segregando las clases inicialmente agrupadas e incrementando de 0.1 a 0.4 el umbral de pertenencia mínima de los objetos a una clase.

RESULTADOS

Los análisis de sensibilidad de los parámetros de segmentación indicaron que el área promedio de los objetos se incrementa con un mayor factor de escala y color. Así, el menor uso de factores de forma y escala, permitió generar objetos de menor heterogeneidad espectral y textural.

Los análisis de distancia entre clase señalaron la necesidad de agrupar las clases 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7. Exceptuando la prueba B1, la distancia entre clases se incrementó al usar un factor de escala 3 y los descriptores más usados fueron ND medio y los descriptores de de textura 2º Momento Angular, Media y Desviación Estándar (MCNG, todas dir.).

Con la clasificación de los objetos de cada prueba, se observaron diferencias en los niveles de pertenencia y estabilidad alcanzados por clase. Sin embargo, en términos globales como se muestra en la Figura 2, la prueba C1 segmentada con factor de escala 3 fue la más precisa. Si bien la prueba B1 alcanzó altas magnitudes de $\mathcal{P}_G$ y $\mathcal{E}_G$, ésta mostró una reducción importante en el rango dinámico de turbidez detectada.

Como se esperaba, el proceso de refinamiento generó un incremento en el nivel de pertenencia y estabilidad promedio alcanzada por clase. En contraste, la superficie no clasificada en la prueba C1/escala 3 aumentó desde 0.2% a 4.6%. En términos globales, $\mathcal{P}_G$ aumentó desde 0.81 a 0.83 y $\mathcal{E}_G$ aumentó de 0.31 a 0.39. Para la fecha de estudio, según se muestra en la Figura 3, la turbidez de la laguna se encontró principalmente en el rango de 1.0 a 1.7 NTU, incrementándose su magnitud y heterogeneidad espacial hacia el sector norte de la laguna (Figura 3).

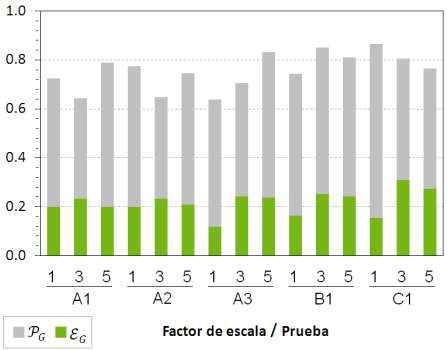


Figura 2: Magnitud de los índices de Pertenencia Global ($\mathcal{P}_G$) y Estabilidad Global ($\mathcal{E}_G$) alcanzada en cada prueba de clasificación.

CONCLUSIONES

Se constató un compromiso importante entre la magnitud de los parámetros de segmentación, los datos utilizados y la precisión de la clasificación difusa. Los mejores resultados se obtuvieron al utilizar un factor de escala de magnitud intermedia y una ponderación total de la información espectral, en desmedro de los parámetros que regulan la forma de los objetos.

El uso de descriptores de textura basados en la MCNG permitió incrementar la distancia entre clases y con ello la precisión de la clasificación difusa. Ésta resultó más precisa al utilizar sólo las bandas espectrales. Con la metodología propuesta, se generaron mapas de turbidez de la Laguna Grande de San Pedro, asociando el 89% de la cubierta de la laguna a una turbidez comprendida entre 1.0 y 1.7 NTU, que en comparación a estudios de otros sistemas lénticos, señala una reducida y homogénea turbidez del agua.

BIBLIOGRAFÍA

BLASCHKE, T. y STROBL, J. (2001). *Whats wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and Gis*. GIS Zeitschrift four Geoinformations systeme, 6, 12-17.

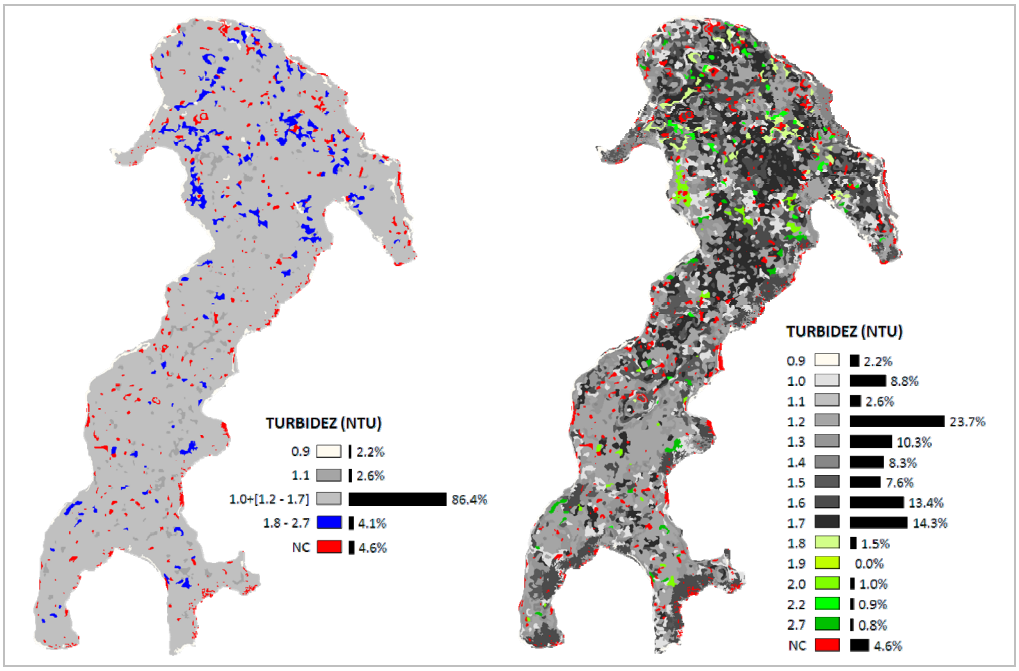


Figura 3: Mapas de turbidez generados con CIMTOO para la Laguna Grande de San Pedro, Chile. Mapa con clases agrupadas (izquierda) y mapa con clases segregadas (derecha). NC = no clasificado.

BAATZ, M. y SCHÄPE, A. (2000). *Multiresolution segmentation an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation.* Strobl/Blaschke/Griesebner (eds.): Angewandte Geographische Informations Verarbeitung XII, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 12-23.

CHUVIECO, E. (2002). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio.* Editorial Ariel, 2daEdición.

DOXARAN, D., FROIDEFONDA, J.-M., LAVENDERB, S., y CASTAINGA, P. (2002). *Spectral signature of highly turbid waters application with spot data to quantify suspended particulate matter concentrations*. Remote Sensing of Environment, 81, 149 - 161.

GONZALO-MARTÍN, C. y LILLO-SAAVEDRA, M. (2007). *Fusión de imágenes Quickbird mediante una representación conjunta multirresolución - multidireccional*. IEEE Latin America Transactions, 5, Nº 1, 32 - 37.

OLMANSON, L. G., BAUER, M. E., y BREZONIK P. L. 2008. *A 20-year landsat water clarity census of minnesota's 10,000 lakes.* Remote Sensing of Environment, 112 (11), 4086–4097.

TYLER, A. N., SVAB, E., PRESTON, T., PRESING, M., y KOVÁCS, W. A. (2006). *Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment.* International Journal of Remote Sensing, 27, Nº 8, 1521-1537.

XU, H. (2006). *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery.* International Journal of Remote Sensing, 27, 3025-3033.

ZHANG, Y., PULLIAINEN, J., KOPONEN, S., y HALLIKAINEN, M. (2002). *Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the gulf of Finland using combined optical data and microwave data.* Remote Sensing of Environment, 8, 327-336.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología, Chile (FONDECYT 11060056), a la Universidad Politécnica de Madrid, España (AL11-P(I+D)27) y al Dr. J.A. Barrera por facilitar el software eCognition 4.0.

Neutralización de la acidez de aguas fluviales por mareas costeras: cartografía de aguas y sedimentos con datos hiperespectrales Hymap (río Odiel, Huelva)

A. Riaza[1], J. Buzzi[1], E. García-Meléndez[2], V. Carrère[3], A. Sarmiento[4], J.M. Nieto[4] y A. Müller[5]

[1] Instituto Geológico y Minero de España, La Calera 1, 28760 Tres Cantos, (Madrid, España). Correo electrónico: a.riaza@igme.es, j.buzzi@igme.es

[2] Área de Geodinámica Externa, Universidad de León, Facultad de Ciencias Ambientales, Campus de Vegazana s/n, 24071 León, (León, España).

[3] Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes cedex 3 France.

[4] Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Av. Fuerzas Armadas s/n, E-21071 Huelva, (Huelva, España).

[5] DLR_ Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, German Remote Sensing Data Centre, Department Land Surface Applications, P.O. Box 1116, 82230 Wessling, (Bayern, Deutschland).

RESUMEN

El agua que fluye por el rio Odiel (Huelva) es ácida por la contaminación procedente de las minas de sulfuros masivos situadas a lo largo de su curso alto y medio. Al acercarse al estuario, el agua marina que asciende con las mareas costeras se mezcla con el agua fluvial en descenso, y reacciona con los sedimentos depositados por el río. La acidez de las aguas fluviales se neutraliza con el agua marina, que tiene un pH básico. El agua marina impide la formación de barros piríticos y la precipitación de eflorescencias de sulfatos de hierro, y se precipitan en cambio cloruros de origen marino.

Los datos hiperespectrales Hymap permiten cartografiar la extensión de la influencia de las mareas en el curso bajo del río, basándose en las propiedades espectrales de los sedimentos fluviales y de las costras que se forman sobre ellos. Así, en este trabajo se cartografían y se describen espectralmente las variaciones de tamaño de grano en sedimentos fluviales, las concentraciones de costras de óxidos y sulfatos de hierro variablemente hidratados que se forman sobre los sedimentos fluviales, y su reemplazamiento por sales marinas cloradas en el curso del río cercano al estuario.

Para ello, se sugiere una secuencia de algoritmos de tratamiento de imágenes para elaborar las cartografías, y se describen los rasgos espectrales que se consideran relevantes en los cambios ambientales en estudio.

Palabras clave: espectroscopía de imágenes, sensores hiperespectrales, drenaje ácido de minas, sedimentos fluviales.

ABSTRACT

The river Odiel carries acid water as consequence of mine waste contamination of massive sulphide ore deposits. When approaching the estuary, both sediments and water experiment the influence of tides. The river loses load transport capacity descending towards the estuary. The acidity of the river fresh water is neutralized by marine water near the estuary. The occurrence of pyrite mud and hydrated iron sulphate efflorescence precipitated from acid waters is plugged by marine water with chloride, from which marine salts precipitate instead.

Hymap airborne hyperspectral data permit the disclosure of tidal influence through their spectral features. Grain size variations on river pebble bars, concentrations of crusts of variably hydrated iron sulphate and oxides, and replacement by marine chloride salts on the lower parts of the river entering the estuary, are spectrally described and mapped.

The image processing procedure using hyperspectral mapping algorithms, the spectral features considered relevant as indicators of environmental changes.

Keywords: *imaging spectroscopy, hyperspectral sensors, acid mine drainage, river sediments.*

INTRODUCCIÓN

La espectroscopía de imágenes es un instrumento eficiente para el estudio de las escombreras en minas que pueden generar drenaje ácido de minas (AMD, acid mine drainage). Tomando datos sobre los residuos mineros, sobre los que se desarrollan costras con distintas asociaciones de minerales, se construyen espectrotecas que permiten hacer estimaciones rápidas sobre la composición mineralógica de esas costras y la acidez potencial de las aguas que las disuelvan (Crowley et al, 2003).

El río Odiel (Huelva) cruza la Faja Pirítica Iberica, una formación geológica que aflora ampliamente en el Macizo Hespérico meridional, albergando muchos yacimientos de sulfuros complejos que se han explotado desde hace 5000 años. En todos ellos hay pirita abundante, y una gran parte de las aguas superficiales de su cuenca está contaminada por precipitados de aguas ácidas (Sarmiento et al, 2009).

En el curso bajo del río, antes de llegar al estuario, las mareas transportan sal marina. El agua marina tiene un pH básico que contrarresta la acidez de las aguas del río y influye en los precipitados de minerales en el cauce. Este estudio pretende describir cómo las imágenes hiperespectrales detectan la influencia de las mareas, tanto en los sedimentos fluviales como en el agua del cauce fluvial antes de incorporarse a las marismas del estuario.

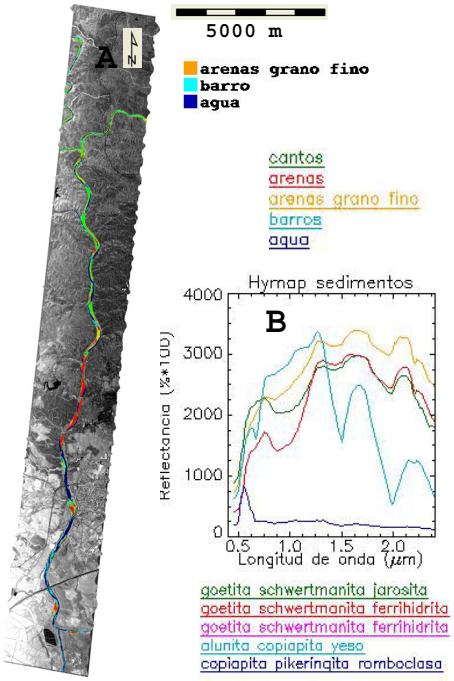
DATOS

El sensor hiperespectral Hymap voló sobre el curso del río Odiel el 1 de agosto de 2008, con una resolución espacial de 4 m. En septiembre de 2008 y entre junio y agosto de 2009 se tomaron 500 espectros geológicamente documentados en campo con un espectrómetro ASD Fieldspec3. También se tomaron muestras de sedimentos y costras, en las que se midieron espectros en el cuarto oscuro en fechas inmediatas a su muestreo, con una fuente de iluminación artificial constante. En muestras representativas se realizaron análisis de difracción de rayos X.

ELABORACIÓN DE UN MAPA CON TRATAMIENTO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES

Las imágenes hiperespectrales pueden usarse de variadas maneras para cartografiar superficies complejas, al ofrecer datos con dimensiones numerosas, cuando la resolución espacial se adapta a los rasgos a cartografiar.

Figura 1: A: Mapa de sedimentos del río Odiel en su curso bajo, elaborado con imágenes Hymap. B: Respuestas espectrales en imágenes Hymap de los sedimentos cartografiados. Abajo, diagnósticos mineralógicos de los espectros Hymap con una espectroteca de referencia



La secuencia típica de algoritmos comienza con el cálculo de Transformadas de Ruido Mínimo (MNF, Minimum Noise Fraction Transforms), siguiendo con el Indice de Pureza de Pixeles (PPI, Pixel Purity Index) y el Análisis n-dimensional (n-dimensional Analysis), con el que se aíslan poblaciones estadísticamente significativas de datos. Estas poblaciones se convierten en una espectroteca de miembros extremos con la que se calcula un mapa por medio del Cartógrafo de Ángulos Espectrales (SAM, Spectral Angle Mapper).

El cauce del río Odiel se aísla del resto de la imagen con una primera secuencia, y la serie de algoritmos se repite para aislar sedimentos y agua (Figura 1A). La cartografía de las zonas cubiertas de agua es especialmente crítica. La firma espectral del agua ácida se confunde con varias fases mineralógicas de sulfatos de hierro hidratados que abundan en zonas próximas a las orillas.

EVALUACIÓN ESPECTRAL

Sedimentos fluviales en imágenes Hymap

Las imágenes Hymap muestran una respuesta espectral que se relaciona directamente con el tamaño de grano de los sedimentos fluviales (Figura 1B.). Tanto los cantos como las arenas tienden a mostrar una reflectancia global más alta. Las cuñas de barro en los bordes de las barras fluviales y las transiciones entre barras muestran una reflectancia global alta en el visible, que disminuye hacia longitudes de onda más largas.

Los cantos muestran un hombro desde 0.76 µm a 1.27 µm, y la respuesta espectral progresa horizontalmente con amplias absorciones en las bandas de absorción de vapor de agua en 1.49 µm y 1.98 µm. Desde 2.13 µm, la reflectancia baja hacia longitudes de onda más largas con una absorción estrecha en 2.2 µm.

Las arenas siguen la misma tendencia, con una reflectancia global menor. Muestran esbozos de hombros en 2.2 µm y 2.33 µm. Las dos últimas absorciones se asocian a la presencia de moscovita (una herencia detrítica de las rocas ígneas de la Sierra de Aracena en la cabecera del río Odiel), que tiende a disminuir en el curso bajo del río.

El rasgo más llamativo de las franjas de barro pirítico es una absorción estrecha en 0.67 µm, típica de la vegetación sana. El barro incluye algas microscópicas. Hay restos de hojas y algas a lo largo de todo el río. Este rasgo espectral se repite en los espectros de todas las zonas húmedas del río, con reflectancia global variable.

Los sedimentos del río Odiel están cubiertos con costras de minerales que precipitan del agua ácida. Estas costras se diagnostican mineralógicamente en las imágenes Hymap con una espectroteca de referencia desarrollada en laboratorio (Crowley et al, 2003; Riaza et al, 2010a) sobre productos de meteorización de piritas (Figura 1B). Según este diagnóstico, la goetita (hidróxido de hierro) domina las costas que cubren las barras del río. Las cuñas y bordes de barro se identifican como sulfato de hierro hidratado. Como curiosidad, el agua ácida se diagnostica como copiapita, otro sulfato hidratado de hierro. De modo que los diagnósticos mineralógicos tienen que sufrir una severa crítica en función del contexto geológico, y las cartografías requieren un filtrado cuidadoso por un intérprete geológicamente cualificado.

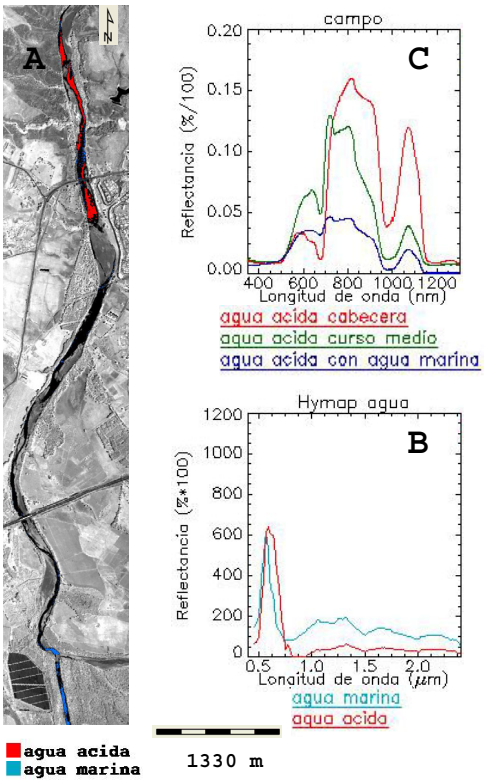


Figura 2: A: Mapa elaborado con imágenes Hymap del agua del río Odiel en su curso bajo. B: Espectros de datos Hymap, de las unidades de agua cartografiadas. C: Espectros de campo en agua a lo largo del río Odiel.

Medidas espectrales en agua: imágenes Hymap y espectros de campo

El agua ácida en las imágenes Hymap (Figura 2A) muestra un pico de reflectancia entre 0.400 µm y 0.662 µm, que se nivela en longitudes de onda más largas, o bien desarrolla una respuesta ruidosa si el agua es turbia (Figura 2B). Este pico de reflectancia se intensifica aguas arriba, donde el agua es más acida, que en la desembocadura, al mezclarse con agua marina.

Los espectros del agua ácida medidos en el campo muestran típicamente absorciones en 0.677 µm, 0.978 µm y 1.151 µm, que también existen en los espectros de la vegetación verde (Figura 2C). Además existe una absorción en 0.741 µm en aguas muy ácidas cercanas a puntos de vertido de minas. Los espectros de esta agua

muy ácida también presentan un hombro de 0.835 µm a 0.913 µm (Riaza et al, 2010b).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio de las sustancias que precipitan a partir de aguas ácidas en un río a partir de imágenes hiperespectrales requiere una cartografía previa de los sedimentos fluviales y la identificación de puntos críticos en la evolución de la contaminación. La geomorfología del río y la sedimentología controlan estos parámetros. Otra tarea fundamental es la identificación de las superficies de agua, ya que la respuesta espectral del agua ácida se confunde fácilmente con varios sulfatos de hierro hidratados, que se sitúan siempre en zonas húmedas.

Las rupturas de pendiente son ambientes favorables como indicadores de evolución mineralógica en función de cambios estacionales y climáticos en ríos con agua ácida.

Las franjas del borde del agua, en las que se depositan normalmente sedimentos de grano fino, el nivel de humedad, la cubierta de vegetación seca o húmeda, las zonas de aguas someras con vegetación flotante y influencia espectral del fondo del río, son las zonas más críticas en la aparición de productos de contaminación o aproximarse a orlas de sustancias de precipitados, sea a partir de agua dulce o de agua marina. Los sulfatos de hierro hidratados que precipitan a partir de aguas ácidas pueden confundirse espectralmente con el cloruro de potasio y magnesio (carnalita) precipitado a partir de agua marina. Cuando aparecen eflorescencias de halita (cloruro de sodio), se dificulta la detección de precipitados de sales marinas. El descenso de acidez en el agua se manifiesta por la ausencia de las típicas costras de sulfatos de hierro y los barros piríticos.

La cartografía del agua está entorpecida por la presencia de vegetación. Este estudio hace notar que la mezcla de agua ácida fluvial con agua marina produce cambios espectrales relacionados con la química del agua. El agua ácida se neutraliza con el agua alcalina marina. La influencia del agua marina provoca un descenso del la reflectancia global y el incremento del ruido asociado a las aguas turbias en longitudes de onda del NIR.

BIBLIOGRAFÍA

CROWLEY, J.K., WILLIAMS, D.E., HAMMARSTROM, J.M., PIATAK N., CHOU, I-M., MARS, J.C., 2003: *Spectral reflectance properties (0.4–2.5 µm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes*. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis 3- 3, 219-228.

RIAZA, A., MÜLLER, A., 2010: *Hyperspectral Remote Sensing monitoring of Pyrite Mine Wastes: A record of climate variability (Pyrite Belt, Spain)*, Environmental Earth Sciences 61-3, 575-594. DOI:10.1007/s12665-009-0368-y.

RIAZA, A., BUZZI, J., GARCÍA-MELÉNDEZ, E., CARRÈRE, V., SARMIENTO, A., MÜLLER, A., 2010b: *River acid mine drainage sink by coastal tides: sediment and water mapping through hyperspectral Hymap data*, Proceedings EUFAR Workshop on Quantitative Applications on Soil Spectroscopy, April 15-16 2010, Potsdam, Germany, in press.

SARMIENTO, A.M., NIETO, J.M., OLÍAS, M., CÁNOVAS, C.R., 2009: *Hydrochemical characteristics and seasonal influence on the pollution by acid mine drainage in the Odiel river Basin (SW Spain)*. Applied Geochemistry 24, 697-714.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el Plan Nacional de Investigación (CGL2007-60004/CLI).

Monitorización de zonas de almacenamiento geológico de dióxido de carbono por técnicas de teledetección

M. Rincones, L. Iglesias, R. García y R. de la Vega

ETSI Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Calle Ríos Rosas 21. 28003. Madrid. España. Tel: 913367004, Fax: 913366962, E-mail: miguel_rincones@yahoo.com

RESUMEN

La fuga de dióxido de carbono (CO_2), desde el subsuelo en las zonas de almacenamiento geológico, es una situación de riesgo que debe ser monitoreada porque disminuye la efectividad de los proyectos de captura y almacenamiento, y puede afectar los ecosistemas y a la salud humana. Se han estudiado diversas técnicas para detectar CO_2; se consideran técnicas ópticas y de teledetección con el objetivo de abarcar zonas más extensas, con menor esfuerzo y menos tiempo. La investigación plantea la posibilidad de detección de CO_2 y el estrés de la vegetación relacionada con fugas en análogos naturales, de la zona de Campo de Calatrava en Ciudad Real, a través del análisis de imágenes multiespectrales LANDSAT e hiperespectrales EO1. Las técnicas a utilizar para procesar los datos consisten en la elaboración de cocientes entre bandas multiespectrales, así como también la aplicación del método probabilístico y geoestadístico propuesto por Govindan et al. (2010) en bandas hiperespectrales de la región del infrarrojo medio; sin embargo debido a la baja resolución espacial de las imágenes no es posible atribuir a los píxeles de vegetación afectada a estrés causado por exceso de CO_2.

Palabras clave: teledetección, almacenamiento geológico, CO_2, control.

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO_2) leaks from underground geological storage areas are a risk situation to be monitored because they reduce the effectiveness of a carbon capture and storage project and can affect ecosystems and human health. To monitor leaks, several techniques to detect CO_2 have been studied; remote sensing and optical techniques are considered due to its coverage of large areas with less efforts and costs. The research proposes the possible detection of CO_2 and vegetation stress related to leaks, in natural analogues in Calatrava Field in Ciudad Real, through the analysis of Landsat multispectral and EO1 hyperspectral imaging. The technique to process data involves building multispectral band quotients and a geoestatistical and probabilistic method (proposed by Govindan et al. 2010) of hyperspectral medium infrared bands; nonetheless due to the low spatial resolution of images it is not possible to assign stressed vegetation pixels to a CO_2 excess.

Keywords: *remote sensing, CO_2 geological storage, monitoring.*

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento geológico del dióxido de carbono (CO_2) es una tecnología aplicada a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que consiste en la inyección de cantidades industriales de CO_2 condensado en reservorios naturales subterráneos evitando la salida a la atmósfera del exceso de este gas. El almacenamiento geológico puede suponer un impacto importante en las emisiones de gases de efecto invernadero. Si el almacenamiento de CO_2 ha de realizar una importante contribución en reducir emisiones, tendría que realizarse a gran escala de forma segura y económicamente rentable (IPCC, 2005).

Existe una serie de técnicas de control de fugas de CO_2 en emplazamientos de almacenamiento geológico: (1) teledetección a partir de imágenes multiespectrales e hiperespectrales, (2) concentración de gas en el suelo, (3) covarianza de Eddy, (4) procesamiento geostadístico y probabilístico de imágenes espectrales, (5) técnicas electromagnéticas aéreas, (6) control de ecosistemas.

En miras de una detección temprana de emisiones de CO_2, la técnica de teledetección podría emplearse para controlar grandes áreas en diversos periodos de tiempo. Dado que el objetivo de un proyecto de control es detectar los

cambios sobre un indicador específico y para un territorio amplio a lo largo del tiempo la teledetección puede ser muy útil.

La investigación sobre las técnicas de control de zonas de almacenamiento geológico es una disciplina relativamente nueva. Rouse et al, 2010, usaron un sistema de imágenes multiespectrales con el objeto de observar los efectos en la vegetación debido a fugas de CO_2 en el suelo. Asimismo, Male, E et al, 2009, analizaron el uso de firmas hiperespectrales de plantas como técnica de control, evaluando la utilización de los cambios en la reflectividad de la firma espectral de la vegetación entre el espectro del infrarrojo cercano y el visible.

DATOS

La zona de estudio es el Campo de Calatrava, de una extensión total de 5000 km^2. En el actual paisaje de volcanes de la zona hay emanaciones abundantes e intensas de CO_2, aguas termales, anomalías térmicas, todas ellas muy localizadas.

Investigaciones previas llevadas a cabo por entes como la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad de Castilla – La Mancha, han monitoreado fugas de gas en superficie en el campo de Calatrava en puntos específicos como los indicados en la tabla 1. Los estudios se han basado en mediciones de las concentraciones de CO_2 del aire presente en el suelo.

Nombre del lugar	Norte	Este
La Sima	4.297.236	434.419
Barranco Pequeño	4.294.487	429.255

Tabla 1: Coordenadas UTM 30N, datum WGS84, de los puntos de estudio en Campo Calatrava.

IMAGEN	FECHA
1	2010-08-18
2	2010-05-30
3	2010-04-11
4	2009-08-22
5	2009-04-13

Tabla 2: Imágenes hiperespectrales del sensor Hyperion, EO1.

Para el presente trabajo, se obtuvieron bases de datos de imágenes multiespectrales e hiperespectrales satelitales de la zona de estudio. Las imágenes satelitales (ver tabla 2 y 3) descargadas fueron tomadas por el proyecto LANDSAT de la NASA y la misión Earth Observing 1 (EO1).

IMAGEN	FECHA	SENSOR
1	2010-07-25	TM
2	2010-06-23	TM
3	2008-11-26	ALI
4	2008-08-23	ALI
5	2008-08-05	ALI
6	2008-07-31	ALI
7	2008-07-26	ALI
8	2005-12-10	ETM+
9	2004-09-18	ETM+
10	2002-04-22	ETM+
11	2001-06-06	ETM+
12	2000-06-21	ETM+
13	1999-08-20	ETM+

Tabla 3: Imágenes multiespectrales LANDSAT y EO1. TM: Thematica Mapper, ALI: Advanced Land Imager, ETM+: Enhanced Thematic Mapper +.

Algunas de las imágenes de Landsat y EO1 ya se encontraban georreferenciadas, por lo que, solo hizo falta la aplicación de técnicas de ajuste de aquellas imágenes no georreferenciadas usando puntos de control de fotografías áreas de la zona. El software utilizado para la manipulación de las imágenes es ArcGIS.

PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE IMAGÉNES

El análisis de los datos, obtenidos por teledetección, se ha llevado a cabo combinando los valores digitales de las bandas espectrales y obteniendo como resultado información que sintetiza los aspectos relevantes comunes a las bandas involucradas. La combinación se logra a través de operaciones aritméticas con los valores de reflectividad de cada banda. Se emplean cocientes de bandas como los índices de vegetación, que permiten una reducción de la información en las imágenes multiespectrales. El índice más elemental a emplear es el de proporción simple (RVI), el cual consiste en el cociente entre la porción del infrarrojo cercano y el rojo visible, que puede resaltar aquellas zonas con presencia de vegetación verde y en la etapa de un rápido crecimiento y desarrollo. El índice RVI se puede definir como:

$$RVI = \rho IRC / \rho R$$

Donde ρIRC y ρR representan la reflectividad en la banda infrarroja cercana y roja, respectivamente. Asimismo se evaluó si las imágenes podrían ser útiles para detectar directamente emisiones de CO_2 empleando la banda del infrarrojo medio. A tal fin, se utilizaron imágenes

hiperespectrales ya que éstas tienen una mayor resolución espectral que las imágenes multiespectrales. Se ha planteado que al haber una mayor diferenciación de la información, se podrían apreciar valores considerados anómalos y que pudiesen estar relacionados a las fugas de CO_2, empleando índices de proporción simple en las bandas de la zona del infrarrojo medio y el rojo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez calculado los cocientes, el resultado obtenido es un conjunto de imágenes donde se indican las proporciones de energía entre las bandas involucradas señalando aquella vegetación en fase de desarrollo y vigorosa.

Las áreas de interés dentro del estudio tienen una superficie entre 20 y 50 m^2, por lo que la resolución espacial de los sensores TM, ETM+, ALI e Hyperion (30m x 30m) resulta muy baja para esta investigación. Es por ello que los datos de reflectividad para cada banda espectral corresponden a valores promedios del área de interés y zonas aledañas.

Las observaciones realizadas en campo por otras investigaciones en las zonas de estudio indican que las plantas afectadas son las más cercanas a los puntos de fugas, y dado a que estas zonas no son extensas, los sensores no son capaces de discernir entre plantas estresadas y otras que no lo estén debido a que la resolución espacial de los equipos es baja.

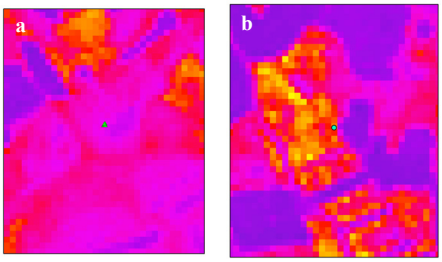


Figura 1: Cociente entre banda infrarroja y roja visible de los análogos naturales de la imagen 10, de fecha:22/04/2002, escala 1:10.000. **a)** La Sima, **b)** Barranco Pequeño.

En la zona de La Sima, no se puede afirmar que el valor calculado de los píxeles próximos a las emanaciones observadas, sea motivado a estrés en la vegetación a causa de fugas de CO_2, ya que tanto las tonalidades (rosas y naranjas) como los valores, que son uniformes entre sí, corresponden a zonas de escasa vegetación o vegetación que no está en pleno desarrollo. En cambio las zonas de color morado, corresponden a terrenos agrícolas arados sin cultivos o a suelos descubiertos o con escasa vegetación. En todas las imágenes multiespectrales adquiridas se identifica un comportamiento similar de los cocientes entre bandas.

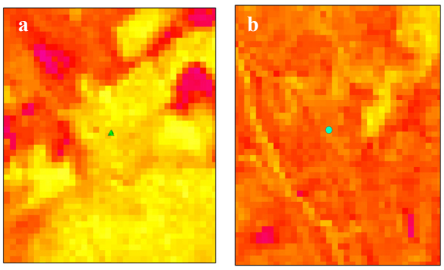


Figura 2: Cociente entre banda infrarroja medio (1,55 - 1,75 µm) y roja visible de los análogos naturales de la imagen 1, de fecha: 25/07/2010, escala 1:10.000. **a)** La Sima, **b)** Barranco Pequeño.

Igualmente, se elaboraron otros cocientes entre bandas utilizando la banda del infrarrojo medio y el rojo visible. La finalidad de este cociente es detectar valores de píxeles que indiquen la posible detección directa del CO_2, basado en la alta reflectividad de este compuesto en la zona del infrarrojo medio (aproximadamente entre 2,2 y 2,4 µm) y en la baja reflectividad en el rojo visible (ver figura 2). Los valores altos (color amarillo) coinciden con aquellas zonas de vegetación natural o sin intervención agrícola, que al comparar con las ortofotos se aprecia fácilmente. Debido a que los suelos al descubierto presentan una alta reflectividad en el rojo visible, es muy probable que las tierras aradas aparezcan con bajos valores en el cociente (tonalidades azules y moradas).

En las imágenes hiperspectrales ocurre la misma situación que las imágenes multiespectrales y a simple vista no se aprecian píxeles que puedan relacionarse a las fugas de CO_2 en los puntos estudiados.

CONCLUSIONES

La información obtenida de los cocientes entre bandas espectrales, no detectan directamente el CO_2.

La vegetación que presenta estrés es detectable, aunque en zonas cercanas a los análogos

naturales, los datos de la vegetación circundante no parecen presentar signos de estrés, por lo que no se puede precisar con exactitud si existen afecciones derivadas del exceso de CO_2. La información espectral ocupa un área mucho mayor que el área del punto de fuga en sí, por lo cual no se hace distinción entre zonas de vegetación sana y vegetación afectada.

Los cocientes entre bandas proporcionan información adecuada que ayudarían a localizar posibles puntos de fugas de CO_2, con la condición de que las imágenes posean una alta resolución espacial.

Las imágenes hiperespectrales ofrecen una mayor resolución espectral que facilitaría la identificación de sutiles afecciones en la vegetación así como cambios en el suelo debido al exceso de CO_2.

PROPUESTAS

Las imágenes a utilizar tienen que tener una mayor calidad en la resolución espacial. Una disminución en el tamaño del píxel permitirá determinar con más precisión las zonas de vegetación estresada, suelo descubierto y alteraciones minerales del suelo.

La periodicidad de adquisición de imágenes hipespectrales es esencial para la elaboración del estudio de línea base relacionadas con las fluctuaciones naturales de CO_2 en el ciclo del carbono, para así establecer cuando un lectura de CO_2 es debido a fugas de un reservorio de almacenamiento o son inherentes al emplazamiento.

Tomando como referencia el trabajo realizado por Govindan, R, et. al. (2010), se propone la utilización de la teoría Dampter Shafer (teoría probabilística de fusión de información), para el análisis de píxeles atípicos. Los píxeles atípicos serían determinados usando la metodología de filtrado geoestadístico de imagen basado en la función aleatoria intrínseca, análisis de componentes independientes y la detección de anomalías Reed-Xiaoli. La fusión de la información procedente del análisis de los píxeles anómalos y de la evaluación de los efectos indirectos de fugas de CO_2 a lo largo del tiempo, a través del estudio de la vegetación estresada y/o las alteraciones minerales, permitiría asignar una medida de confianza para cada píxel anómalo, lo que facilitaría la identificación de fugas potenciales.

BIBLIOGRAFÍA

GOVINDAN, R., ANNA KORREA, A., DURUCANA, S. y IMRIEA C. E. (2010). *A geostatistical and probabilistic spectral image processing methodology for monitoring potential CO_2 leakages on the surface*. Int. J. Greenhouse Gas Control.

IPCC, GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono: Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*.

MALE, E. J., PICKLES, W., SILVER, E. A., HOFFMANN, G. D., LEWICKI, J. L., APPLE, M. E., REPASKY, K. S., DOBECK, L. y BURTON, E. A. (2009). *Monitoring Surface CO_2 leaks using hyperspectral plant signatures during the 2008 and 2009 ZERT shallow subsurface CO_2 release experiment in Bozeman, MT*. American Geophysical Union.

ROUSE, J.H., SHAW, J. A., LAWRENCE, R.L., LEWICKI J.L., DOBECK L.M., REPASKY K.S. y SPANGLER, L.H. (2010). *Multi-spectral imaging of vegetation for detecting CO_2 leaking from underground.* Montana State University. Published by Springerlink.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó dentro del marco del proyecto “Estrategias de monitorizacion de CO2 y otros gases en los estudios de análogos naturales”, financiado por la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN) y coordinado por AMPHOS XXI Consulting S.L.

Aplicación de datos del satélite EO-1 para la caracterización de la influencia de las actividades mineras en la región de Almadén

T. Schmid, C. Rico, M.J. Sierra, J. Rodríguez, M. Rodríguez y R. Millán

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Departamento de Medio Ambiente. Avenida Complutense 22, 28040 Madrid, España. Tel: 913466232, Fax: 913466269.
e-mail: thomas.schmid@ciemat.es

RESUMEN

La mayor concentración mundial de mercurio se localiza en el área minera de Almadén (España). Las actividades mineras han dominado la zona hasta su clausura en 2002, a partir de la cual, actividades alternativas agrícolas, ganaderas y turísticas se plantean como objetivos de futuro; en este contexto, la rehabilitación de las superficies directamente afectadas por la minería se muestra como una clara prioridad. El objetivo de este trabajo es la evaluación de datos de imágenes hiperespectrales y multiespectrales del satélite Earth Observing-1 (EO-1) para caracterizar áreas afectadas por la minería del mercurio y localizar las zonas donde se están llevando a cabo las actividades alternativas en la región. Los resultados iniciales de la clasificación llevados a cabo con Support Vector Machine muestran una elevada exactitud en la identificación de los usos del suelo existentes en la región de Almadén.

Palabras clave: Almadén, minería de mercurio, usos del suelo, EO-1 Hyperion y ALI.

ABSTRACT

The largest mercury concentration is situated in Almadén, Spain. Mining activities have dominated in the region till the closure of the mines in 2002 and alternative land use has gained importance after the mining activities ceased. The rehabilitation of areas affected by the mining are the main priority within the region. The applied objective is to evaluate data from the hyperspectral and multispectral sensors of the Earth Observing-1 (EO-1) to characterize areas affected by mercury mining and locate the areas where alternative activities are carried out within the region. Classification results carried out with Support Vector Machine shows an initial high accuracy for identifying the corresponding land use activities carried out within the region of Almadén.

Keywords: *Almadén, mercury mining, land use, EO-1 Hyperion and ALI.*

INTRODUCCIÓN

La zona minera de Almadén abarca más de dos mil años de historia de minería de mercurio, habiendo representado dichas actividades un tercio del mercurio total producido en el mundo hasta la clausura de la mina en 2002, tras lo cual, la región sufre un marcado declive económico. A partir de entonces, actividades alternativas enmarcadas en la agricultura, la ganadería y el turismo se presentan como perspectivas relevantes en la economía local. En este contexto, la caracterización del estado ambiental en torno a las zonas de actividad minera, constituye una clara prioridad, como base para la definición y delimitación espacial de los usos de suelo más adecuados, así como para la rehabilitación de las áreas directamente afectadas por las actividades mineras (Millán *et al*., 2006).

Numerosos estudios han sido llevados a cabo en áreas mineras mediante el análisis de datos con técnicas de teledetección. (Levèsque y Staenz, 2008). Por otro lado, existen varios métodos para la clasificación de imágenes que utilizan distintas herramientas **(**Rico *et al*., 2008; Rico *et al*., 2010) afirmando varios estudios que algoritmos de aprendizaje artificial como el Support Vector Machine (SVM) son más precisos que los clasificadores convencionales (Demirel *et al*. 2011).

El presente trabajo está basado en la evaluación de datos hiperespectrales y multiespectrales del satélite *Earth Observing-1* (EO-1), con el objeto de caracterizar áreas afectadas por la

minería del mercurio y localizar las zonas donde se están llevando a cabo las actividades alternativas en la región. Los objetivos específicos incluyen: 1) selección de los usos del territorio más representativos, así como de posibles superficies asociadas a antiguas actividades mineras; 2) identificación de puntos de entrenamiento; y 3) aplicación del algoritmo SVM para la extrapolación, al conjunto de la zona de influencia de la minería de mercurio.

DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La zona minera de Almadén, situada en la provincia de Ciudad Real, dentro de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha (Figura 1), se encuentra en un ámbito de clima mediterráneo entre los 500 y 600 m de altitud con temperaturas medias anuales en torno a los 16 ºC.

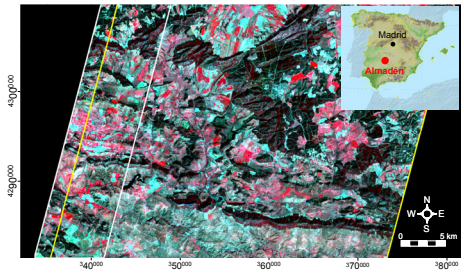


Figura 1: Área de estudio en el entorno de Almadén (EO-1 Hyperion (limite blanco) y ALI (limite amarillo), de 02/04/08, composición de falso color 833, 661 y 569 nm, en RGB)

El sustrato geológico de la zona minera de Almadén, se encuentra en el contexto de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico. Las mineralizaciones de mercurio se localizan especialmente en la denominada "Cuarcita del Criadero". Morfológicamente, destacan marcadas alineaciones en dirección E-W de los estratos más competentes (cuarcitas), frente a los valles conformados por pizarras, que definen la red hidrográfica principal, correspondiente a la cuenca del Guadiana, con los ríos Valdeazogues y Alcudia como cauces más relevantes.

Predominan suelos de reacción ácida y de escaso contenido en materia orgánica, de limitado desarrollo y texturas gruesas en las alineaciones cuarcíticas y depósitos asociados, y de mayor desarrollo, con texturas finas, en las laderas bajas pizarrosas. De acuerdo con el sistema de clasificación *Soil Taxonomy*, se definen los órdenes Entisoles, Inceptisoles y Alfisoles (Millán *et al*., 2006). La vegetación potencial, se define por formaciones arbóreas esclerófilas, con predominio de las series de la encina y presencia local de las del alcornoque.

METODOLOGÍA

La metodología establecida implica, la adquisición de las imágenes satélite, su preprocesamiento, la selección de las clases a introducir en el clasificador, la aplicación del clasificador y la verificación de resultados. Las imágenes seleccionadas fueron obtenidas del *U.S Geological Survey* a partir de *Earth Resources Observation Systems and Science (EROS) Center*. Corresponden al satélite EO-1 y fueron tomadas el 2 de abril de 2008. Las imágenes multiespectrales e hiperespectrales provienen del sensor ALI y *Hyperion*, respectivamente. A dichas imágenes se aplicaron correcciones sistemáticas para la recuperación de bandas con líneas erróneas y para la eliminación de bandas perdidas, quedando finalmente 154 bandas de las 242 de partida. La imagen de ALI se compuso en un mosaico a partir de cuatro líneas de vuelo. Para la corrección radiométrica, ambas imágenes fueron corregidas atmosféricamente con la herramienta FLAASH del programa ENVI. La corrección geométrica se realizó mediante puntos de lugares fácilmente identificables, tomados sobre las imágenes y verificados con fotografías aéreas. En la imagen de Hyperion fueron necesarios 59 puntos de control con un error medio cuadrático (RMS) de 0.33. La imagen de ALI se georreferenció a partir de 100 puntos de control con un RMS de 0.37.

Para la identificación, cuantificación y análisis de la respuesta espectral de las superficies constituyentes del paisaje, se ha utilizado la clasificación supervisada basada en el algoritmo SVM. Previo a la clasificación, se requiere elegir los datos de partida para introducirlos en el clasificador en forma de regiones de interés (ROI), que corresponderán a cada una de las clases, referidas a un tipo de superficie, que resulten en la imagen final. Las clases seleccionadas corresponden a las siguientes superficies: área urbana, escombrera, agua, suelo desnudo, suelo desnudo con vegetación seca, cultivos y área forestal. En ambas imágenes se seleccionaron 30 píxeles de entrenamiento para cada clase (Foody, 2006) y se implementaron en la función de Kernel "Radial Basis Function" (RBF).

RESULTADOS

Los sitios de entrenamiento seleccionados presentan las siguientes características básicas: ***Área urbana***: constituida por superficies edificadas, parques urbanos o zonas deportivas. ***Área forestal***: formada por un estrato arbóreo denso principalmente de pinos (*P.pinaster* y *P.pinea* y encinas (*Q.ilex spp ballota)*. ***Suelo desnudo***: suelo sin vegetación asociado a superficies parcelas de cultivo en barbecho. ***Superficies antropizadas:*** asociado a superficies pavimentadas (carreteras), caminos, eriales, así como a parcelas agrícolas con cobertura de rastrojo o paja de cereal, y en general, vegetación sin vigor. ***Escombrera***: superficie resultante de la acumulación de tierras, residuos de minería o movimientos de tierras recientes. ***Cultivos***: áreas dedicadas a la producción agrícola, principalmente cebada, maíz y alfalfa. ***Dehesa***: presenta un estrato arbóreo muy disperso, con estrato inferior de pastizales, matorrales o suelo desnudo. ***Pastizal***: presenta cobertura herbácea prácticamente continua, localmente de matorral. ***Lámina de agua***: incluye superficies de embalses, y, cauces.

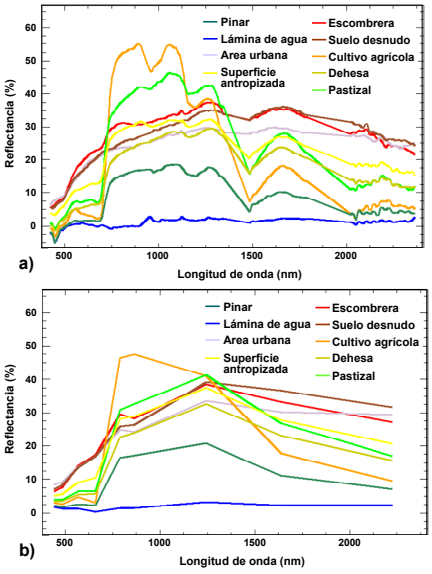


Figura 2: Características de los sitios de entrenamiento obtenidos de los datos de a) Hyperion y de b) ALI.

Estos sitios de entrenamiento han sido seleccionados dentro de áreas en las que pueden ser realizadas repetidas observaciones, que pueden ser a su vez comparadas con datos espectrales de campo, previamente obtenidos (Rico et al., 2010). Como puede observarse, el nivel de detalle representado en las curvas provenientes del sensor hiperespectral (Figura 2) es mayor al proporcionado por las provenientes del sensor multiespectral debido a la diferente resolución espectral. El sensor ALI muestra toda la información en 9 bandas en el espectro electromagnético mientras que Hyperion muestra información en 154 bandas, por ello, pueden perderse detalles en la firma espectral de ALI, tales como las propiedades superficiales de escombrera, suelo y vegetación observada en Hyperion. Por otro lado, el agua presenta bajos valores de reflectividad en el visible y en el infrarrojo cercano y medio, ya que la mayor parte de la energía es absorbida por este cuerpo en estas regiones del espectro.

La clasificación realizada mediante el algoritmo SVM, que implementa los anteriormente citados sitios de entrenamiento, ha sido obtenida tanto para el sensor Hyperion como para el ALI.

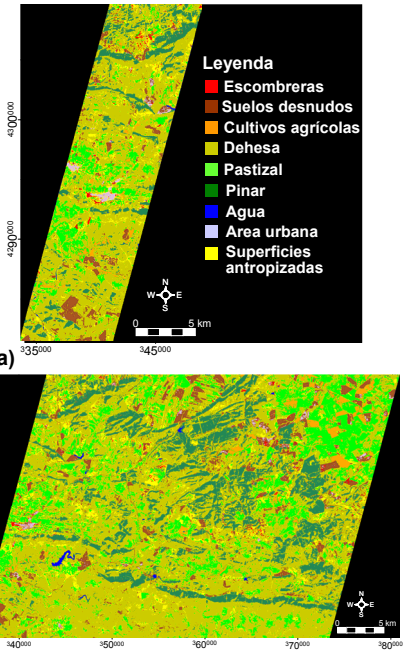


Figura 3: Clasificación de usos de suelos aplicando los datos de a) Hyperion y b) ALI.

El uso de suelo predominante en el área común de las imágenes de Hyperion y ALI es la dehesa, ocupando más de la mitad del territorio (62% en Hyperion y 54% en ALI). Las siguientes clases en importancia son las de pastizal y

forestal, con un 17.2% de pastizal y un 9.2% forestal en ALI, frente a 9,2% y 10,2%, respectivamente, en Hyperion. Las superficies de mayor influencia antrópica muestran porcentajes significativos, con menores diferencias entre imágenes: así, ALI muestra porcentajes de 7,6% para suelo desnudo, 7,8% para superficies antropizadas y 3,0% para cultivo, mientras que en Hyperion dichos porcentajes son de 6,6%, 6,8%, y 2.5% respectivamente. En relación con las actividades mineras, las áreas ocupadas por escombreras muestran un total de 0.6% y 1% para ALI y Hyperion, respectivamente.

La validación de las clasificaciones ha sido llevada a cabo con una precisión general, que, debido al limitado número de puntos de control disponibles, no debe considerarse representativa. En la fase actual de trabajo, se está planificando la ubicación precisa de un número mayor de puntos de control, en orden a desarrollar una correcta validación.

Al comparar estos resultados con anteriores campañas de muestreos y antiguos mapas de usos del suelo, se observa una disminución de las áreas afectadas por las actividades mineras, tras el cierre de la mina en 2002, y de acuerdo con el trabajo que ha sido llevado a cabo por la compañía Minas de Almadén y Arrayanes, S.A. Por otro lado, están aumentando los usos del suelo relativos a las actividades alternativas, principalmente áreas de cultivo y reforestación.

CONCLUSIONES

La clasificación de los datos hiperespectrales y multiespectrales con el SVM permiten distinguir superficies relacionadas con los distintos usos del suelo, tales como áreas de forestación, pastizales, cultivos, dehesas y superficies cubiertas de agua, así como en las áreas relacionadas con actividades mineras, donde se identifican escombreras.

La selección de sitios de entrenamiento resulta determinante para la clasificación en ámbitos como el estudiado, donde las clases individuales pueden variar sustancialmente en función del uso concreto del terreno.

El empleo de datos procedentes de EO-1, junto a la combinación de datos hiperespectrales y multiespectrales, posee la ventaja, por una parte, de aportar información espectral detallada y, por otra, de una amplia cobertura de la imagen que llega a cubrir el conjunto del área de influencia minera.

BIBLIOGRAFÍA

DEMIREL, N., KEMAL-EMIL, M., SEBNEM-DUZGUN H., 2011. *Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery.* International Journal of Coal Geology. 86, pp 3–11.

FOODY, G. M., MATHUR A., 2006. *The use of small training sets containing mixed pixels for accurate hard image classification: Training on mixed spectral responses for classification by a SVM.* Remote Sensing of Environment 103, pp. 179–189.

LEVÉSQUE, J., STAENZ, K. 2008. *Monitoring mine tailings revegetation using multitemporal hyperespectral image data*. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 34, Suppl.1 pp. S172 – S186.

MILLÁN, R., GAMARRA, R., SCHMID, T., SIERRA, M.J., QUEJIDO, A.J., SÁNCHEZ., D.M., CARDONA, A.I., FERNÁNDEZ, M., VERA R. 2006. *Mercury content in flora and soils for the Almadén mining area (Spain)*. Sci. Total Environ, Elsevier, 368 (1), pp. 79-87.

RICO, C., SCHMID, T., MILLÁN, R., GUMUZZIO, J. 2010. *Estudio de la influencia de las Actividades Mineras de Mercurio en la Comarca de Almadén aplicando técnicas de teledetección*. Informes Técnicos Ciemat.

RICO, C., SCHMID, T., MILLÁN, R., SIERRA, M.J., CARRASCO, S., 2008. *Application of multi-sensor optical data for monitoring land uses within the mercury mining area of Almadén, Spain*. IGARSS IEEE International, V: 208-211.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Stephen Ungar y al Dr. Lawrence Ong del Goddard Space Flight Center de la NASA, las facilidades dadas en la adquisición de datos EO1/Hyperion. La investigación llevada a cabo por los autores se fundamenta en diferentes proyectos en el marco del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo.

El uso de imágenes de satélite como fuente de prueba en el procedimiento administrativo y contencioso-administrativo

C. Sirvent y S. Montesinos

GEOSYS, S.L. Sector Foresta 23, locales 7 y 8. 28760 Tres Cantos (Madrid, España). Correo electrónico: smontesinos@geosys.es

RESUMEN

Los satélites generan mucha información de la superficie y de la atmósfera de la Tierra. A pesar de sus características y de los beneficios que pueden ofrecer estas imágenes a la observación, análisis, interpretación y gestión ambiental, aún no existe en los Tribunales una concepción clara sobre esta fuente de prueba. Este estudio analiza el uso de los datos de observación de la Tierra en el sector jurídico, y más concretamente en los procedimientos administrativos y contencioso-administrativos, puesto que el derecho ambiental cae sustancialmente dentro del campo del derecho administrativo. Asimismo, se pretende aclarar el uso de estas imágenes como medio de prueba pericial en el proceso español y analizar la jurisprudencia actual de los Tribunales.

Palabras clave: medios de prueba, teledetección en procesos judiciales, prueba pericial.

ABSTRACT

Satellites generate information on Earth's surface and atmosphere. Despite its features and benefits that can provide these images to the observation, analysis, interpretation and environmental management, not yet available in the courts a clear conception of this source of evidence. This study analyzes the data using Earth observation in the legal sector, and particularly in administrative proceedings and administrative litigation, since the environmental law falls substantially within the field of administrative law. It also seeks to clarify the treatment of these images as a means of expert evidence in the Spanish process and analyze the current jurisprudence of the Tribunals.

Keywords: evidence, remote sensing in legal procedures.

INTRODUCCIÓN

Los satélites generan una gran cantidad de información de la superficie y de la atmósfera de la Tierra. Desde que los satélites suministran esta información, existe un gran potencial para que la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica puedan ayudar al Derecho a una mejor protección del medioambiente.

A pesar de sus características y los beneficios de estas imágenes en la observación, análisis y gestión ambiental, aún no existe en los Tribunales una concepción clara sobre esta fuente de prueba.

La aplicación de las imágenes de satélite en los procedimientos legales tiene ventajas: mejoras en la exactitud geográfica, en la relación espacio-temporal, ahorro de costes en la recopilación de datos, etc.

Pero a veces, por desconocimiento o por un mal tratamiento procesal de las mismas, no nos beneficiamos de su potencial en los procesos judiciales. En la mayoría de los casos analizados se ha podido observar una inadecuada inclusión en el procedimiento, aportando dichas imágenes como mera prueba documental y no pericial y, en muchos de los casos, no dándole su valoración adecuada.

La prueba pericial es cada día más relevante para la decisión de los litigios ante cualquiera de las jurisdicciones, pues las cuestiones técnicas y científicas inciden con mayor frecuencia en las relaciones jurídicas.

Los Tribunales deben valorar la prueba practicada, y fijar su relevancia en el proceso conforme a un criterio lógico y explícito, que sirva para disipar cualquier arbitrariedad y permita a la parte a la que no favorezca la apreciación, instar la revisión de esa valoración probatoria ante un Tribunal superior, de segunda instancia.

LA PRUEBA Y SUS CLASES

La prueba puede definirse como la actividad procesal por la que se tiende, en primer lugar, a alcanzar el convencimiento psicológico del juzgador sobre la existencia de los hechos o datos aportados en el proceso y, en segundo lugar, a fijarlos conforme a una norma legal. En nuestro Derecho, y atendiendo al art. 217 de la Ley 1/2000 de Enjuiciamiento Civil (en adelante LEC), rige en los procedimientos judiciales el principio de aportación de parte, el cual atribuye a las partes la carga de la prueba.

Por tanto, lo importante procesalmente son los medios de prueba y nuestro Derecho positivo nos ofrece una enumeración de los mismos en el art. 299 LEC y se refiere: 1º) interrogatorio de las partes, 2º) documentos públicos, 3º) documentos privados, 4º) dictamen de peritos, 5º) reconocimiento judicial, y 6º) interrogatorio de testigos.

En la Doctrina se viene recogiendo la discusión sobre si la enumeración dada por la Ley sobre los medios de prueba, es una enumeración taxativa o enunciativa, es decir, si estos medios de prueba pueden considerarse como un *numerus clausus o apertus*.

Lógicamente, todas las leyes atienden a la situación de su tiempo y no pueden regir sino lo existente en su momento. Pero ello, no puede suponer que queden fuera del proceso los nuevos instrumentos que la ciencia y la técnica van ofreciendo.

Lo que las leyes deben regular son los medios de prueba, como actividad para incorporar la fuente al proceso y estos medios sí serán un *numerus clausus* máxime si se tiene en cuenta que la actividad jurisdiccional está sujeta al principio de legalidad (Montero, 2000).

En consecuencia el único problema surgirá a la hora de determinar por qué medio de prueba entra una nueva fuente en el proceso.

LA PRUEBA EN EL PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO Y CONTENCIOSO-ADMINISTRATIVO

La actividad de la Administración siempre debe velar por el interés general, característica intrínseca que legitima su actuación.

El procedimiento administrativo es la primera de las garantías que supone el deber de canalizarse a través de unos cauces determinados, y esto es lo que permite que pueda ser calificada como actividad legítima.

El sistema de recursos administrativos contra los actos y disposiciones emanados de la Administración constituye, en principio, una garantía que permite a los administrados reaccionar frente a los actos y disposiciones lesivos a sus intereses y obtener, eventualmente, su anulación, modificación o reforma (García de Enterría y Fernández Tomás, 2000).

Consecuentemente, si este sistema de recursos no satisface al administrado, que considera que los actos y disposiciones de la Administración han sido lesivos a sus intereses, éste puede acudir a los Tribunales que son los que definitivamente se pronunciarán sobre la legalidad de la actuación administrativa, iniciándose por tanto, el procedimiento contencioso-administrativo en los Juzgados o Tribunales.

El problema de la prueba es una cuestión central en todo procedimiento, tanto administrativo como contencioso, y cualquiera que sea su rama jurídica.

En el procedimiento administrativo, donde la Administración es juez y parte, rige con carácter general el principio de oficialidad de la prueba, según el cual, el órgano administrativo está obligado de oficio, incluso aunque no medie petición de los interesados, a desarrollar todas las actividades probatorias que se consideren adecuadas para el conocimiento y comprobación de los datos sobre los que deba pronunciarse la resolución o acto administrativo y así lo dispone el art. 78.1 de la Ley 30/1992 de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

Pero hay que advertir, que este deber de la Administración que resulta del principio de oficialidad de la prueba no excluye, en absoluto, la posibilidad de que los interesados puedan aportar al procedimiento cuantas pruebas tengan por conveniente, regla general que rige el procedimiento contencioso-administrativo y civil.

Por otro lado, el terreno probatorio del procedimiento contencioso-administrativo está regulado, por una parte, por la Ley Reguladora de la Jurisdicción Contencioso-Administrativa de 1998 y, otra parte supletoria, por la Ley de Enjuiciamiento Civil de 2000, unido a las interpretaciones del Tribunal Constitucional, así como a la Sala de lo Contencioso-Administrativo del Tribunal Supremo que ponen coherencia en los Juzgados de lo Contencioso-Administrativo y de los Tribunales Superiores de Justicia.

LA TELEDETECCIÓN COMO MEDIO DE PRUEBA PERICIAL

La prueba pericial o el dictamen de peritos es un medio de prueba (art. 299.1.4ºLEC) por la que una persona ajena al proceso, con conocimientos especializados (científicos, artísticos, técnicos o prácticos), que el juez no tiene, aporta estos conocimientos al mismo para que el órgano jurisdiccional pueda valorar mejor los hechos o circunstancias relevantes en el asunto, o adquirir certeza sobre ellos.

La regulación de este medio de prueba aparece básicamente en los arts. 335-352 LEC.

En el caso de la teledetección como prueba pericial, y con objeto de poder conocer en el proceso su contenido y sentido, no parece presentar duda alguna, ya que no sería posible su interpretación sin el conocimiento de los instrumentos de aplicación de las ciencias de un perito. Y ésta es una de las conclusiones extraídas de la Jurisprudencia (Sentencia de 4 febrero 2010 Audiencia Nacional de la Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 1ª, entre otras).

En muchos de los casos, en los que se han presentado imágenes de satélite como medio de prueba documental, en vez de pericial, no se le ha otorgado la valoración que le corresponde, siendo aún, hoy día, objeto de discrepancia su tipología como medio de prueba en algunos Tribunales.

El deber primordial de los peritos es elaborar el dictamen correctamente, es decir, aplicando científicamente los conocimientos profesionales adquiridos y que se requieren para el caso concreto, lo que se resumen en la fórmula del juramento o promesa del art. 335.2 LEC. Para ello, tienen la obligación también de comparecer al juicio o vista para la ratificación del dictamen, proceder a su explicación y emitir las respuestas a preguntas, objeciones o solicitudes de ampliación de dicho dictamen.

El Juez o Tribunal, podrá formular preguntas y requerir explicaciones a los peritos y esta prueba pericial, según como establece el art. 348 LEC, será valorada libremente por el Juez no quedando sujeto al dictamen de los peritos (Font, 2000).

La jurisprudencia exige al Juez que motive o exponga el razonamiento seguido para no aceptar o para rechazar las conclusiones a las que ha llegado el perito, lo que tiene la ventaja además de posibilitar el posible control en fase de impugnación (SSTS de 8 de febrero de 1989 y de 17 de junio de 1996, entre otras).

LA TELEDETECCIÓN EN LOS TRIBUNALES

Desde las primeras sentencias en las que aparecen las imágenes de satélite aportadas al proceso, puede apreciarse que no existe una uniformidad en su tratamiento, y ni siquiera, en su consideración como medio de prueba. La Sentencia 11 de mayo de 1998 del Tribunal Superior de Justicia de Castilla la Mancha, que fue la primera que recoge la teledetección como prueba en un proceso judicial en España (Montesinos et al., 1999), la consideró como prueba documental, con las limitaciones derivadas de tal consideración. Teniendo la prueba carácter documental, impedía que un experto pudiera acudir al acto de la vista para exponer y explicar el tratamiento de las imágenes y cómo se había obtenido la información de ellas, con lo cual, es muy fácilmente desacreditada.

A raíz de que algunas de las Confederaciones Hidrográficas empezaron a utilizar esta fuente de datos para la implementación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, se produjo un aumento de sentencias en las que las imágenes de satélite eran la prueba aportada por parte de la Administración en los procedimientos de reclamación de derechos de agua de los particulares. Pero, como se puede apreciar en las mismas, tanto por su inadecuado medio de prueba e incluso, en ocasiones, por su aportación extemporánea, se han venido produciendo muchas reticencias y descrédito en su valoración, en contraposición a otras pruebas, como pueden ser las Actas de comprobación de los técnicos, con las limitaciones que conllevan (puede observarse a modo de ejemplo en este sentido las recientes: Sentencia de 31 marzo 2009 del Tribunal Supremo -Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 5ª; y Sentencia de 20 mayo 2009 del Tribunal Supremo -Sala de lo Contencioso-Administrativo, Sección 5ª).

En las sentencias del Tribunal Supremo, como la Sentencia de 12 noviembre 2004, se recogen frases como: "…*resultado de la teledetección supuestamente realizada con el satélite Landsat, cuyas imágenes se consideran insuficientes y cuya incorporación al expediente se ha producido sin cumplir los requisitos mínimos de seguridad procesal que les proporcionen validez, al figurar las imágenes en blanco y negro, y, resultando imposible identificar las fincas al no constar en las fotografías ninguna referencia catastral; la citada prueba es calificada de prueba de parte, secreta y oculta, en la que no se identifica el lugar exacto de realización, ni la fecha de la misma y con la que se rompe el*

equilibrio procesal al no poder ser contradicha por las partes…"; que muestran claramente el mal uso que se realiza en los procedimientos judiciales.

Asimismo, en los distintos Tribunales Superiores de Justicia de las diferentes Comunidades Autónomas, también encontramos discrepancias en la valoración de la prueba. Por una parte, el Tribunal Superior de Justicia de Extremadura, en su Sentencia de 20 marzo de 2000 establece: "*no cabe oponer a esa valoración de la prueba la genérica argumentación que se constata en la Memoria del Análisis Complementario mediante Teledetección de los Aprovechamientos que se ha remitido como ampliación del expediente, pues dicha Memoria, por su generalidad, parte de unas circunstancias que no pueden desvirtuar el resultado de aquellas actas, cuales son la superficie de las zonas de riego, la temporada y las calificaciones de dudosas*.", donde evidencia claramente la falta de certeza de los datos utilizados (también en su Sentencia de 25 de noviembre de 2002); o el Tribunal Superior de Justicia de C. Valenciana que en su Sentencia de 11 julio de 2007 recoge: "*La Sala estima que la Administración no debió reseñar en la inscripción del mencionado aprovechamiento de aguas AB0180 en el Catálogo de Aguas Privadas un volumen máximo anual de 468.000 m^3 fundándose en las conclusiones del estudio realizado mediante técnicas de teledetección precitado, habida cuenta que obraba en el expediente un acta de confrontación sobre el terreno en la que el técnico de la CHJ actuante afirmaba que había comprobado que los datos aportados por el peticionario coincidían con la realidad y que el volumen máximo anual era de 860.000 m^3, por lo que los datos consignados en tal acta debían tenerse por fehacientemente probados y, en consecuencia, prevalecer frente a los datos obtenidos por teledetección a través de las imágenes suministradas por satélite..*"

Pero por otro lado, hay otros como el Tribunal Superior de Justicia de Castilla-La Mancha que otorgan a las imágenes de teledetección mayor valoración como prueba como recoge la Sentencia de 26 junio de 2008.

CONCLUSIONES

No obstante, el conocimiento personal del Juez sobre una determinada materia científica o técnica puede servir a la hora de realizar la función valorativa de la prueba aportada como pericial. Si ésta ha de valorarse según los criterios de la sana crítica, podrá realizarse una mejor valoración desde el conocimiento de la materia, que desde la absoluta ignorancia.

Por ello, los prejuicios que llevan al mundo jurídico y a sus profesionales a enmarcarse en un mundo de conocimientos exclusivamente de las letras, son imágenes negativas que han de ir siendo desterradas. El conocimiento de las nuevas aplicaciones ha de servir para poder valorar críticamente las opiniones expertas de los técnicos y beneficiarse de las ventajas que pueden aportar estos medios para el esclarecimiento de los hechos. El mayor grado de conocimiento de los jueces sobre las cuestiones a que se refiere el dictamen ha de servir para que se entable un diálogo con el perito, tanto en lo que respecta a los puntos de partida fácticos que ha tenido en cuenta al emitir su dictamen, como en lo referente al informe mismo: tipos de sensores, método de correcciones aplicado, variables ambientales, conclusiones a las que ha llegado y posibles alternativas, etc. De este modo, la prueba cobra toda su importancia, y el Juez estará en condiciones de efectuar su valoración conforme a la capacidad de la sana crítica. La valoración de la prueba se expresará así en la fundamentación jurídica como un juicio sobre el juicio del experto, en la medida en que sea necesario justificar la decisión, en supuestos en que el Juez se aparte de las conclusiones del perito o existan informes contradictorios.

BIBLIOGRAFÍA

FONT SERRA, E, 2000. *El dictamen de los peritos en la nueva Ley de Enjuiciamiento Civil*. Cuadernos de Derecho Judicial. La prueba, 104 – 120.

GARCÍA DE ENTERRÍA, E y FERNÁNDEZ, TOMÁS, R., 2000. *Curso de Derecho Administrativo II*. (7ª ed.) Ed. Civitas.

MONTERO AROCA, J., 2000. *El nuevo proceso civil* (Ley 1/2000). Ed. Tirant lo Blanch.

MONTESINOS, S.; MANZANO, R.; DE STEFANO, L.; LUNA, E. y ARAGÓN, JR. 1999. *Reconocimiento de aprovechamientos en regadío con aguas subterráneas. Discusión, metodología y marco legal*. Revista de teledetección 12.

Teledetección térmica en la Reserva Biológica de Doñana

J. A. Sobrino[1], G. Sòria[1], J. C. Jiménez-Muñoz[1], J. Amorós[2], J. Bustamante[3] y R. Díaz[3]

[1] UCG-LPI. Universitat de València. Parc Científic. C/ Catedrático Agustín Escardino, nº 9. 46980 Paterna (Valencia, España). Correo electrónico: sobrino@uv.es

[2] GPDS-LPI. Universitat de València. Parc Científic. C/ Catedrático Agustín Escardino, nº 9. 46980 Paterna (Valencia, España).

[3] LAST-EBD. CSIC. C/ Américo Vespucio, s/n. 41092 Isla de la Cartuja (Sevilla, España).

RESUMEN

Durante los meses de abril de 2008 y mayo de 2010 se realizaron una serie de actividades de Teledetección Térmica en la Reserva Biológica de Doñana (RBD), dentro del marco del proyecto HYDRA dedicado al estudio de la dinámica de inundación de las marismas. Estas actividades incluyeron la realización de medidas in situ con espectro-radiómetros operando en el rango visible e infrarrojo cercano y radiómetros térmicos de bandas ancha (8-13 μm) y multibanda, así como la adquisición de imágenes de alta resolución mediante el sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) gestionado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Así mismo, durante el mes de mayo de 2010, se instalaron de forma permanente dos radiómetros térmicos en dos torres fijas distintas, con el fin de disponer de datos diarios de temperatura de forma continua para la calibración y validación periódica de imágenes proporcionadas por los satélites de Observación de la Tierra de media y baja resolución. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos en relación a la caracterización radiométrica de las distintas superficies presentes en la RBD a través de la medida de espectros de reflectividad y emisividad, así como los productos de Temperatura y Emisividad de la Superficie Terrestre derivados de las imágenes AHS.

Palabras clave: teledetección térmica, temperatura, emisividad, reflectividad, AHS.

ABSTRACT

Different activities related to thermal remote sensing were carried out in April 2008 and May 2010 at the Doñana Biological Reserve (RBD) in the framework of the HYDRA project, focused on the study of marshals flooding dynamics. These activities included collection of in situ measurements with spectro-radiometers working in the visible and near infrared spectral range and broadband (8-13 μm) and multiband thermal radiometers, as well as the acquisition of high resolution images from the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) sensor operated by the Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). During May 2010 two thermal radiometers were placed on fixed towers in order to continuously collect daily temperature values for imagery calibration and validation provided by medium and low resolution sensors onboard Earth Observation satellites. This work shows results obtained in the radiometric characterization of natural surfaces located in the RBD through reflectivity and emissivity spectra, as well as AHS derived products of Land Surface Temperature and Emissivity.

Keywords: *thermal remote sensing, temperature, emissivity, reflectivity, AHS.*

INTRODUCCIÓN

El término teledetección térmica hace referencia a las medidas realizadas con un determinado sensor ubicado a bordo de una plataforma como un avión o satélite que registra la radiación electromagnética emitida por la superficie en la región del infrarrojo térmico (típicamente entre los 8 y 13 μm).

Los datos térmicos son una fuente fundamental de información tanto cualitativa como cuantitativa acerca de los procesos que ocurren en la superficie terrestre, permitiendo por tanto su caracterización, análisis y modelización (Quattrochi y Luvall, 2000). La Temperatura de la Superficie Terrestre (TST), junto con la Emisividad de la Superficie Terrestre (EST), son las variables fundamentales que pueden obtenerse mediante teledetección térmica.

En este trabajo se muestran los resultados

obtenidos en el marco del proyecto HYDRA, cuyo objetivo es la reconstrucción histórica de la dinámica de inundación de las marismas de Doñana mediante teledetección. En el marco de este proyecto, se realizaron en la Estación Biológica de Doñana las campañas HYDRA-2008 (26, 27 y 28 de Abril de 2008) e HYDRA-2010 (4 y 5 de mayo de 2010), durante las cuales se adquirieron imágenes de alta resolución con el sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) y se realizaron medidas in-situ de temperatura, emisividad y reflectividad, tal y como se detalla en la siguiente sección.

METODOLOGÍA

Instrumentación y medidas in situ

Durante las campañas HYDRA se realizaron una serie de medidas de temperatura, emisividad y reflectividad con el fin de caracterizar espectralmente los distintos tipos de superficie de la RBD, así como poder calibrar y validar los resultados obtenidos a partir de las imágenes AHS. Las medidas de reflectividad se realizaron con un espectro-radiómetro ASD FieldSpect Pro FR (rango 0.35-2.5 µm) en el año 2008 y un espectro-radiómetro GER 1500 (rango 0.35-1.05 µm) en el año 2010. Las medidas de temperatura se realizaron con una serie de radiómetros de banda ancha 8-14 µm (modelos Raytek ST y Everest), así como con los radiómetros multi-banda CIMEL CE 312-1 (3 bandas espectrales) y CIMEL CE 312-2 (5 bandas espectrales), este último utilizado también para obtener la emisividad. Adicionalmente se realizaron termografías en distintas zonas utilizando una cámara térmica NEC-TH9100.

Por otra parte, durante la campaña HYDRA-2010 se instalaron de forma permanente dos radiómetros de banda ancha (modelo Apogee IR120) en las torres "Fuente Duque" y "El Ojillo". Estos datos están incorporados en la base de datos de la EBD y pueden obtener a través de la web http://icts.ebd.csic.es (sección "Parámetros atmosféricos", "Temperatura radiométrica").

Imágenes AHS

El sensor AHS está gestionado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y va instalado a bordo del avión CASA 212-2000 Paternina. Tiene un total de 80 bandas espectrales divididas en cuatro puertos correspondientes a las regiones visible e infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, infrarrojo medio e infrarrojo térmico (en inglés, VNIR, SWIR, MIR y TIR, respectivamente). Las bandas térmicas se incluyen en el último puerto, de la 71 a la 80, y tienen un ancho de banda inferior a 0.5 µm con un ruido (NEΔT) generalmente inferior a 0.3 ºC. El campo de visión (FOV) es de ±45º, con un campo de visión instantáneo (IFOV) de 2.5 mrad.

Durante las campañas HYDRA se realizaron una serie de vuelos a distintas alturas denotadas con las letras B, I y A en referencia a vuelos Bajo, Intermedio y Alto, siendo el tamaño de píxel de 2, 4 y 6 metros, respectivamente. En total se adquirieron 15 imágenes AHS durante la campaña HYDRA-2008 (6 imágenes el día 27 de Abril y 9 imágenes el día 29 de Abril) y 17 imágenes en la campaña HYDRA-2010 (10 imágenes el día 4 de Mayo y 7 imágenes el día 5 de Mayo). La Figura 1 muestra un ejemplo de imagen AHS sobre una zona de la RBD.

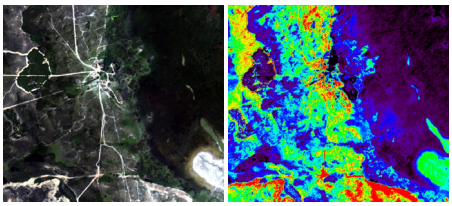


Figura 1: Imagen AHS adquirida en la Reserva Biológica de Doñana sobre la zona del Palacio: Composición RGB (izquierda) e imagen térmica (derecha).

Procesado de las imágenes

Las imágenes AHS son proporcionadas por el INTA en nivel 1b (valores de radiancias en $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$), junto con archivos Image Geometry Model (IGM) que permiten georeferenciar las imágenes.

A partir de las imágenes con valores de radiancias a nivel del sensor, se realiza la corrección atmosférica utilizando perfiles atmosféricos obtenidos con radiosondeos lanzados in situ y el código de transferencia radiativa MODTRAN4.

Una vez realizada la corrección atmosférica, los productos de TST y EST se obtienen mediante el algoritmo Temperature and Emissivity Separation (TES), desarrollado por Gillespie *et al.* (1998).

RESULTADOS

Caracterización radiométrica de las superficies

Durante las campañas HYDRA se realizaron una serie de medidas de temperatura, emisividad y reflectividad para la identificación de las superficies observadas a partir de las imágenes de teledetección, así como para realizar la corrección necesaria en la obtención de la temperatura de la superficie a partir de la temperatura radiométrica.

La figura 2 muestra los valores de reflectividad para distintos tipos de vegetación y superficies encontrados durante la campaña HYDRA 2008. La figura 3 muestra los valores de emisividad referidos a las mismas superficies.

En las figuras 4 y 5 encontramos los valores de reflectividad y emisividad, respectivamente, observados durante la campaña HYDRA 2010
Los valores de reflectividad se obtuvieron mediante los espectroradiómetros ASD FieldSpect Pro FR (año 2008) y GER 1500 (año 2010). Las medidas de emisividad se obtuvieron aplicando el método TES a los valores medidos por el radiómetro térmico CIMEL CE 312-2 (de 5 bandas espectrales).

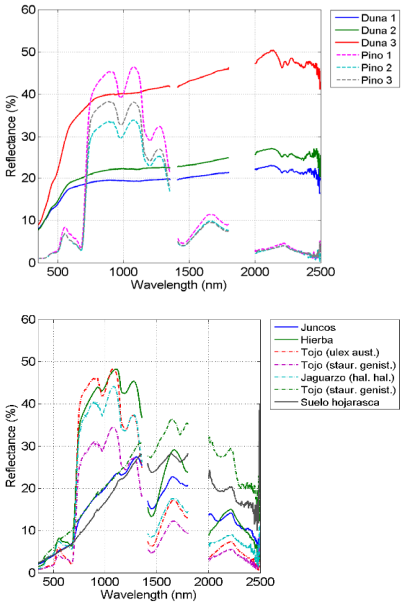


Figura 2: Valores de reflectividad para distintas superficies durante la campaña HYDRA 2008.

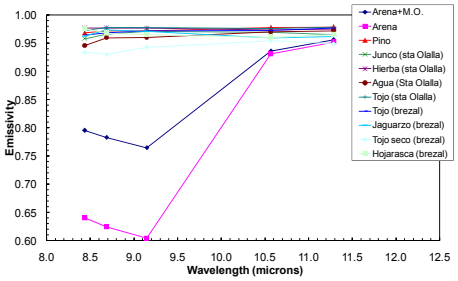


Figura 3: Emisividades obtenidas durante la campaña HYDRA 2008.

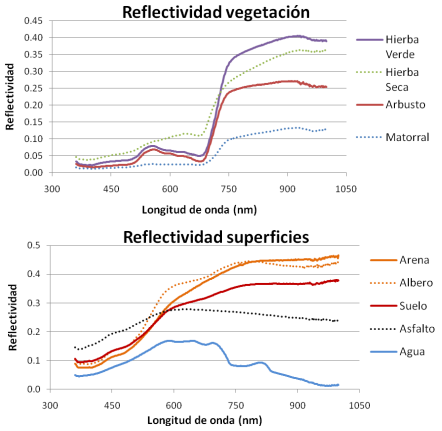


Figura 4: Valores de reflectividad para distintas superficies durante la campaña HYDRA 2010.

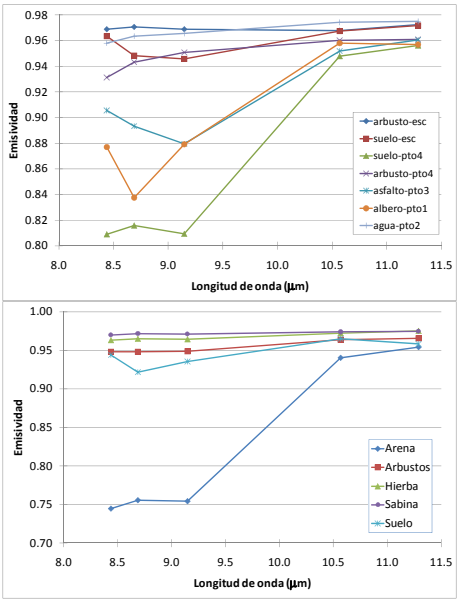


Figura 5: Emisividades obtenidas durante la campaña HYDRA 2008.

Productos derivados de las imágenes AHS

A las imágenes AHS adquiridas durante las campañas HYDRA se les ha realizado la corrección atmosférica y se han obtenido las imágenes de TST y EST a partir del algoritmo TES. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 6 el mapa de TST y el contraste espectral (obtenido como diferencia entre el valor máximo y mínimo de la emisividad espectral normalizado por el valor medio de la emisividad) para una región cercana a la costa y en la que se incluye una zona de dunas (imagen AHS del 29 de Abril de 2008, a las 10:35 UTC con una resolución espacial de 6 m). En la imagen de TST, las zonas de menor temperatura corresponden con la vegetación y agua, mientras que las zonas de mayor temperatura corresponden a las dunas y superficies sin vegetación en general. En la imagen de contraste espectral se distinguen la zona de dunas, con valores elevados de contraste debido al alto contenido en cuarzo de la arena de las dunas, cuyo efecto es una disminución de la emisividad alrededor de los 9 µm.

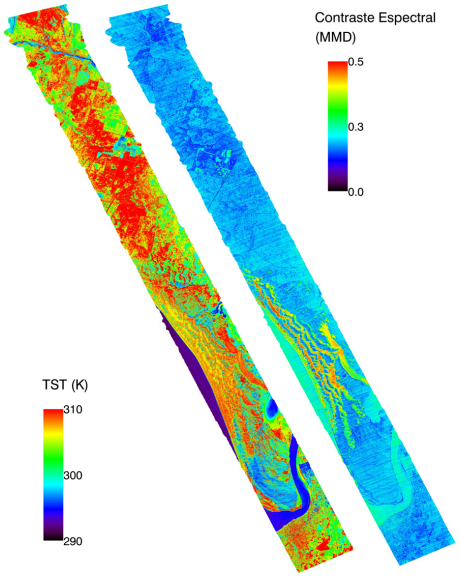


Figura 6: Mapa de TST y contraste espectral para una región cercana a la costa (imagen AHS del día 29 de Abril de 2008)

Figura 7 muestra el espectro de emisividad de una muestra recogida en la zona de dunas medido mediante técnicas de espectroscopía (Sobrino et al., 2009), obtenido a partir de las medidas in situ con el radiómetro CIMEL CE 312-2 y extraído de la imagen AHS una vez aplicado el algoritmo TES.

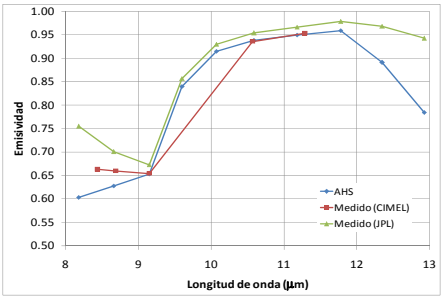


Figura 7: Espectro de emisividad de una muestra a partir de imágenes AHS, técnicas de espectroscopia (JPL) y medidas in situ (CIMEL).

CONCLUSIONES

Se han caracterizado superficies de la RBD a través del proyecto HYDRA mediante la obtención de valores de reflectividad y emisividad, las cuales también han servido para obtener mapas de temperatura de la zona, que muestran las diferencias de temperatura de hasta 15K entre las zonas de vegetación, agua de la marisma y las zonas de dunas.

BIBLIOGRAFÍA

QUATTROCHI, D.A., y LUVALL, J.C., 2000. *Thermal remote sensing in land surface processes*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 440 pp.

GILLESPIE, A., ROKUGAWA, S., HOOK, S., MATSUNAGA, T., y KAHLE, A.B., 1998. *A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 1113-1126.

SOBRINO, J.A., MATTAR, C., PARDO, P., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., HOOK, S.J., BALDRIDGE, A., y IBAÑEZ, R., 2009. *Soil emissivity and reflectance spectra measurements*. Applied Optics, 48(19), 3664-3670.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación, ICTS-RBD, proyectos 44/2007 y 26/2009 por la financiación concedida.

Recuperación de marisma en la ría de Somorrostro (Múskiz, Vizcaya). Aplicación de análisis fotogramétrico para definir condiciones de referencia

J. Valderrábano Luque[1], E. Fernández Iglesias[1] y M. Fernández Alonso[1]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Edificio de Investigación. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: jvalde@indurot.uniovi.es

RESUMEN

Como complemento de un proyecto de recuperación de marisma en la ría de Somorrostro, se definen las condiciones de referencia del sistema (geomorfología y vegetación), con el fin de evaluar el esquema de restauración planteado. Mediante el análisis de las series de fotografías aéreas entre 1957 y 2007 de la parcela a restaurar se analizan las condiciones morfológicas originales y su evolución. Por otro lado, utilizando como base la ortofotografía aérea reciente (PNOA 2007) se ha elaborado un mapa de vegetación detallado del sistema duna-estuario que ha permitido precisar el esquema de revegetación de la parcela.

Palabras clave: Restauración, marismas, geomorfología, vegetación, fotografía aérea, ortofoto.

ABSTRACT

As a complement to a salt-marsh restoration project in the estuary of Somorrostro, reference conditions of the system (geomorphology and vegetation) are defined, in order to evaluate the proposed restoration scheme. Analyzing aerial photographs between 1957 and 2007, the morphological original conditions of the study area and their recent evolution in the last 50 years were established. Furthermore, with detailed recent aerial photographs (PNOA 2007), an exhaustive vegetation map of the estuarine-dune system was produced which has allowed us to determine the revegetation pattern for the land to be restored.

Keywords: *Restoration, salt-marshes, geomorphology, vegetation, aerial photograph, ortophotograph.*

INTRODUCCIÓN

Los estuarios son sistemas naturales dinámicos, de gran fragilidad y muy sensibles ante pequeños cambios. Durante siglos han estado sometidos a una fuerte presión antrópica, que ha mermado su naturalidad y ha supuesto la pérdida de gran parte de su superficie para su dedicación a usos agropecuarios, urbanos o industriales (e.g. Day *et al*., 1989). La recuperación de estos terrenos requiere de estudios previos muy detallados en los que la utilización de herramientas fotogramétricas resulta imprescindible (e.g. Moore, 2000; Fernández y Fernández, 2008).

En este contexto, en la ría de Somorrostro (estuario del Barbadún), en Vizcaya, la empresa CLH (Compañía Logística de Hidrocarburos) desarrolla un proyecto de restauración en una de las parcelas que ocupa en la margen derecha de la ría, promovido por la Demarcación de Costas del País Vasco. Uno de los propósitos del proyecto consiste en reproducir, en un sector de dicha parcela, las características de las marismas y dunas de las zonas naturales de la ría, mediante eliminación de rellenos, remodelación morfológica y revegetación. Para conseguir esta meta, es necesario analizar con la mayor precisión posible, las características naturales que presentaba la zona previamente al vertido de rellenos artificiales, realizado a mediados de la década de los 70.

OBJETIVOS

El estudio tiene por objeto precisar las condiciones de referencia relativas a la geomorfología y la vegetación, con el fin de introducir las modificaciones oportunas en el esquema de restauración del proyecto y favorecer el éxito de la actuación.

MATERIAL Y MÉTODOS

La base metodológica del estudio es el análisis comparativo de las series históricas de fotografía aérea (Tabla 1). A partir del estudio de estas fotografías se persigue identificar las condiciones de referencia preliminares, atendiendo a los agentes dinámicos que actúan en la zona para definir las características geomorfológicas y de vegetación a imponer en el terreno.

Para el análisis evolutivo se ha realizado un estudio de los ambientes que se observan en el área de estudio en las fotografías aéreas disponibles. Concretamente, las imágenes de 1957 y 1972 (CNIG) son las únicas que permiten observar los terrenos de marisma con anterioridad a su relleno artificial, mientras que las fotografías de los años 1977, 1990, 1999, 2001 y 2004 han sido relevantes para obtener detalles sobre la evolución del sistema dunar.

AÑO	ESCALA	FUENTE
1957	1:33 000	Vuelo americano
1972	---	CNIG
1977	1:18 000	IRYDA (Vuelo de Agricultura)
1985	---	CNIG
1990	1:5 000	Dirección General de Puertos
1997	---	CNIG
1999	---	Gobierno País Vasco
2001	1:10 000	Dirección General de Costas
2004	1:15 000	SigPac
2005	1:10 000	Gobierno País Vasco
2006	1:10 000	Gobierno País Vasco
2007	1:10 000	Gobierno País Vasco

Tabla 1: Vuelos fotogramétricos existentes para la zona de estudio

Además, con el apoyo de las ortofotos más recientes disponibles en el periodo de trabajo, se ha desarrollado una intensa labor de campo para obtener una información lo más detallada posible de las características geomorfológicas y botánicas actuales del área de estudio.

LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estuario del río Barbadún, o ría de Somorrostro, se sitúa en el extremo occidental del litoral del País Vasco (Figura 1), en el municipio de Múskiz (Vizcaya), desarrollado a favor de un pliegue anticlinal de dirección NO-SE. La cuenca del río Barbadún se caracteriza por la dominancia de materiales carbonatados del Cretácico Inferior, que favorecen la aportación al río de un volumen importante de sedimentos finos.

En la desembocadura del río, en la playa de La Arena, se desarrolla un sistema dunar al que se le superpone una gran alteración antrópica. El trasdós del sistema dunar ubicado en la margen derecha del río Barbadún ha sido intensamente ocupado por instalaciones de refino de petróleo y almacenamiento de hidrocarburos, mientras que en la margen izquierda se conservan terrenos de marisma que, aunque con algunas excavaciones y rellenos artificiales, presentan un estado bastante natural.



Figura 1: Localización del estuario del Barbadún o Ría de Somorrostro.

CONDICIONES GEOMORFOLÓGICAS DE REFERENCIA

La imagen más antigua disponible para el área de estudio se corresponde con la fotografía del vuelo americano, del año 1957 a escala 1:33.000. En ella se observa el área considerada en un estado más natural, previo a la ocupación antrópica de la actualidad, y constituye el referente fundamental para definir los ambientes que se quieren obtener en la restauración. Además, y a partir del análisis de los cambios detectados en el estudio evolutivo, se pretende analizar el papel de los agentes dinámicos que imperan en la zona ligados al viento, mareas, oleaje o caudal fluvial, que puedan condicionar ciertos aspectos de la restauración. En relación con la imagen de referencia, el estudio de la fotografía aérea de 1957 (Figura 2) muestra que en la margen derecha se desarrollaba un amplio depósito litoral ligado a la playa de La Arena.

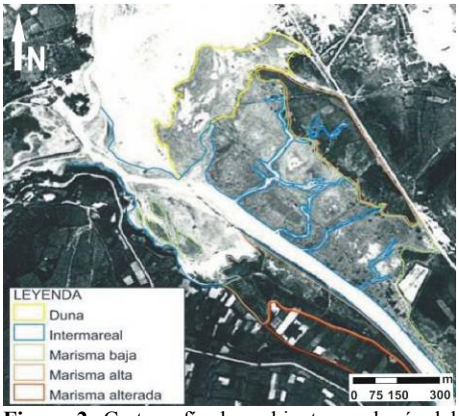


Figura 2: Cartografía de ambientes en la ría del Barbadún sobre la fotografía aérea del año 1957.

La elevada disponibilidad de sedimento arenoso en la playa alimenta un sistema dunar de escaso relieve pero de dimensiones significativas.

Por detrás de las dunas se ubica un ambiente vegetado recorrido por un sistema de canales mareales de baja densidad pero bien definido, aspectos que señalan la presencia de una marisma ligeramente madura. En la margen izquierda la influencia mareal es más importante, ya que los canales mareales son más abundantes y de mayores dimensiones. Esto indicaría que la imagen referencia a considerar en la marisma a recuperar en la margen derecha tendría una inundabilidad mareal ligeramente menor a la que se observa en la margen opuesta.

Para el análisis evolutivo de la marisma previamente a su relleno artificial sólo se dispone de las fotografías aéreas de 1957 y 1972. No se observan cambios importantes en la red de canales mareales, pero se detecta cómo una parte de la marisma sufre el parcial enterramiento por sedimentos arenosos de la duna, la cual prácticamente ha desaparecido (Figura 3).

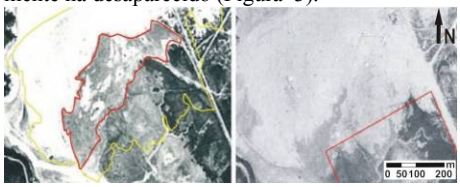


Figura 3: Detalle de la duna en 1957 (izquierda) y 1972 (derecha).

Para obtener más detalles sobre la dinámica dunar se han analizado las fotografías de los años 1977, 1990, 1999, 2001 y 2004, lo que ha permitido observar una reducción en la superficie vegetada de la duna entre 1999 y 2001 a lo largo de 6600 m^2, desapareciendo más superficie que la creada en el periodo 1990-1999 (Figura 4).

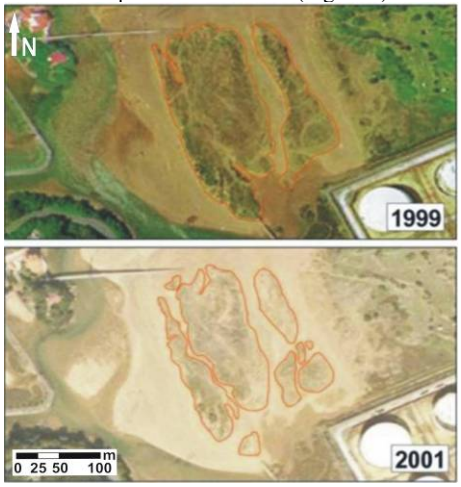


Figura 4: Reducción en la superficie vegetada de la duna, especialmente en la margen derecha.

Los cambios detectados en los fotogramas desde 1957 han permitido constatar la exposición de la duna a los agentes erosivos de los oleajes de tormenta, responsables de marcados cambios en la posición y distribución de los cordones dunares y en el grado de cobertura vegetal. Estos cambios son relevantes en el planteamiento de la restauración, tanto por su potencial repercusión en la ejecución de los trabajos como por las posibles interferencias en la recuperación de la marisma, que podría ser afectada por sedimentos de la duna durante grandes temporales.

CONDICIONES DE REFERENCIA DE LA VEGETACIÓN

El Proyecto de Recuperación Ambiental pretende reproducir, en la margen derecha del estuario, las características de la vegetación existente en las zonas del sistema dunar-estuarino de la desembocadura del Barbadún que conservan un mayor grado de naturalidad. Para ello, se realiza una labor cartográfica que ponga de manifiesto la variedad de la cubierta vegetal y la distribución de las formaciones vegetales en el medio. Además, la ubicación y delimitación detalladas de las comunidades vegetales favorece las labores previstas de recolección de propágulos de especies estuarinas para su introducción en la marisma a recuperar, ya que se pueden definir con precisión las zonas del estuario en las que se localizan dichas especies.

En consecuencia, se ha elaborado un mapa de vegetación de detalle (escala 1: 2000) a partir de los datos de campo obtenidos mediante una prospección minuciosa del sistema dunar-estuarino de la ría de Somorrostro (Figura 5), tomando como referencia la caracterización de la cubierta vegetal de estuarios desarrollada en el litoral cantábrico (Bueno, 1997; Díaz y Fernández Prieto, 2002).



Figura 5: Registro detallado de la cubierta vegetal sobre la ortofoto 2007.

La información recopilada se digitalizó tomando como base la ortofoto del año 2007 a escala 1: 1000. Posteriormente, se realizó la elaboración digital del mapa mediante herramientas de edición cartográfica (ArcGis) (Figura 6) y se obtuvo el listado y la distribución de las comunidades vegetales presentes en el ámbito de la desembocadura del Barbadún

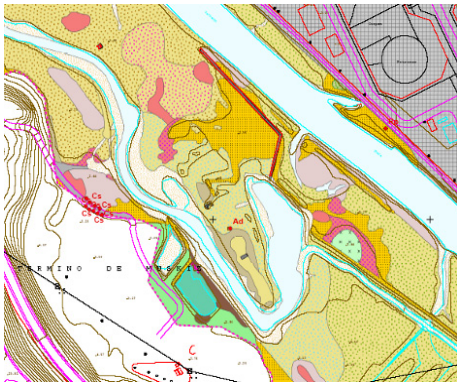


Figura 6: Detalle del mapa de vegetación.

A partir del mapa de vegetación se establecen las zonas de recolección de las especies a plantar, que se definen sobre la ortofoto del PNOA de 2007. En la Figura 7 se muestra, a modo de ejemplo, el mapa correspondiente a la zona de recolección para una de las especies seleccionadas para la plantación: *Plantago maritima*.

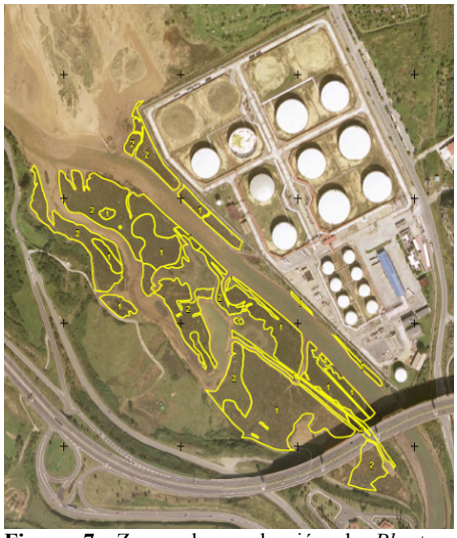


Figura 7: Zonas de recolección de *Plantago maritima*. (1-Zona preferente 2-Zona secundaria)

CONCLUSIONES

El empleo de material fotogramétrico histórico (series de fotografías aéreas entre los años 1957 y 2007) ha permitido conocer, por un lado, las características geomorfológicas del enclave a restaurar con anterioridad a su modificación antrópica, y por otro, los procesos naturales que han actuado durante las últimas décadas sobre los terrenos que se pretende restaurar. Destaca la estabilidad que presenta la configuración de la red de canales mareales y la exposición a los oleajes de tormenta de las dunas y del perímetro septentrional de la marisma, condicionantes a tener cuenta en la restauración.

Por otro lado, la cartografía de vegetación actual, realizada sobre la base de la ortofoto del año 2007, permite precisar el esquema de revegetación del sistema duna-estuario a recuperar, a partir de las características de la cubierta vegetal existente y de la recolección, en el propio estuario, de semillas o esquejes de especies no protegidas.

BIBLIOGRAFÍA

BUENO SÁNCHEZ, A., 1997: *Flora y vegetación de los estuarios asturianos.* Cuadernos de Medio Ambiente. Naturaleza 3. Principado de Asturias, Consejería de Agricultura. 352 pp.

DAY, J.E., et al. (Eds.), 1989. *Estuarine Ecology.* New York, John Wiley & Sons.

DÍAZ, T.E. y FERNÁNDEZ PRIETO, J.A., 2002: *Paisaje vegetal del noroeste ibérico. El litoral y orquídeas silvestres del territorio.* Ed. Trea S.L. Gijón. 302 pp.

MOORE, L.J., 2000. *Shoreline mapping Techniques.* Journal of Coastal Research, 16:111-124.

FERNANDEZ IGLESIAS, E. y FERNÁNDEZ ALONSO, M., 2008. *Restauración de marismas en estuarios cantábricos: velocidad y tasas de erosión*. Actas X Reunión Nacional de Geomorfología. Cádiz., pag. 455-458.

Estudio y seguimiento de áreas afectadas de inundación (Febrero-Marzo y Diciembre) en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes radar del satélite TerraSAR-X (REDIAM)

J.J. Vales[2], I.R. Carpintero[2], L. Granado[2], E. Méndez[2], G. Montoya[2], I. Pino[2], R. Prieto[2], F. Giménez de Azcarate[2], F. Cáceres[1] y J. M. Moreira[1]

[1] DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO SOSTENIBLE E INFORMACIÓN AMBIENTAL. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Avda. Manuel Siurot, 50, 41071. Sevilla (España). Telf: 955003429, Fax. 955003795. Correo electrónico: {josem.moreira, francisco.caceres}@juntadeandalucia.es

[2] DEPARTAMENTO DE COMUNICACIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN. Agencia de Medio Ambiente y Agua, Johan Gutenberg, 1 (Isla de la Cartuja), 41092 Sevilla (España). Telf: 955044529, Fax. 955625140. Correo electrónico: {fgimenezdeazcarate, jvales, emendez, gmontoya, icarpintero, ipino, lgranado, rprieto}@agenciademediambienteyagua.es

RESUMEN

Las intensas precipitaciones acaecidas en los meses invernales del año hidrológico 2009-10, han propiciado inundaciones en diferentes ámbitos y más concretamente en los cercanos a las llanuras de inundación de cuencas hidrográficas. En Diciembre de 2010 (siguiente año hidrológico) se han repetido vuelto a producir inundaciones en similares condiciones. Es imprescindible estudiar el alcance de la lámina de agua producida por estas crecidas y desbordamientos proporcionando esta situación la mejor oportunidad de cartografiar este aspecto, obteniéndolo directamente y no en base a modelos de simulación. Con este fin se ha hecho uso de la Teledetección mediante la tecnología Radar para la adquisición de imágenes, partir de las cuales se ha obtenido la localización y caracterización de las áreas afectadas. Este artículo describe los trabajos realizados en la fase de emergencia de dos episodios de inundación en cinco ámbitos de la región andaluza localizados en las Cuencas del Guadalquivir y Guadalete.

Palabras clave: Inundación, Radar, Teledetección, Año Hidrológico, CMA, Rediam, PNOA, SIOSE.

ABSTRACT

The intense rainfall records registered during the winter months of the present hydrological year 2009-2010 in the whole region of Andalusia (Spain) have produced floods in different areas and mainly in those flood plain areas within the river basins. In December 2010 (the next hydrological year) new floods have been registered in similar conditions. In this sense it is mandatory to study the range of the water sheet produced by floods and overflows. This situation provides the best opportunity for mapping flood aspects in order to obtain real time data and not based in simulation models. For this reason remote sensing based in RADAR technology for the acquisition of images has been used to locate and characterize the affected areas. This paper describes the work carried out in the emergency phase for two flood episodes in five different areas of the region of Andalusia located within the Guadalquivir and Guadalete river basins.

Keywords: Water floods, Radar, Remote Sensing, Hydrological Year, CMA, Rediam, PNOA, SIOSE.

INTRODUCCIÓN

La Observación de la Tierra a partir de sensores satelitales proporciona una importante fuente de información del territorio que permite llevar a cabo análisis y evaluación de diferentes parámetros y fenómenos ambientales a través del tratamiento de las imágenes y la obtención de indicadores ambientales. Pero además este conjunto de técnicas permiten llevar a cabo la vigilancia o el seguimiento de desastres naturales entre los que se encuentran los incendios forestales, las inundaciones, terremotos,… En este sentido la disponibilidad de información en tiempo real en la fase de emergencia es fundamental para dar soporte a la toma de medidas durante el desastre y también para las actuaciones posteriores de los gestores de la administración competente.

Las intensas precipitaciones producidas en invierno y primavera del año hidrológico 2009-2010 en toda la región andaluza, han propiciado se produzcan inundaciones en diferentes ámbitos. La prolongada situación de lluvias ha provocado el llenado de los embalses de la región superando incluso su capacidad de embalsado. Las necesidades de regulación de embalsado pueden haber incrementado el efecto de las precipitaciones. Esta situación se ha repetido en el invierno del siguiente año hidrológico 2010-11 (diciembre 2010), produciendo nuevos episodios de inundación. Disponer de información similar de dos ámbitos en diferentes fechas, permite analizar con mayor profundidad el fenómeno.

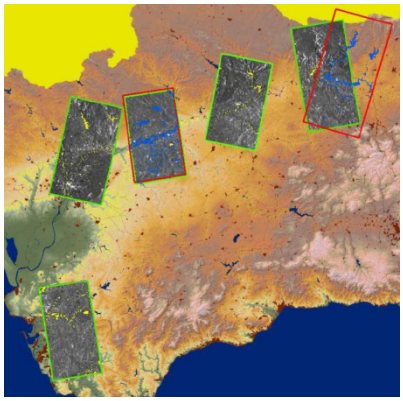


Figura 1: Localización de los ámbitos de estudios. Delimitación de ámbito: a) Verde: Febrero-Marzo 2010; b) Rojo: Diciembre 2010.

METODOLOGÍA

Estudios Previos

Durante el mes de Febrero (2010) se produjeron intensas precipitaciones sobre que provocaron la alarma en relación a la vigilancia respecto a las crecidas de embalses y posibles desbordamientos de ríos e inundaciones de llanuras de inundación de cuencas más susceptibles. (Martínez Vega, J. y Martín Isabel, M.P.2010). Desde la Rediam se pusieron en marcha las medidas oportunas de seguimiento de contingencias a partir de los diferentes sensores tomando como referencia tanto el ámbito cubierto por las escenas como a la resolución geométrica, radiométrica y temporal de las mismas. Entre los más destacados: MODIS (diarias), LANDSAT (adquisición cada 16 días) ó MERIS (cada 3 días).

Las imágenes satelitales analizadas, y por generalidad la mayor parte de los sensores disponibles capturan información en unos rangos del espectro electromagnético que se ven afectadas por la meteorología (presencia de nubes y niebla cuya cobertura sobre la región impide la disponibilidad de datos del territorio). La cobertura nubosa sobre las áreas de interés fue casi completa durante la fase de emergencia. Este hecho constreñía la adquisición de imágenes al uso de tecnología Radar, para lo cual se estudiaron las diferentes fuentes de información en condiciones de urgencia/emergencia.

La opción seleccionada fue adquisición de imágenes del satélite TerraSAR-X con sensor en la banda X (sensor activo de apertura sintética), que permite observar tanto el terreno como las masas de agua en cualquier circunstancia (atravesando todas las capas de la atmosfera), incluso con cobertura nubosa. (DLR, 2008).

Parámetro satelital.	Datos Orbitales
Tipo de órbita	Heliosincrónica
Período de Repetición	11 días
Ciclo de Repetición	167 Órbitas
Órbitas por día	15 + 2/11
Velocidad	7,6 Km/s
Hora de Paso por Ecuador	Asc: 18:00 ± 0,25 h
	Desc: 18:00 ± 0,25 h
Inclinación	97,4438°
Altitud en el Ecuador	514,8 Km

Tabla 1: Características técnicas del satélite TerraSAR-X. Fuente: DLR.

Localización de ámbitos afectados en fase de emergencia

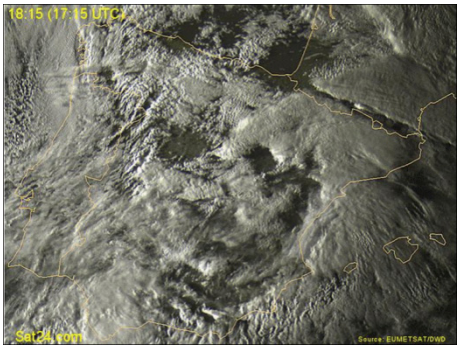


Figura 2: Imágenes METEOSAT con cobertura nubosa casi completa (27 Febrero 2010). Fuente: NEODASAS. Geostationary Archive.

A principios de la semana del 22 al 28 de Febrero (2010), comienzan a localizarse los primeros conatos de desbordamientos de ríos y a producirse la primeras inundaciones de relevan-

cia en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete. Se establece por parte desde la CMA situación de emergencia y desde la Rediam se coordina la adquisición de las imágenes, haciendo uso de las predicciones meteorológicas y las posibles incidencias de las crecidas, desbordamientos e inundaciones. Este hecho se repitió en condiciones similares en la segunda semana de Diciembre (2010) cuando se repitieron nuevos episodios de inundación. La opción seleccionada para la adquisición de imágenes: "StripMap" (30 x 50 Km) con una resolución geométrica de 3 m. Nivel de Procesamiento MGD (Multi Look Ground Range Detected).

Programación del satélite y adquisición de imágenes

		Adquisición			
Cuenca	Ámbito	Fecha	Hora	Pas	Áng.
Guadalquivir	Lora R-Palma R.	27/02/2010	18:14:34	Asc	36,08- 38,51°
	Lora R-Palma R.	10/12/2010	10:14:52	Desc	36,00- 38,60°
	Córdoba-Alcolea	03/03/2010	6:29:28	Asc	29,50- 32,40°
	Villa R-Andújar	05/03/2010	18:06:15	Asc	29,50-32,40°
	Villa R.-Andújar	09/12/2010	6:20:58	Desc	39,80-42,20°
	Sevilla – Alcolea	08/03/2010	6:38:07	Desc	19,70- 23,01°
Guadal.	Jerez Frontera	27/02/2010	18:18:34	Asc	29,64- 32,41°

Tabla 2: Resumen parámetros de adquisición de escenas en los 5 ámbitos de estudio.

En este proyecto se han obtenido imágenes bajo Prioridad 2, es decir, se aplica a órdenes de trabajo (adquisición de imágenes) confirmadas entre 1 y 3 días antes de la captura. El 25 Febrero se proporcionan los datos necesarios para la programación del satélite para los dos primeros ámbitos de interés: Cuenca del Guadalquivir y del Guadalete. Entre otros parámetros del satélite es imprescindible definir las fechas de adquisición y el ángulo máximo de captura, que vienen condicionados por el período de revisita del satélite (11 días, paso exacto por la vertical) y por la aplicación y urgencia que tendrán los datos posteriores. Configurando estos parámetros, la captura puede optimizarse a 3,5 días. La confirmación de adquisición y programación del satélite se realizó el 26 Febrero, obteniéndose la captura 24 horas después de la programación, respondiendo a los requerimientos de emergencia. En días posteriores, con predicciones meteorológicas que aseguran un aumento en las precipitaciones a nivel regional en similares condiciones a las anteriores, se solicitan peticiones de programación y captura de 3 nuevos ámbitos en la Cuenca del Guadalquivir.

Este protocolo de actuación se repitió en condiciones similares en Diciembre (2010) sobre dos de los ámbitos mencionados en donde se volvieron a producir crecidas, conatos de desbordamientos y posteriormente inundaciones severas (Cuenca del Guadalquivir).

Procesamiento de datos y obtención de Ortoimagen Radar

A partir de los datos crudos (modo StripMap) del TerraSAR-X se lleva a cabo el postproceso y obtención de las imágenes con nivel de procesamiento MGD sobre las que se llevarán a cabo procesos para mejorar geométrica y radiométricamente las imágenes, obteniéndose las Ortoimágenes ORI-SAR. Para la obtención de este producto corregido geométricamente y en ETRS89 (UTM30) se utiliza un MDE (resol. 10m) del PNOA. La exactitud geométrica del producto ORI-SAR depende directamente de la exactitud altimétrica del MDE, de la precisión en la determinación de la órbita y del ángulo de adquisición de la toma. El RMSE del MDE es de 2 m (PPT PNOA). La determinación de las órbitas ("en modo Rápido") llega a alcanzar una precisión de 2 m. La influencia del ángulo de adquisición en la exactitud del producto ORI-SAR es similar a la influencia del MDE.

Tratamiento de imágenes y obtención de lámina de agua

Sobre las imágenes ORI-SAR se realiza una detección automática de áreas cubiertas por agua basada en la señal Radar en la banda X (segmentación). Sobre el resultado vectorizado se depura la geometría de la de la lámina de inundación. La exactitud geométrica de la lámina de agua nunca será mejor que la del producto de partida ORI-SAR. La posibilidad de errores de omisión/comisión de zonas inundadas se intenta reducir mediante la supervisión de operadores.

Sobre las imágenes ORI-SAR y la lámina de inundación se ha efectuado una revisión mediante inspección visual y comparación con otras imágenes de mayor precisión (Ortofoto PNOA) para verificar que no existen errores geométricos groseros y que hay continuidad en el producto.

Clasificación de zonas cubiertas por agua

Sobre la lámina de agua obtenida se ha llevado a cabo una clasificación por uso del suelo afectado para lo cual se ha utilizado el SIOSE (actualizado a 2009). Las superficies como ríos y embalses no son inundadas. Para este fin existen otras metodologías basadas en el uso complementario de imágenes de satélite (García, M.A y

Miguelsanz, P., 2009). La leyenda SIOSE se generaliza en 4 tipos uso: Agrícola, Forestal, Espacio Construido e Infraestructuras, y Embalses (y láminas de agua,…) en todos los ámbitos de estudio.

RESULTADOS

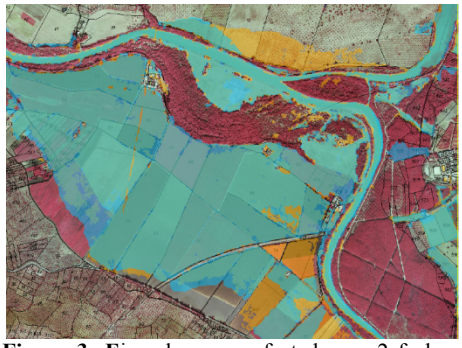


Figura 3: Ejemplo zonas afectadas en 2 fechas (lora r-palma r): **a)** diciembre (cian), **b)** febrero (naranja).

	Sup (Ha)	Lámina	Uso del Suelo Afectado		
Ambito	Fecha	Completa	Agricola	Foretal	Esp. Constr
Lora Río-Palma Río	27/02/2010	4313,8	1806,7	146,5	36,9
Córdoba-Alcolea	03/03/2010	3241,4	712,0	55,8	51,2
Villa Río-Andújar	05/03/2010	2819,4	1008,1	110,4	46,5
Sevilla – Alcolea Río	08/03/2010	5236,0	649,1	824,4	216,0
Ambito Guadalete.	27/02/2010	5843,0	4125,3	239,8	346,6
Lora Río-Palma Río	09/12/2010	4000,9	1592,5	82,1	23,5
Villa Río-Andújar	10/12/2010	3459,4	1101,9	228,8	43,4
	Sup (Ha)		Uso del Suelo Afectado		
Ambito Común	Diferencias		Agricola	Forestal	Construido
Lora Río-Palma Río	Febrero - Diciembre		214,2	64,4	13,4
Villa del Río-Andújar	Febrero - Diciembre		49,9	-61,7	15,0

Tabla 3: Resultados de superficie cubierta y comparación de zonas comunes en diferente fecha.

Analizando las láminas de inundación obtenidas para fechas diferentes, se verifica que los ámbitos afectados en condiciones similares son muy similares y que las diferencias en la superficie afectada dependen directamente de la magnitud de la crecida y de la altura del agua registrada en la imagen (fecha y hora de adquisición) como factor principal. La influencia de la resolución y geometría de las imágenes y la interpretación de las mismas no son significativos respecto al factor principal. Los productos resultantes se integran directamente en el Catálogo de Información Ambiental de la Rediam: Imágenes, lámina de inundación clasificada, estadísticas,… y se ponen a disposición con los medios más oportunos (servicios OGC (WMS),…). Más información en "Canal de la Rediam".

CONCLUSIÓN

La tecnología Radar es válida para cartografiar áreas afectadas de inundación en fase de emergencia, bajo condiciones meteorológicas adversas (nubosidad,…) dando respuesta a una necesidad en donde los otros sensores (espectro visible) no pueden responder. Los productos obtenidos proporcionan una visión real del fenómeno. La coherencia de los datos obtenidos en fechas diferentes avala la fiabilidad de las mismas. La información obtenida es muy útil para su aplicación en la toma de medidas en tiempo real o a posteori de los desastres (evaluación de daños,…) respecto al planeamiento urbanístico (*Decreto de 189/2002 de 2 Julio*) y respecto a delimitación de zonas inundables (*AAA. Actuaciones para la prevención…*). La resolución geométrica de las imágenes Radar obtenidas y la exactitud geométrica de la cartografía de inundación obtenida es adecuada para la detección de áreas afectadas.

BIBLIOGRAFÍA

AAA. *Actuaciones para la prevención de avenidas e inundaciones*. http://www.juntadeandalucia.es

BOJA Nº91. Sevilla 3 Agosto de 2002. *Decreto de 189/2002 de 2 Julio. Plan de Prevención de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces.* http://www.juntadeandalucia.es

Canal de la Rediam. Catálogo de Información Ambiental.http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/rediam/

DLR (2008): *TerraSAR-X ground segment basic product specification document,* TX-GS-DD-3302, v1.5, February 24, 2008.

GARCÍA, M.A Y MIGUELSANZ, P. (2009): *Discriminación de láminas de agua con imágenes TerraSAR-X en la Albufera de Valencia*. XIII Congreso de AET. Calatayud (2009).

LEY 4/2010, de 8 Junio, de Aguas de la Comunidad Autónoma de Andalucía. Prevención de efectos por fenómenos extremos. http://www.juntadeandalucia.es/boja/boletines/2010/121/d/1.html

MARTÍNEZ VEGA, J. Y MARTÍN ISABEL, M.P. (2010): *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente.* Red Nacional de Teledetección Ambiental. CSIC.

Natural Environment Research Council Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service (NEODASAS).http://www.sat.dundee.ac.uk/geobrowse/geobrowse.php

Uso de fotografías aéreas georreferenciadas para estimar la redistribución de sedimento fluvial

D. Vázquez[1], R. Menéndez [1], E. Fernández [1] y M. Hassan [2]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: danielvt@indurot.uniovi.es

[2] Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver, Canadá.

RESUMEN

El uso de fotografías aéreas de años sucesivos ha permitido estimar las variaciones temporales en los volúmenes de sedimento almacenados en los últimos 10 km del río Narcea. Para ello se han georreferenciado fotografías aéreas de cinco colecciones (período total de 50 años) y se ha cartografiado la superficie ocupada por depósitos de barras y la superficie activa de canal. Para calcular volúmenes de sedimento fluvial ha sido necesario: 1) corregir la anchura de los polígonos delimitados en función de los caudales, 2) asumir un valor representativo para el espesor de material del lecho móvil y 3) asumir un valor de porosidad del material para lechos de gravas y bloques. Una vez realizadas estas correcciones se ha calculado una pérdida de material en el canal activo para el período 1957-2007 de 265 000 m^3.

Palabras clave: fotografía aérea, georreferenciación, sedimentos fluviales.

ABSTRACT

Use of aerial photographs from several years has allowed the estimation of time variations in volumes of sediment stored in the last 10 km of Narcea River. For this aim, aerial photographs from 5 different collections (covering a time period of 50 years) have been georreferenced. Furthermore, fluvial bar deposits and active channel width have been mapped over them. To calculate volumes of fluvial sediment it has been necessary: 1) correcting the effect of discharge in surface values, 2) assuming a representative value for the depth of the mobile bed layer and 3) assuming a value for the porosity of bed material. After applying these corrections, a loss of active bed material of 265 000 m^3 was calculated for the time period 1957-2007.

Keywords: aerial photographs, georreferencing, fluvial sediments

INTRODUCCIÓN

Los sistemas fluviales son uno de los medios geomorfológicos más activos, por lo que conocer esta actividad y las tendencias de evolución esperables es imprescindible para gestionar los cauces, su entorno y las posibles infraestructuras y usos que se ubiquen en el ámbito fluvial. Una herramienta útil para estudiar la evolución de los sistemas fluviales son las fotografías aéreas, sobre todo en los últimos años en los que las colecciones disponibles son cada vez más abundantes.

Esta herramienta ha sido utilizada para estimar las variaciones temporales en los volúmenes de sedimento activo almacenado en barras fluviales en el tramo bajo del río Narcea. Los resultados pueden ser interpretados en función de cambios antrópicos acaecidos en el cauce y de la dinámica geomorfológica de los cauces de la vertiente norte de la Cordillera Cantábrica.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende los 10 km finales de río Narcea (Asturias) (Figura 1). La cuenca de drenaje ocupa una superficie de 1800 km^2, con elevaciones que varían desde poco más de 2000 m a menos de 100 m. El clima es oceánico y el relieve montañoso, con una cubierta vegetal continua y densa en toda la cuenca. El caudal medio anual es de 53 m^3/s y el caudal medio de avenida toma un valor de 334 m^3/s. En el tramo de estudio, la granulometría de lecho es gruesa (gravas y bloques), lo que determina una gran importancia para el transporte por carga de fondo.

En el tramo estudiado, el río Narcea ha experimentado cambios morfológicos, observables en fotografía aérea durante las últimas décadas, que han sido interpretados como respuesta a las actuaciones de canalización efectuadas sobre su cauce (Marquínez et al., 2006).





Figura 1: Ubicación del área de estudio (superior). Fotografía que muestra el aspecto del río Narcea a su paso por Quinzanas, Asturias (inferior).

El área de estudio ha sido subdividida en dos subtramos, de acuerdo a las distintas características morfológicas que muestran sobre el fotograma aéreo del año 1957 (Figura 2) .

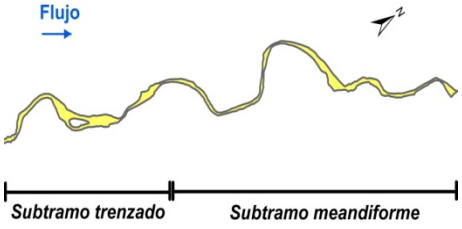


Figura 2: Subtramos diferenciados en el área de estudio.

El objetivo del presente trabajo es la estimación de las variaciones con el tiempo en los volúmenes de sedimento almacenados en barras fluviales, a partir de los cambios de superficie que se pueden identificar sobre fotografías aéreas de diferentes fechas.

METODOLOGÍA

La cartografía de las barras fluviales se ha realizado sobre los fotogramas aéreos de los años 1957, 1985, 1994, 2003 y 2007. Se han cartografiado la superficie ocupada por depósitos de barras y un polígono con la superficie activa de canal (Figura 3).

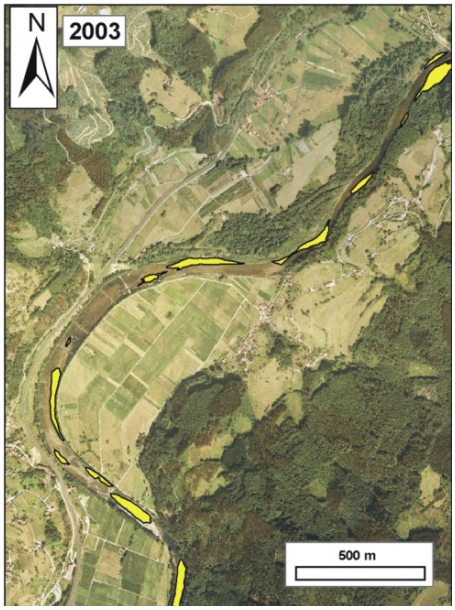


Figura 3: Ejemplo de la cartografía de barras fluviales realizada sobre la fotografía del año 2003.

Para convertir esta cartografía en datos fiables de volumen de sedimento y área de canal es necesario seguir una serie de pasos:

Georreferenciación de fotografías aéreas

En primer lugar, los diferentes fotogramas aéreos fueron georreferenciados, con la asistencia del software ArcGis de ESRI®.

Este proceso de georreferenciación consistió en la identificación de puntos de control; esto es, puntos comunes entre los distintos fotogramas y la orfotografía de 2007, utilizada como base.

Estos puntos fueron seleccionados principalmente en el entorno del cauce, con el fin de que la georreferenciación fuese lo más precisa posible en el ámbito del canal fluvial y llanura de inundación.

El procedimiento de transformación empleado es el llamado “splines”, proceso aplicado automáticamente a través del software ArcMap.

Este procedimiento de transformación está basado en dos condiciones: por un lado, los puntos de control permanecen fijos durante la transformación; por otro, la superficie ajustada ha de tener la mínima curvatura (Franke, 1982).

Es decir, esta transformación mantiene la correspondencia entre los puntos de control de origen (la capa base) y los correspondientes que son seleccionados en la imagen que se está georreferenciando. Con este proceso, se realiza el ajuste manteniendo la continuidad entre puntos a través de estiramientos, contracciones y reorientaciones de líneas.

Una vez realizada la georreferenciación de los diferentes fotogramas, fue realizada la cartografía de barras y del canal activo, sobre estas fotografías aéreas ya georreferenciadas.

Corrección areal con caudales

Las variaciones en el trazado del canal entre fotografías de diferentes fechas estarán influenciadas, en parte, por el flujo y la velocidad de la corriente en el momento de realizarse la imagen.

La corrección areal para la anchura activa de canal –definida como el cociente entre la superficie ocupada por el canal activo y la longitud del mismo (Ham y Church, 2000)- entre dos pares de fotografías vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\Delta w = a \cdot (Q_2^b - Q_1^b)$$

donde w es la anchura activa de canal y Q el caudal en la fecha de toma de la correspondiente fotografía aérea.

La corrección para el área ocupada por las barras, por su parte, se determinará por medio de lo siguiente:

$$\Delta S = \Delta w \cdot L$$

donde S es la superficie y L la longitud del tramo.

Cálculo de volumen de sedimento

Una vez corregidos los valores de superficie, para estimar las variaciones de volumen se asume un valor representativo para el espesor de material del lecho móvil: la media de las alturas del techo de las barras respecto al thalweg adyacente (Ham y Church, 2000). Para el tramo estudiado se han utilizado los perfiles transversales disponibles para el tramo, obtenidos del proyecto LINDE (CHN, 2002).

Por último, para pasar de valores de superficie a volúmenes, se asume para la porosidad del material de lecho el valor de 0.25 propuesto por Martin y Church (1995) para lechos de gravas y bloques.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se resumen en las tablas 1 y 2. Se observa una disminución para todo el tramo en la anchura activa de canal a lo largo del período 1957-1985 (Tabla 1), mientras que los cambios en el volumen de sedimento activo presentan variaciones según el período de tiempo considerado y también entre los diferentes subtramos (Tabla 2).

Año	1957	1985
Subtramo 1	76 m	55 m
Subtramo 2	60 m	50 m
Total Tramo	66 m	52 m

Año	1994	2003	2007
Sbtr. 1	54 m	56 m	53 m
Sbtr. 2	52 m	54 m	51 m
Total	54 m	53 m	52 m

Tabla 1: Variación a lo largo del tiempo de los valores de la anchura activa de canal en el tramo de estudio

	1957-85	1985-94	1994-07	1957-07
	m3	m3	m3	m3
SubTr1	100000	-370000	120000	-150000
SubTr2	-170000	-120000	180000	110000
TotalTr	-84000	-480000	300000	-265000

Tabla 2: Variaciones a lo largo del tiempo en los volúmenes de sedimento almacenados.

De una manera general, para todo el tramo en el período 1957-2007, se ha estimado una reducción en el volumen de sedimento móvil de aproximadamente 265 000 m^3, lo que se ha interpretado como debido a su creciente estabilización por vegetación e incorporación a la llanura.

Esta evolución puede ser interpretada en el contexto de un modelo evolutivo del canal, al haber creado las últimas actuaciones de canalización una sección más ancha, favorable a los procesos de agradación (Fernández et al, 2006).

CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una estimación de los cambios temporales ocurridos en los volúmenes de sedimento activo almacenados en el cauce fluvial del río Narcea, partiendo de los cambios de superficie identificados entre diferentes fotografías aéreas.

Para poder pasar de valores de superficie a valores de volumen fue necesario realizar dos pasos: 1) Corregir los efectos de la altura de la lámina de agua en los valores de superficie cartografiados sobre cada fotografía. 2) Asumir un valor para el espesor del sedimento activo.

Los resultados muestran una tendencia a la pérdida de sedimento activo en el río Narcea durante los 60 años, que refleja la progresiva colonización de los depósitos por vegetación.

BIBLIOGRAFÍA

CHN (2002). Proyecto LINDE: Asistencia técnica para el estudio y delimitación previa del Dominio Público Hidraúlico correspondiente a la 2ª Fase-3ª Etapa del proyecto LINDE (Cuenca Hidrográfica del Norte). Informe inédito.

FERNÁNDEZ, E. Y TIRADOR, P. Y MARQUÍNEZ, J., 2006. *Impacto de las canalizaciones en el río Narcea (Asturias)*. En: Pérez Alberdi, A. y Bedoya, J. (Eds.) Geomorfología y territorio, 509-520.

FRANKE, R., 1982. *Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines.* Comp. and Maths. with Appls. Vol. 8. No. 4. 237-281.

HAM, D. Y CHURCH, M., 2000. *Bed material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack river, British Columbia.* Earth Surface Processes and Landforms, 25, 1123-1142.

MARTIN, Y. Y CHURCH, M., 1995. *Bed material transport estimated from channel surveys: Vedder river, British Columbia.* Earth Surface Processes and Landforms, 20, 347-361.

AGRADECIMIENTOS

Para este trabajo se ha contado con el apoyo económico de la beca AP2007-03209 del programa FPU, cofinanciada por el Fondo Social Europeo, y el contrato C-08-47 entre la Confederación Hidrográfica del Cantábrico y la Universidad de Oviedo.

METEOROLOGÍA Y CLIMA

Dependencia con el tiempo de adquisición de la capacidad de predicción de la temperatura del aire a partir del estudio de series temporales

M. M. Artigao[1], J. J. Miralles[1] y J. A. Martínez[2]

[1]Departamento de Física Aplicada, Universidad de Castilla-La Mancha. Campus de Albacete. Avda España, s/n. 02071 Albacete (España). Correo electrónico: mariamar.artigao@uclm.es

[2] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Castilla-La Mancha. Campus de Albacete. Avda España, s/n. 02071 Albacete (España).

RESUMEN

El sistema climático puede ser considerado como un sistema dinámico complejo que evoluciona con el tiempo. Dicho sistema está constituido por varios subsistemas, dentro de los cuales se puede considerar la temperatura del aire, como una de las magnitudes que juega un papel relevante en modelos de circulación general y balance hídrico. Se puede estudiar la dinámica que sigue la temperatura del aire a partir de modelos, pero un método alternativo consiste en estudiar cómo se comporta una serie temporal de esta temperatura obtenida de manera experimental a intervalos de tiempo constante.

De manera tradicional, se aplican las técnicas de estadística para el estudio de este tipo de magnitudes, pero es bien sabido que el sistema climático tiene un comportamiento caótico y por lo tanto todos estos subsistemas obedecen a un comportamiento no lineal. En estos casos existe un método alternativo para caracterizar el sistema que consiste en aplicar técnicas de análisis no lineal de series temporales para intentar determinar la dinámica del observable en cuestión. Los algoritmos básicos empleados en este tipo de estudio permiten determinar si una serie temporal que proviene de cualquier sistema físico tiene un comportamiento caótico, en cuyo caso, a partir de cierto instante, no será posible predecir cuál va a ser el comportamiento futuro del sistema ya que el sistema se vuelve impredecible en este tiempo. El parámetro que determina la cota de predicción es el exponente de Lyapunov que se calcula a partir de dos parámetros que caracterizan el sistema: el tiempo de retardo y la mínima dimensión de *embedding*. En este trabajo, se ha estudiado la dependencia del exponente de Lyapunov con el tiempo de adquisición de una serie temporal de temperatura del aire. Los datos originales se han tomado en intervalos de 1 minuto y se han integrado los valores para obtener nuevas series con intervalos de adquisición de 15, 30 y 60 minutos. En todos los casos se observa que la dimensión de *embedding* permanece constante, mientras que el exponente de Lyapunov varía con el tiempo de adquisición. Esto significa que la capacidad de predecir la evolución de una magnitud queda determinada por su tiempo de adquisición. Los resultados obtenidos con estos datos de temperatura son extrapolables a datos obtenidos mediante imágenes de satélite.

Palabras clave: temperatura del aire, teledetección, series temporales no lineales, exponente de Lyapunov.

ABSTRACT

The climate system can be considered as a complex dynamical system with a temporal evolution. Any complex systems are comprised of multiple subsystems that exhibit nonlinear deterministic behaviour. Perhaps the air temperature is one the most relevant magnitude because its relevance in general circulation models and water budget. It is possible to study the air temperature behaviour from models, but an alternative method is by studying an air temperature time series behaviour obtained in an experimental way at constant time intervals. As the chaotic behaviour of the climate system, it is necessary to apply nonlinear techniques in order to study its evolution. This nonlinear behaviour is an upper limit in its prediction. The parameter that gives this limit is the maximal Lyapunov exponent. In this work we have studied the dependence on the Lyapunov exponent with the time acquisition. The original data has been acquired at one minute interval. In order to obtain new series we have made an integration to obtain time series with acquisition time of 15, 30 and 60 minutes. The results clearly show that the maximal Lyapunov exponent is dependent on the acquisition time and then the prediction capability also varies.

Keywords: *remote sensing, air temperature, nonlinear time series, maximal Lyapunov exponent.*

INTRODUCCIÓN

La predicción a largo tiempo es uno de los principales problemas que se plantean cuando se estudia el sistema climático. Dado que es bien sabido que este sistema obedece a comportamientos no lineales, la estadística clásica no es la herramienta más adecuada para estudiar su evolución. En este caso se hace necesario acudir a técnicas de análisis no lineal. Existen dos maneras de abordar el problema: una es construir un modelo que caracterice la evolución del sistema y otra es mediante el estudio de series temporales de datos climáticos obtenidas, bien a partir de las ecuaciones o bien mediante diversas técnicas de adquisición.

En muchas ocasiones se considera que hay factores aleatorios que hacen que un sistema se vuelva impredecible a partir de un instante determinado, pero muchas veces esta falta de predictibilidad se debe a que el sistema presenta caos determinista, incluso si el sistema es simple (Chen et al, 2006). La característica fundamental de un sistema dinámico caótico es que su evolución es no periódica y extremadamente sensible a las condiciones iniciales. Son estas técnicas de análisis no lineal las que han puesto de manifiesto que el sistema climático presenta caos determinista. Dado que éste es un sistema complejo, está formado por varios subsistemas que, a su vez, presentaran un comportamiento que será mezcla de un determinismo no lineal unido a comportamientos estocásticos. Ejemplos de estos sistemas, además del que nos ocupa son: (1) Evolución de la bolsa, (2) Corazón y cerebro humano, (3) el tráfico en Internet (Rosenstein et al, 1993)

En este trabajo se ha estudiado la dependencia del exponente máximo de Lyapunov en función del tiempo de adquisición de datos de una serie temporal de temperatura del aire. Los resultados indican que dicho exponente varía con la frecuencia de adquisición, de manera que aparecerán diferentes horizontes de predicción en función de dicha frecuencia.

Este trabajo se inició antes del macrocongreso organizado por la World Meteorological Organization (WMO, voz autorizada por la ONU en temas de climatología) celebrado en Antalya (Turquía) en 2010 donde la U.K. Met Office presentó el siguiente trabajo "*Proposal for a new international analysis of land surface air temperatura data*" en la 15ª sesión CCI (Commission for Climatology), disponible en el siguiente url[1]. Es de destacar que el MET es la organización que suministra las tendencias de temperatura global usadas por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). En el trabajo presentado por esta organización se proponía que un grupo internacional de científicos reexaminara los 160 años de datos de temperatura disponibles. En el punto 1 de la propuesta se cita textualmente: "Verifiable datasets starting from a common databank of unrestricted data at both monthly and finer temporal resolutions (**daily and perhaps even sub-daily**). Como resultado de esta propuesta se ha comenzado a trabajar en un proyecto que se puede consultar en su sitio Web[2]. En esta línea cabe citar la referencia, (Stott&Thorne, 2010), donde se afirma que "*Sub-daily, kilometre-scale temperature records are needed to monitor and predict local impacts of climate change*". En el apartado de conclusiones relacionaremos este punto con los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA

El cálculo del exponente máximo de Lyapunov se puede hacer sin la construcción explícita de un modelo, reconstruyendo el espacio de estados (espacio de fases) a partir de la serie temporal de un único observable físico, por ejemplo la temperatura del aire. Únicamente hay que asegurar una independencia de la dimensión de embedding y comprobar explícitamente la divergencia de las órbitas. La reconstrucción en el espacio de fases se realiza en base al teorema de Takens (Takens, 1981) usando el algoritmo de Falsos Vecinos más Cercanos (Kantz, 1994) para determinar la mínima dimensión del embedding. La dinámica en el espacio de estados reconstruido, es una buena aproximación (en las condiciones del teorema) a la dinámica en el espacio de estados original y desconocido. Podemos considerar la representación de los sucesivos vectores en el espacio de estados reconstruido, como una órbita en el mismo.

Una manera de caracterizar el sistema dinámico del que provienen los datos adquiridos en la serie temporal, es a través de la estimación de la mínima dimensión del embedding (m). Por otro lado, el exponente máximo Lyapunov sirve como indicador del nivel de caos del sistema bajo estudio. Exponentes positivos son los que se

[1] www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/cclxv/index.php. [30-03-2011]

[2] www.surfacetemperatures.org[30-03-2011]

obtienen para sistemas caóticos, mientras que un exponente negativo indica que el sistema no es sensible a las condiciones iniciales. Dado que este exponente es una medida de la tasa de divergencia entre dos trayectorias suficientemente cercanas, su inversa será una cota superior a la capacidad de predicción sobre la evolución de un sistema, ya que, más allá de ésta, cualquier predicción realizada no alcanza el mínimo exigido de fiabilidad.

Supongamos que podemos observar un punto del espacio m-dimensional de estados reconstruido, $\vec{x}_n$ y su evolución en un tiempo infinitamente corto $\vec{x}_{n'}$.

La diferencia $\delta\vec{x} = \vec{x}_n - \vec{x}_{n'}$ se puede asimilar como una pequeña perturbación que crecerá exponencialmente a medida que avance el tiempo.

$$\delta\vec{x} = \delta\vec{x}_0 e^{\lambda t} \qquad (1)$$

Si encontramos un intervalo de tiempo para el cual se cumpla la ecuación (1), entonces λ_1 es el máximo exponente de Lyapunov.

Para obtener de manera operativa este exponente es necesario calcular la tasa de expansión de las órbitas para distintas dimensiones y distintos entornos mediante la expresión (Hegger et al, 1999)

$$S(\varepsilon, m, t) = \left\langle Ln\left(\frac{1}{|U_n|} \sum_{\vec{x}_{n'}} |\vec{x}_{n+1} - \vec{x}_{n'+1}| \right) \right\rangle_n \qquad (2)$$

Si $S(\varepsilon, m, t)$ tiene un comportamiento lineal con la misma pendiente independientemente de la dimensión, dicha pendiente coincidirá con el exponente máximo de Lyapunov

El algoritmo que hemos seguido para la obtención de un horizonte de predicción es el siguiente: (1) Construcción de la serie temporal, (2) Cálculo de los vectores retardados, (3) Estimación de la mínima dimensión del embedding a partir del algoritmo de falsos vecinos cercanos, (4) Cálculo de la tasa de expansión para distintas dimensiones, (5) Cálculo de la pendiente en la parte lineal de la representación. Esta pendiente es el exponente máximo de Lyapunov y su inversa coincide con el horizonte de predicción sobre la evolución del sistema.

DATOS EXPERIMENTALES

Para aplicar el algoritmo descrito hemos usado una serie temporal de temperatura del aire. Los datos originales se han adquirido entre enero y diciembre de 2008 con un intervalo de 1 minuto con el fin de perder la mínima información a lo largo del periodo de adquisición. En trabajos previos se ha estudiado esta serie temporal desde el punto de vista del análisis no lineal (Artigao et al, 2007)

El objetivo de este trabajo es comprobar si el exponente máximo de Lyapunov, y por lo tanto la cota de alcance de la predicción, varía con el tiempo de adquisición de los datos. Para ello se ha integrado la serie original con el fin de simular series con distintos tiempos de adquisición. En nuestro caso los intervalos elegidos has sido 15, 30 y 60 minutos. La Figura 1 muestra las series temporales utilizadas.

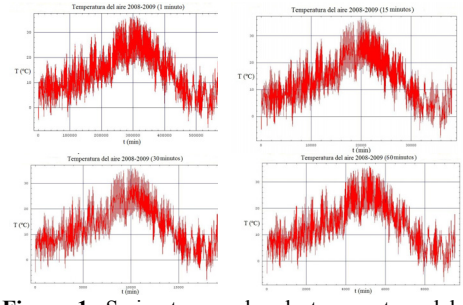


Figura 1: Series temporales de temperatura del aire para 1, 15, 30 y 60 minutos

RESULTADOS

Se ha calculado el exponente máximo de Lyapunov para las cuatro series temporales generadas, a partir de su reconstrucción en el espacio de fases. El proceso de cálculo ha sido el mismo para todas siguiendo el algoritmo descrito en la metodología. Los resultados se muestran en la Figura 2. En todas ellas se observa una tendencia positiva en la representación de la tasa de divergencia. Los resultados numéricos, tanto del exponente máximo de Lyapunov como del horizonte de predicción para cada una de las series estudiadas se muestran en la Tabla 1. La serie de 1 hora no pudo ser estudiada numéricamente debido a que el número de datos era insuficiente.

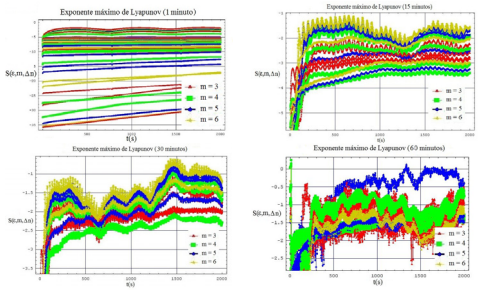


Figura 2: Tasa de expansión para cada una de las series estudiadas

En todas ellas se observa una tendencia positiva en la representación de la tasa de divergencia. Los resultados numéricos se muestran en la Tabla 1.

	λ_1	Cota de predicción
1 minuto	0.020±0.004	50±10
15 minutos	0.012±0.002	83±14
30 minutos	0.0033±0.0006	303±50

Tabla1: Resultados del exponente máximo de Lyapunov y el tiempo en el cual es posible la predicción para cada una de las series estudiadas

CONCLUSIONES

El sistema climático tiene un comportamiento caótico y por lo tanto se debe estudiar su evolución desde el punto de vista del análisis no lineal. Debido a la divergencia de las órbitas, existe una cota a la capacidad de predicción que depende del exponente máximo de Lyapunov. Dicha magnitud está relacionada con el intervalo de adquisición de datos cuando se estudia una serie temporal. En este trabajo hemos comprobado que esta dependencia es tal que si disminuye la frecuencia de adquisición de datos, disminuye el valor del exponente de Lyapunov, con lo cual se hace mayor el horizonte de predicción. Interpretamos este resultado como un ejemplo del efecto que puede tener la inadecuada elección de una frecuencia de muestreo para la determinación de la evolución temporal de un observable físico, que viene gobernada por un comportamiento no lineal. Si la frecuencia de adquisición no es la adecuada, el sistema puede llegar a tener un exponente de Lyapunov negativo y el efecto sería una "linealización" del sistema y por lo tanto se pierde la información sobre la no linealidad y cualquier predicción a partir de este límite es altamente inadecuada. En este sentido, ligamos nuestro resultado preliminar y la interpretación del mismo con las carencias observadas en las bases de datos de temperatura y las recomendaciones para su mejora, tal y como se ha expuesto en la Introducción, planteadas por el MET

BIBLIOGRAFÍA

ARTIGAO, M.M., MIRALLES, J.J., MARTÍNEZ, J.A., SÁNCHEZ, M., 2007. *Estudio de la dinámica de la temperatura del aire mediante análisis no lineal de series temporales.* XII Congreso Nacional de Teledetección. Teledetección: Herramienta para la gestión sostenible. ISBN: 978-987-543-127-0.

CHEN, B., LI, B., DING, R. 2006. *Nonlinear local Lyapunov exponent and atmospheric predictability research*. Science in China Series D: Earth Sciences , 49(10), 1111—1120.

HEGGER, R., KANTZ, H-, SCHREIBER, T. 1999, *Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package*. Chaos, 9(2), 413-435.

KANTZ, H. 1994. *A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series*, Physics Letters. A, 185(1), 77-87.

ROSENSTEIN, M., COLLINS, J., DE LUCA, C. 1993. *A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets*. Physica D: Nonlinear Phenomena, 65(1-2), 117-134.

STOTT, P.A., THORNE, P.W., 2010. *How best to log local temperatures?* Nature, 465, 158-159.

TAKENS, F. 1981. *Detecting strange attractors in turbulence*. Lecture Notes in Mathematics, 898: 366-381.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido realizado con financiación del proyecto Ref. CGL2008-05688-C02-01/CLI.

Análisis de 7 años (2002-2008) de datos EOS-MODIS de contenido de vapor de agua sobre la Península Ibérica

Y.S. Bennouna[1], V.E. Cachorro[1] J. P. Ortiz de Galisteo[2], C. Toledano[1], A. Berjón[1], D. Fuertes[1], R. Gonzalez[1], B. Torres[1], J.L. Marcos[3], L. Martín[1] y A. M. de Frutos[1]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica (GOA). Universidad de Valladolid. Prado de la Magdalena a/n, 47071 Valladolid (Castilla y León, España). E-mail: yasmine@goa.uva.es

[2] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Delegación Territorial de Castilla y León, C/ Orión 1, 47014 Valladolid (Castilla y León, España).

[3] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Universidad de Valladolid (Palencia). Av. De Madrid 57, 34007 Palencia (Castilla y León, España).

RESUMEN

Esta investigación complementa un estudio previo sobre el ciclo anual del vapor de agua precipitable (PWV) en la península Ibérica derivado de 7 años de datos de GPS, radiosondeos y fotómetros. En este estudio el ciclo anual de PWV se ha derivado de dos tipos de datos diferentes sensor satelital MODIS obtenidos de la aplicación de dos algoritmos diferentes en las regiones de lejano (IR) y cercano infrarrojo (NIR) respectivamente. Se usa tanto la plataforma Terra como Aqua para el mismo periodo de 7 años (2002-2008) y sobre 15 estaciones EUREF de la península Ibérica. En todos ellos el ciclo anual presenta la forma típica de valores bajos en invierno y valores altos en verano, pero se muestra obviamente el gradiente norte-sur y las variaciones de este a oeste de esta variable atmosférica. También se han evaluado las diferencias entre las dos técnicas (IR, NIR) que utiliza MODIS para derivar el PWV. A su vez, los valores anuales se compararon con los obtenidos mediante los datos de red GPS.

Palabras clave: vapor de agua, teledetección, ciclo anual, satélite, MODIS.

ABSTRACT

This study comes to complement a previous study on the annual cycle of precipitable water vapor (PWV) over the Iberian Peninsula derived from 7 years of GPS, Radio Sounding and sun photometer data. Here, the annual cycle of PWV is derived from two types of MODIS satellite data obtained by two different algorithms applied to the infrared (IR) and near Infrared (NIR) spectral range, using both MODIS Terra and Aqua for the same 7 year period (2002-2008), at 15 EUREF sites in the Iberian Peninsula. At all sites the annual cycle presents the typical shape with low values in the winter and high values in the summer. These satellite results clearly depict the north-south gradient. The differences between the two techniques (IN, NIR) used to derive the PWV from MODIS observations are estimated. Besides, these annual cycles are evaluated by means of comparison with those obtained with the GPS network.

Keywords: *water vapor, remote sensing, annual cycle, satellite, MODIS.*

INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es el mayor gas de efecto invernadero en el sistema tierra-atmósfera pero su alta variabilidad espacial y temporal limita nuestro conocimiento sobre el balance de energía global y el del propio vapor de agua en este sistema. El parámetro a tener en cuenta para estos balances es lo que denominamos vapor de agua en columna o vapor de agua precipitable (PWV tomando las siglas en inglés) que es la integración del perfil del vapor de agua sobre toda la vertical de la atmósfera. Historicamente el perfil del vapor de agua se ha medido mediante radiosondeos. Hoy en día los datos proporcionados por los sistemas GPS (Ground Position Systems) de alta precisión pueden ser utilizados para determinar el PWV y por tanto estudiar esta variable. Como ejemplo podemos mencionar el trabajo de Ortiz de Galisteo *et al*. (2011) donde se analiza el ciclo de PWV para establecer su climatología sobre la Península Ibérica basado en 7 años (2002-2008) de datos. En dicho trabajo, estos resultados se han comparado con los datos de las observaciones de sondeos de las estaciones de la

AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) y con los datos de tipo fotométrico dados por la red RIMA ((Red Ibérica de Medida fotométrica de Aerosoles), federada en AERONET (Aerosol Robotic Network). El número de estaciones sobre tierra sigue siendo hoy en día escasa y los periodos cubiertos por esta base de datos son de momento bastante limitados (por ser una técnica relativamente nueva) para caracterizar la variabilidad climática de una determinada zona, que detalle los cambios anuales y estacionales del PWV a escala regional. Por tanto complementar los datos de esta variable con técnicas de teledetección satelital, pueden servir también de ayuda. Estas técnicas radiométricas sobre satélite proporcionan una base diaria y con una resolución espacial del orden de 1 a 5 km sobre periodos de tiempo relativamente largos. Con la nueva generación de satélites para la observación de la Tierra de la última década se ha mejorado considerablemente la cobertura espacial así como la calidad en la obtención de datos relativos a los parámetros de humedad de la atmósfera. El sensor MODIS ("Moderate Resolution Imaging Spectrometer") sobre las plataformas satelitales EOS (Earth Observing System (EOS) Terra y Aqua están mostrándose muy adecuadas para la determinación de diferentes propiedades de la atmósfera. Este trabajo complementa el estudio realizado por Ortiz de Galisteo *et al*. (2011). Aquí se toman los datos PWV de MODIS para el periodo 2002-2008 con el fin de construir el ciclo anual del contenido de vapor de agua sobre 15 estaciones de la Península Ibérica que corresponden a estaciones de tipo GPS, Radiosondeo o fotométrico. El trabajo evalúa también las diferencias de los dos algoritmos usados por el sensor MODIS para la determinación de la variable PWV, así como la comparación con los valores dados por la técnica GPS para el conjunto de estaciones en estudio.

METODOLOGÍA

El primer sensor instrumental MODIS fue lanzado a finales de 1999 sobre la plataforma orbital Terra, con una cobertura global diaria desde Febrero del 2000. El segundo sensor MODIS fue lanzado después sobre la plataforma Aqua dentro de la constelación de satélites que componen el A-Train en Junio de 2002. Ambas plataformas, Terra y Aqua suponen 4 pasadas por día sobre nuestra zona de estudio. Terra lo realiza entre 10:00-13:00 (UTC) por la mañana y 21:00-23:20 (UTC) por la noche, y Aqua entre 12:000-15:00 (UTC) y 01:00-03:00 (UTC) por la noche. MODIS mide la radiancia en 36 canales cubriendo el rango espectral de 0.44 a 15 μm, con una resolución espacial que varia desde 250 m (bandas 1 y 2), hasta 500 m (bandas 3-7) y 1 km (bandas 8-36). Los productos atmosféricos usados para el PWV son los productos estándar de nivel 2 de MODIS, lo que se denomina "collection 005" de NASA-GSFC: MOD05 para Terra y MYD05 para Aqua (http://modis.gsfc.nasa.gov). Estos productos de PWV se obtienen mediante dos métodos diferentes, uno basado en las bandas de absorción del vapor de agua en el infrarrojo lejano (IR) y otro en las bandas del infrarrojo cercano (NIR).

Site	Lat. (deg)	Lon. (deg)	Alt.	Media PWV (cm)	Media PWV (cm)
Alicante	38.33	-0.48	10	2.1±0.9	1.6±1.0
Almería	36.85	-2.46	77	1.7±0.7	1.7±0.9
Coruña	43.36	-8.40	12	1.8±0.8	1.2±0.8
Gibraltar	36.15	-5.35	3	2.0±0.7	1.6±0.8
Huelva	37.10	-6.73	0	2.2±0.8	1.4±0.8
Lisboa	38.76	-9.13	104	1.9±0.8	1.6±0.8
Madrid	40.46	-3.58	631	1.2±0.6	1.3±0.7
Murcia	38.00	-1.16	61	1.8±0.8	1.8±1.1
Palencia	41.98	-4.51	750	1.2±0.6	1.1±0.7
San Fernando	36.46	-6.20	40	2.0±0.8	1.7±0.8
Santander	43.46	-3.80	48	1.7±0.8	1.2±0.8
Valencia	39.48	-0.33	28	1.8±0.8	1.6±1.0
Villafranca	40.45	-3.95	596	1.3±0.6	1.3±0.7
Yebes	40.51	-3.08	921	1.2±0.6	1.2±0.7
Zaragoza	41.66	-1.00	263	1.5±0.7	1.5±0.9

Tabla 1: Información de la localización de la estaciones y valor medio anual de MODIS-PWV para los datos de tipo IR y NIR.

Las primeras determinaciones del contenido de vapor de agua en la atmósfera mediante sensores radiométricos sobre satélites se realizaron en la región del IR medio o lejano, y más recientemente se ha hecho uso de la radiación solar dispersada por la superficie terrestre en la región espectral alrededor de 1 μm. El algoritmo basado en las radiancias MODIS-IR de 3-14.5 μm obtiene los perfiles de temperatura y humedad, el contenido de ozono y la temperatura de la superficie de la tierra (S.W. Seeman and J. Li, 2003). El algoritmo MODIS NIR, es descrito en Gao *et al.* (2003) y está basado en la razón de las señales de las bandas que contienen la absorción del vapor de agua, 0.905 y 0.936 μm frente a las ventanas atmosféricas representadas por los canales de 0.865 y 1.24 μm. El algoritmo PWV-NIR solo es aplicable durante el día sobre zonas de tierra de baja reflectividad y sobre nubes tanto sobre tierra como sobre océano mientras que el algoritmo en el IR obtiene el PWV tanto durante el día como por la noche. Estos últimos datos se obtienen con una resolución espacial de 5x5 km^2 y los del NIR con una resolución de 1x1 km^2. Este estudio presenta los resultados para 15 de las estaciones usadas en Ortiz de Galisteo *et al*. (2011), cuyas coordenadas geográficas y altitud

se muestran en la Tabla 1. Para representar la variable PWV-MODIS sobre esas estaciones, se extrajeron los datos MODIS adecuados a fin de seleccionar todos los pixeles que cayeran dentro del área de 5 km alrededor de la estación, y promediados de forma que fueran coincidentes con el "overpass". Aquí nos centramos en la evaluación del ciclo anual de PWV para las diferentes estaciones y con 7 años de datos, desde 2002 a 2008. Se calcularon previamente los valores medios diarios sobre todos los "overpass" validos y después se calculó una única media mensual a través de todos los valores diarios de cada mes en ese periodo, lo que se denomina promedio mensual multi-anual.

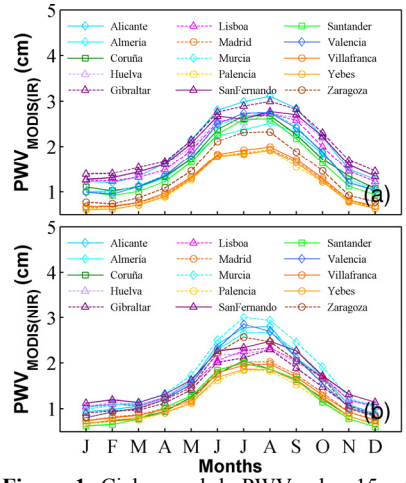


Figura 1: Ciclo anual de PWV sobre 15 estaciones de la Península Ibérica obtenidos de datos MODIS por el algoritmo: **a)** IR; **b)** NIR.

RESULTADOS

El ciclo anual de PWV-MODIS

El ciclo anual del vapor de agua (PWV) dado por MODIS según la metodología anterior se muestra in Figura 1. Para ambos métodos, tanto el IR (Figura 1a) como el NIR (Figura 1b) el PWV presenta un claro ciclo anual en todas las estaciones con valores bajos en invierno, con un mínimo entre 0.5 y 1.4 cm, y valores altos en verano, con el máximo variando entre 1.8 y 3.2 cm. Ambos resultados muestran un gradiente norte-sur del contenido de vapor de agua. En invierno, el gradiente norte-sur es menor en los datos de tipo IR comparado con el NIR, pero en verano ocurre lo contrario. En verano los valores de PWV son en general más altos en el Mediterráneo, tal como en Alicante y Valencia, y más bajos en lugares del interior como Palencia, Yebes y Villafranca. El mes de Julio presenta un mínimo característico de las estaciones del suroeste (Huelva y San Fernando) que es particularmente marcado en los datos de tipo IR. Curiosamente, en Gibraltar aparece un mínimo muy débil para los datos de NIR mientras que este desaparece o no existe en el caso de los IR. Este mínimo ha sido reportado en trabajos recientes como una característica de este ciclo anual (Ortiz de Galisteo *et al.*, 2011). Este mínimo parece estar correlacionado con el mínimo observado en el ciclo anual de otro parámetro atmosférico, el relativo al espesor óptico de aerosoles (Bennouna *et al.*, 2011). De la forma de este ciclo del PWV podemos clasificar la península Ibérica en 4 zonas o regiones: Atlántica, continental, Mediterránea, y zona suroeste.

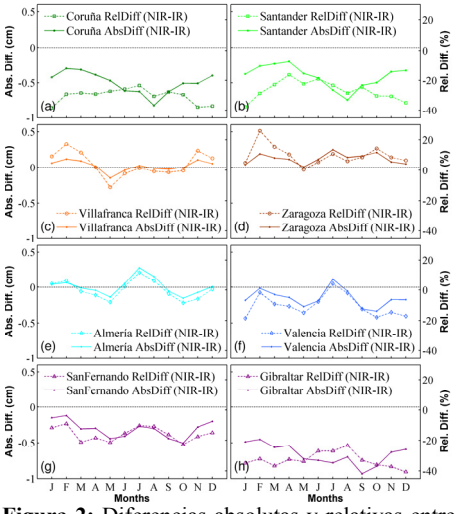


Figura 2: Diferencias absolutas y relativas entre el método NIR y IR (NIR-IR) para el ciclo anual del PWV en 8 estaciones: **a)** Coruña, **b)** Santander, **c)** Villafranca, **d)** Zamora, **e)** Almería, **f)** Valencia, **g)** Gibraltar y **h)** San Fernando.

Diferencias entre los datos MODIS IR y NIR

En la Figura 2 se muestran las diferencias (ambas, absoluta y relativa) entre el ciclo anual dado por el algoritmo IR y NIR para 8 estaciones entre las 15 incluidas en este estudio. Primeramente se muestran las diferencias de estas estaciones como representativas de cada región de la Península y en segundo lugar se dan dos ejemplos para cada una de estas 4 regiones, para mostrar mejor estos comportamientos. En general las diferencias absolutas entre estos dos métodos varían entre -1 y +0.4 cm, y las diferencias relativas presentan un amplio rango, variando

entre -40 y 30 %. Para la mayoría de los sitios analizados los valores de PWV dados por el método en el IR son mayores que los del NIR excepto para las estaciones del interior, Villafranca y Zaragoza y para la estación costera de Valencia. Las diferencias entre el IR y el NIR pueden variar entre un 15% (San Fernando) a un 30% (Zaragoza) para los valores mensuales. El acuerdo entre las dos técnicas en promedio es mejor es la estación de Villafranca, con un excelente acuerdo en los meses de verano. El peor acuerdo se ha obtenido en Gibraltar. Las variaciones del error absoluto y relativo están correlacionadas en el caso de Villafranca, Almería, Valencia y en mayor extensión en el caso de Zaragoza y San Fernando, mientras su comportamiento aparece diferente en sitios como La Coruña, Santander o Gibraltar.

Comparación entre los datos MODIS y GPS

Los ciclo anuales de PWV derivados por GPS en Ortiz de Galisteo *et al.* (2011) se han utilizado aquí para comparar con los datos de MODIS en todas las estaciones de estudio. En la Figura 3 se muestran los valores dados por los dos métodos de MODIS y por GPS para 4 estaciones: Coruña, Yebes, Almería y San Fernando.

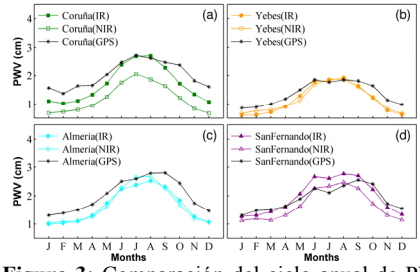


Figura 3: Comparación del ciclo anual de PWV en 4 estaciones GPS: **a)** Coruña, **b)** Yebes**, c)** Almería y **d)** San Fernando.

Como ya se mencionó las diferencias entre los métodos IR y NIR son mayores en la zona del Atlántico y suroeste de la península Ibérica, como se puede ver en las estaciones de la Coruña y San Fernando. En el caso de la Coruña, en general los valores de MODIS IR concuerdan mejor con los valores de GPS que los dados por MODIS NIR, y el mejor acuerdo aparece en los meses de verano, junio, julio Agosto. Para San Fernando es en verano cuando MODIS NIR concuerda mejor con GPS, pero en invierno lo hace con MODIS IR. Para un sitio continental como Yebes o Mediterráneo como Almería las diferencias entre los dos valores IN o NIR es depreciable. Sin embargo en este último caso aunque concuerda bien con el GPS durante el verano tiende a sobreestimar los valores de GPS sobre un 20% en invierno. En la mayoría de los casos MODIS infraestima los valores de GPS y el mejor acuerdo entre aparece en la estación de Yebes. El peor acuerdo se ha obtenido para La Coruña (costa Atlántica).

CONCLUSIONES

Se ha evaluado el ciclo anual del PWV sobre 7 años de datos del sensor MODIS (datos nivel 2) tanto para datos de tipo IN como NIR para 15 estaciones de la red GPS-EUREF, representativas de la Península Ibérica. El ciclo anual presenta valores altos en verano y bajos en invierno en todas las estaciones, comportamiento bien conocido, pero aquí se determinan con rigurosidad estos valores para cada estación para este tipo de dato satelital. También se muestra el conocido gradiente norte-sur. Se han evaluado las diferencias con GPS en todas estas estaciones y en general MODIS tiende a sobrestimar los valores de GPS, particularmente en invierno, mientras en verano son más parecidos. En general el mejor acuerdo se da para las estaciones del interior de la península o zonas continentales.

BIBLIOGRAFÍA

ORTIZ DE GALISTEO, J. P. *et al.*, 2011. *Analysis of the annual cycle of precipitable water vapor above the Iberian Peninsula*. International Journal of Climatology, Submitted in December 2010, under revision.

GAO, BC. and KAUFMAN, Y. J., 2003. *Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels*. Journal of Geophysical Research, 108(D13), 4389.

BENNOUNA, Y.S. *et al.*, 2011, *Comparison of atmospheric aerosol climatologies over southwestern Spain derived from AERONET and MODIS*, Remote Sensing of Environment, 115, 1272–1284.

SEEMANN, SW and Li, J., 2003, *Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances.* Journal of Applied Meteorology, 42, 1072-1091.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al equipo de NASA MODIS por los datos de este sensor y al MICIIN por la financiación de los proyectos CGL2008-05939-CO3-01/CLI yCGL2009-09740, y la Acción Complementaria CGL2010-09480-E. También al ITACyL la financiación del Proyecto EVACyL.

Validación horaria y diaria a escala regional del producto de Radiación Solar (*Down-welling Surface Short-wave radiation Flux* - DSSF) obtenido mediante imágenes MSG-SEVIRI

J. Cristóbal y M. C. Anderson[2]

[1] Departmento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra. 08193 Cerdanyola del Vallès (Catalunya, España). Correo electrónico: Jordi.Cristobal@uab.cat

[2] Hydrology and Remote Sensing Laboratory. United States Department of Agriculture. Agriculture Research Service. BARC-West. MD 20705. Beltsville (Maryland, USA).

RESUMEN

La radiación solar es una variable clave para entender el balance de radiación en la Tierra. En este trabajo se presenta una validación horaria y diaria a escala regional del producto de radiación solar del LSA SAF obtenido mediante imágenes MSG SEVIRI en Cataluña durante el periodo 2008-2009. La validación del producto de radiación solar de MSG con datos de estaciones meteorológicas ha ofrecido buenos resultados especialmente en zonas llanas con un R^2 y un RMSE promedio de 0.91 y 89 $W \cdot m^{-2}$, en la validación horaria, y de 0.97 y 1.3 $MJ \cdot m^{-2}$, en la validación diaria. En zonas montañosas se ha obtenido un mayor error, sugiriendo que es necesaria una futura mejora del modelo en estas zonas.

Palabras clave: radiación solar, teledetección, MSG SEVIRI.

ABSTRACT

Solar radiation plays a key role in to understand the radiation balance of the Earth. In this work we present an hourly and daily validation at regional scale of the LSA SAF solar radiation product obtained by means of MSG SEVIRI images in Catalonia during the period 2008-2009. The validation of the MSG solar radiation product show good agreement with meteorological stations solar radiation data, especially in flat areas with an average of R^2 and RMSE of 0.91 and 89 $W \cdot m^{-2}$, in the hourly validation, and of 0.97 and 1.3 $MJ \cdot m^{-2}$ in the daily validation. In mountainous areas the error was higher, suggesting the need for a future improvement of the model in these areas.

Keywords: *solar radiation, remote sensing, MSG SEVIRI.*

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es imprescindible para el cálculo de la evapotranspiración, tanto real como potencial, así como para la modelización de la temperatura del aire; variables de alta importancia en el seguimiento y conocimiento de las propiedades de los ecosistemas terrestres y para el suporte a la agricultura. Hoy en día existen una gran variedad de satélites, tanto geoestacionarios como heliosíncronos, a partir de los cuales se puede obtener la radiación solar a escala regional o global como son TERRA/AQUA, NOAA, GOES, o bien MSG. A diferencia de los sensores heliosíncronos, los sensores geoestacionarios son especialmente interesantes debido a su alta resolución temporal, que hace posible obtener la radiación solar a intervalos de 30 minutos, y a que cubren áreas muy extensas de territorio; como es el caso de MSG SEVIRI.

Actualmente, el *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility* (LSA SAF - landsaf.meteo.pt) ofrece gratuitamente un producto operativo de radiación solar (*Down-welling Surface Short-wave radiation Flux - DSSF*) obtenido mediante el sensor SEVIRI, a bordo del MSG, desde septiembre 2007. Este producto se genera a una resolución temporal de 30 minutos y a la resolución espacial de 3 km en el Ecuador mediante tres canales del espectro solar del sensor SEVIRI (VIS 0.6µm, NIR 0.8µm, SWIR 1.6µm).

En este trabajo se presenta una validación horaria y diaria a escala regional del producto de radiación solar del LSA SAF obtenido mediante imágenes MSG SEVIRI durante el periodo 2008-2009.

MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se este trabajo se centra en Cataluña (aproximadamente unos 32 000 km^2), noreste de la Península Ibérica (ver Figura 1). Para la validación del producto de radiación solar se han usado un total de 140 estaciones meteorológicas del Servei Meteorològic de Catalunya (www.meteocat.com) ubicadas en diferentes cubiertas y con diferente rango altitudinal. Para la validación se ha separado el conjunto de estaciones en dos subconjuntos: estaciones en zonas llanas, con un total de 100 estaciones y estaciones en zonas montañosas, con un total de 40 estaciones. La Figura 1 muestra la distribución espacial de las 140 estaciones meteorológicas.

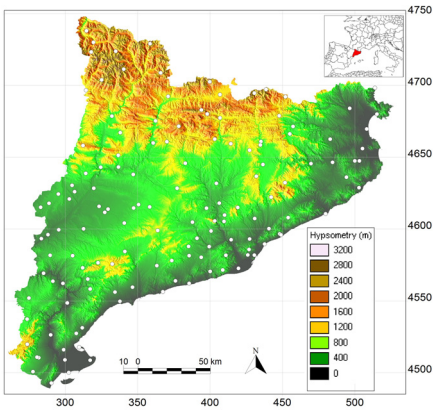


Figura 1: Distribución de las estaciones meteorológicas (puntos blancos) en Cataluña seleccionadas para la validación del producto de radiación solar. Coordenadas en UTM-31N divididas por 1000.

El producto de radiación solar, *Down-welling Surface Short-wave radiation Flux* (DSSF), se ha descargado desde el portal de acceso a los datos del *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility* (Land SAF) de Portugal (http://landsaf.meteo.pt/).

En total se han descargado 731 días correspondientes al periodo 2008-2009. Un día estándar consta de 48 ficheros en formato HDF5 correspondientes a la captación de una imagen cada 30', aunque hay días que presentan menos ficheros. En total se han descargado y procesado 33 973 archivos.

IMPORTACIÓN Y PROCESADO DEL PRODUCTO DE RADIACIÓN SOLAR

Las imágenes originales están en formato HDF5 y para su importación se ha implementado una rutina en IDL para leer los metadatos y los datos del producto de radiación solar. Además de los datos de radiación solar, el producto también incorpora un conjunto de tres máscaras con datos de de calidad de la imagen. En concreto, una máscara de tierra y mar, una máscara de nubes que incluye también nieves y hielos y una máscara con el algoritmo de radiación solar usado en cada situación (píxel claros, con nubes, con hielo o nieve, etc). Más información sobre el producto se puede encontrar en el manual de usuario (LSA SAF, 2010) y en el caso del algoritmo para la obtención de la radiación solar en Brisson *et al.* (1999) y Ocean & Sea Ice SAF (2002).

Cada imagen ha sido importada con toda sus máscaras correspondientes a formato MiraMon (Pons, 2004) que permite una documentación completa de todos los metadatos necesarios para la comprensión de las imágenes.

Las imágenes están en el sistema de proyección original, proyección geoestacionaria con elipsoide normalizado, y a una resolución espacial nominal de 3 km en el Ecuador. Se ha decidido trabajar en la proyección original para evitar el remuestro de los datos en su reproyección a otro sistema de referencia.

EXTRACCIÓN Y FILTRADO DE LOS DATOS DE RADIACIÓN SOLAR

Una vez importados los datos de radiación solar se ha procedido a la extracción de los datos y a su filtrado. La extracción de los datos se ha realizado mediante una interpolación bilineal entre las ubicaciones de las estaciones meteorológicas y las imágenes.

Para filtrar los datos del producto de radiación solar se han usado las máscaras de calidad asociados a cada imagen. Se ha construido una base de datos para la validación del producto en la que para cada registro horario de la estación meteorológica se le ha añadido los valores de las máscaras de calidad y el valor promedio del producto de radiación solar durante el intervalo horario. Esto ha permitido gestionar los datos de una manera eficiente gracias al uso de sentencias SQL ya que se ha podido filtrar al mismo tiempo los datos de radiación solar de las estaciones

meteorológicas y del producto de radiación solar.

Para llevar a cabo la validación del producto de radiación solar se han excluido del análisis aquellos píxeles que presentaban hielo o nieve, algún problema en el algoritmo de radiación solar utilizado o de adquisición de la imagen. Se han excluido también de la validación aquellas imágenes fuera del intervalo entre el alba y la puesta del Sol, ya que el hecho de incluir estos datos en la validación puede enmascarar los resultados. El cálculo del alba y la puesta del Sol para cada día y estación meteorológica se ha llevado a cabo mediante la metodología propuesta por Orús *et al.* (2007).

Finalmente, para el cálculo de la radiación solar a nivel diario se han seleccionado aquellos días en que se tuviesen datos de radiación solar en toda la franja horaria entre el alba y la puesta del Sol.

RESULTADO DE LA VALIDACIÓN

Resultados horarios

En el caso de la validación horaria para el subconjunto de estaciones en zonas llanas se ha obtenido un R^2 y un RMSE promedio igual a 0.91 y 89 $W \cdot m^{-2}$, respectivamente (ver Tabla 1); y para el subconjunto de estaciones en zonas montañosas de 0.86 y 112 $W \cdot m^{-2}$, respectivamente (ver Tabla 1). Es interesante remarcar que en las estaciones meteorológicas ubicadas en zonas montañosas el RMSE es más alto y el R^2 más bajo que las estaciones en zonas llanas, teniendo en cuenta que el tamaño de la muestra es cuatro veces menor que en zonas llanas. Esto se debe, principalmente, a la resolución es espacial de MSG-SEVIRI, ya que en zonas montañosas, un píxel de 3 km es menos representativo de la radiación solar en zonas con una alta heterogeneidad orográfica que en zonas llanas, donde el ajuste es mejor.

Las Figura 2 muestra la evolución diaria de la radiación solar en un día claro en una estación ubicada en una zona llana. Como se puede ver en la Figura 2, en días claros, normalmente, el ajuste entre el modelo de radiación solar de MSG y los datos de la estación meteorológica es muy bueno. En días nublados (Figura 3), aunque el modelo reproduce el comportamiento medido en la estación meteorológica, el error parece aumentar. Queda para futuros trabajos la comparación entre días claros y días con nubes.

Resultados diarios

En el caso de la validación diaria para el subconjunto de estaciones en zonas llanas se ha obtenido un R^2 y un RMSE promedio igual a 0.97 y 1.3 $MJ \cdot m^{-2}$, respectivamente (ver Tabla 2); y para el subconjunto de estaciones en zonas montañosas de 0.90 y 2.7 $MJ \cdot m^{-2}$, respectivamente (ver Tabla 2). Como en el caso horario, la validación en zonas montañosas ofrece un RMSE más alto y un R^2 más bajo que las estaciones en zonas llanas.

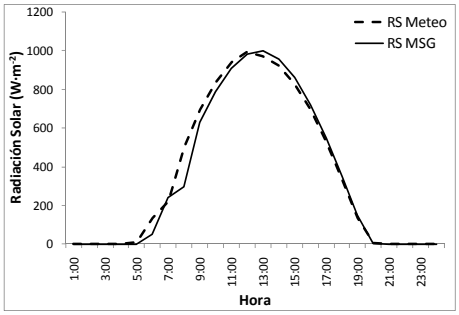


Figura 2: Ejemplo de la variación de la radiación solar para un día claro, 17/07/2009 en la estación con código UL. RS Meteo es la radiación solar medida en la estación meteorológica y RS MSG es la radiación solar del producto de MSG.

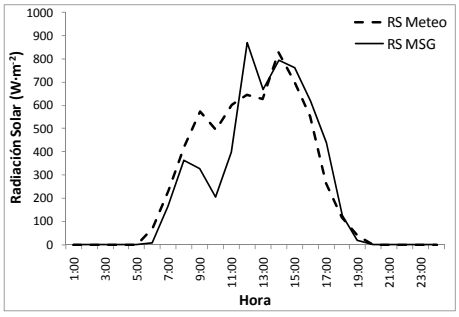


Figura 3: Ejemplo de la variación de la radiación solar para un día con nubes, 02/10/2009 en la estación con código DO.

Finalmente, los resultados de la validación en el subconjunto de las estaciones en zonas llanas muestran un buen comportamiento, especialmente en el caso diario, y presentan mejores resultados que los obtenidos en el caso del subconjunto de estaciones en zonas montañosas. Esto sugiere que el producto es operativo para la obtención de la radiación solar, tanto horaria como diaria, en zonas llanas. Por otro lado, en zonas montañosas sería interesante llevar a cabo una mejora del algoritmo, usando un método

combinado con modelos que obtienen la radiación solar basados en un MDE de mayor resolución espacial (Pons y Ninyerola, 2008). Además, el buen comportamiento del producto de radiación sola posibilita el hecho de poder introducirlo en modelos más complejos como por ejemplo la obtención de la evapotranspiración real (Anderson *et al.*, 1997) o la temperatura del aire (Cristóbal *et al.*, 2008).

Zona	Año	RMSE	R^2	n
Llana	2008	95	0.90	218700
	2009	83	0.92	217269
Montañosa	2008	117	0.85	80781
	2009	107	0.87	81138

Tabla 1: Medidas de error promedio de la validación horaria del producto de radiación solar en función de la zona donde se encuentra la estación meteorológica. RMSE es el error medio cuadrático en $W \cdot m^{-2}$, R^2 el coeficiente de determinación y n el tamaño de muestra.

Zona	Año	RMSE	R^2	n
Llana	2008	2.2	0.93	16991
	2009	1.7	0.96	17070
Montañosa	2008	2.9	0.88	6302
	2009	2.5	0.92	6405

Tabla 2: Medidas de error promedio de la validación diaria del producto de radiación solar en función de la zona donde se encuentra la estación meteorológica. RMSE en $MJ \cdot m^{-2}$.

CONCLUSIONES

La validación de los datos del producto de radiación solar de MSG ha ofrecido buenos resultados especialmente en zonas llanas con un R^2 y un RMSE promedio de 0.91 y 89 $W \cdot m^{-2}$, en la validación horaria, y de 0.97 y 1.3 $MJ \cdot m^{-2}$, en la validación diaria. En zonas montañosas se ha obtenido un mayor error, sugiriendo que es sería interesante una mejora del modelo en estas zonas. Los resultados obtenidos hacen que este producto sea operativo para poderlo introducir en modelos más complejos para obtener la evapotranspiración real o de temperatura del aire.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, M.C., NORMAN, J.M., DIAK, G.R., KUSTAS, W.P. y MECIKALSKI, J.R., 1997. *A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing*. Remote Sensing of Environment, 60, 195.

CRISTÓBAL, J., NINYEROLA, M. y PONS, X. 2008. *Modeling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data*. J. Geophys. Res., 113, D13106.

PONS, X. 2004. MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra. ISBN: 84-931323-4-9

PONS X. y NINYEROLA M., 2008. *Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data*. International Journal of Climatology, 28, 1821-1834.

ORÚS, J. J., CATALÀ, M. A. y NÚÑEZ, J., 2007. *Astonomía esférica y mecánica celeste*. Publicacions y Edicions de la Universitat de Barcelona, 24. ISBN: 978-84-475-3059-5.

LSA SAF, 2010. The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF). Product User Manual Down-welling Shortwave Flux (DSSF). http://landsaf.meteo.pt/algorithms.jsp?seltab=1&starttab=1

BRISSON A., LE BORGNE P. y MARSOUIN A., 1999. *Development of Algorithms for Surface Solar Irradiance retrieval at O&SI SAF low and Mid Latitude*, Météo-France/CMS, Lannion.

Ocean & Sea Ice SAF, 2002, Surface Solar Irradiance Product Manual, Version 1.2. http://saf.met.no/docs/

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado gracias a la beca de estancias de investigación financiada por la Generalitat de Catalunya (Talència) con referencia 2009BE2 00188 y GRUMETS (2009SGR1511) y al soporte económico del USDA. Parte de este estudio será usado en el proyecto Europeo FP7 "QUAlity aware VIsualisation for the Global Earth Observation System of Systems (GeoViQua)" con referencia 265178.

Análisis del producto MODIS de perfiles atmosféricos: aplicación a la Península Ibérica

J. C. Jiménez-Muñoz, J. A. Sobrino, C. Mattar, B. Franch, G. Sòria, V. Hidalgo, R. Oltra-Carrió y Y. Julien

UCG-LPI. Universitat de València. Parc Científic. C/ Catedrático Agustín Escardino, nº 9. 46980 Paterna (Valencia, España). Correo electrónico: jcjm@uv.es

RESUMEN

El producto MODIS de perfiles atmosféricos (MOD07) incluye distintos parámetros atmosféricos tales como contenido total de ozono y vapor de agua, así como temperatura y presión de la superficie. Además, incluye valores de temperatura, presión y humedad en 20 niveles de presión distintos (desde los 1000 hasta los 5 hPa), proporcionando por lo tanto perfiles atmosféricos. Estos productos se encuentran disponibles a una resolución espacial de 5×5 km en imágenes diarias tanto diurnas como nocturnas desde marzo de 2000 hasta la actualidad. En este trabajo se analizan algunos resultados extraídos de los productos MOD07 sobre la Península Ibérica, tanto desde el punto de vista de su utilidad a la hora de realizar correcciones atmosféricas de imágenes de satélite obtenidas en el dominio térmico, así como el análisis de la evolución temporal de distintos parámetros atmosféricos y de superficie.

Palabras clave: MODIS, MOD07, perfiles atmosféricos, vapor de agua, temperatura.

ABSTRACT

MODIS atmospheric profiles product (MOD07) includes different atmospheric parameters such as ozone and water vapor total content, as well as surface pressure and temperature. It also includes vertical profiles of temperature, pressure and humidity values at 20 different pressure levels (from 1000 hPa to 5 hPa). These products are provided at 5×5 km spatial resolution at daily (day/night) basis from year 2000 to present. In this work we analyse results extracted from MOD07 over the Iberian Peninsula for atmospheric correction purposes and also for trends analysis of different atmospheric and surface parameters.

Keywords: *MODIS, MOD07, atmospheric profiles, water vapor, temperature.*

INTRODUCCIÓN

El proceso de corrección atmosférica es uno de los elementos fundamentales a la hora de obtener de forma precisa variables geo-biofísicas a partir de los datos proporcionados por sensores a bordo de satélites destinados a la Observación de la Tierra.

Básicamente, la corrección atmosférica consiste en la eliminación de la perturbación producida por la capa atmosférica existente entre la superficie y el sensor. Por lo tanto, el objetivo es transformar los valores (radiancias) medidos por el sensor (valores en el techo de la atmósfera, TOA en inglés) en valores a nivel de superficie. La relación entre los valores en ambos niveles nos la propociona la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR), escrita en su forma final de distintas maneras dependiendo del rango espectral considerado. En la ETR aparecen una serie de parámetros atmosféricos que pueden calcularse de forma precisa a partir de perfiles atmosféricos y códigos de transferencia radiativa. Por lo tanto, la disponibilidad de perfiles atmosféricos para la hora de adquisición (o bien una hora lo más cercana posible) de la imagen es un hecho crucial para realizar una corrección atmosférica adecuada.

Por otro lado, la disponibilidad de perfiles atmosféricos de forma continua a lo largo del tiempo resulta de gran interés a la hora de analizar cambios o tendencias climáticas de distintos parámetros meteorológicos. En la actualidad existen distintas fuentes de perfiles atmosféricos, como productos obtenidos a partir de sondas infrarrojas, productos de reanalysis o bien los radiosondeos lanzados de forma periódica en distintas estaciones. El inconveniente de los

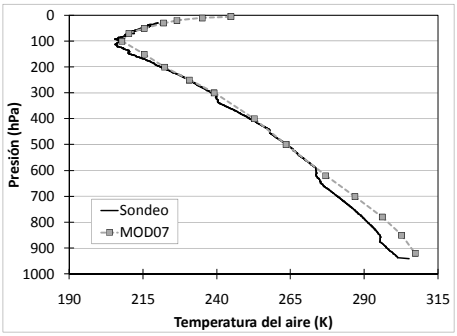
productos obtenidos a partir de sondas o datos de reanalysis es su baja resolución espacial, mientras que el principal inconveniente de los datos de radiosondeos es que se localizan en puntos concretos de la superficie, por lo tanto no proporcionan información acerca de la distribución espacial de las variables.

El objetivo de este trabajo es analizar el producto MODIS de perfiles atmosféricos (MOD07), que proporciona valores de temperatura del aire y humedad a 20 niveles atmosféricos con una resolución espacial de 5-km. La ventaja del producto MOD07 es su alta resolución espacial en comparación con otros productos, y la disponibilidad a nivel diario (día y noche) desde el año 2000 (Seemann et al., 2006). El estudio se centra en la Península Ibérica, analizando tanto la utilidad del producto MOD07 para correcciones atmosféricas en el infrarrojo térmico, como su utilidad en el estudio de la evolución temporal del vapor de agua y la temperatura del aire.

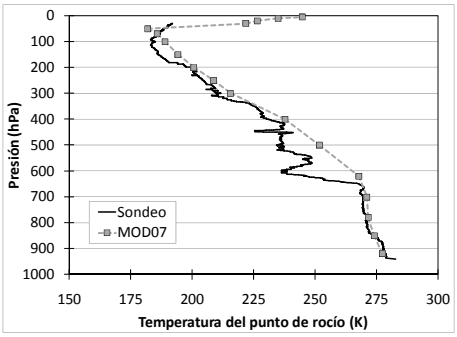
CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN EL INFRARROJO TÉRMICO: APLICACIÓN A LANDSAT5/TM

En el caso del InfraRrojo Térmico (IRT), la corrección atmosférica tiene como objetivo final la obtención de la Temperatura (y en ocasiones la emisividad) de la Superficie Terrestre (TST). Para poder realizar este proceso es necesario, es necesario conocer la transmisividad atmosférica (τ) y las radiancias atmosféricas ascendente ($L^{\uparrow}$) y descendente ($L^{\downarrow}$). Estos parámetros pueden obtenerse a partir del perfil atmosférico y del código MODTRAN4 (Berk et al., 1999).

En la Figura 1 se muestra la comparación del perfil vertical de temperatura del aire y de humedad (temperatura del punto de rocío) extraído del producto MOD07 con el proporcionado por un radiosondeo lanzado el día 13 de Julio de 2005 en la zona agrícola de Barrax (Albacete, España). Con respecto a la temperatura del aire, se puede observar como el producto MOD07 reproduce las variaciones en altura obtenidas con el radiosondeo, si bien se observan diferencias significativas en los primeros niveles (entre 1000 y 600 hPa). Diferencias también significativas se pueden observar en la temperatura del punto de rocío para la zona comprendida entre los 700 y 400 hPa, así como en los últimos niveles (por encima de los 100 hPa).



(a)



(b)

Figura 1: Comparación entre el perfil vertical proporcionado por el producto MOD07 y el obtenido a partir de un radiosondeo lanzado en la zona agrícola de Barrax el día 13 de Julio de 2005 alrededor de las 11 UTC: a) temperatura del aire y b) temperatura del punto de rocío.

Estos perfiles se han utilizado para calcular los parámetros atmosféricos (τ, $L^{\uparrow}$ y $L^{\downarrow}$) y obtener la TST a partir de una imagen Landsat5/TM utilizando el algoritmo monocanal propuesto en Jiménez-Muñoz et al. (2009). La diferencia en la TST utilizando el producto MOD07 o el radiosondeo para realizar la corrección atmosférica fue de (0.6±0.1) K.

Con el fin de obtener la variación espacial de los parámetros, los perfiles atmosféricos extraídos del producto MOD07 para cada píxel fueron introducidos en MODTRAN4 para generar imágenes de estos parámetros. La Figura 2 muestra un ejemplo para el caso de la banda térmica (banda 6, 10-12.5 μm) del sensor TM (Landsat5).

Comparaciones con otros perfiles atmosféricos y la aplicación del producto MOD07 a la corrección atmosférica de otros sensores y en otros rangos espectrales pueden encontrarse en

Jiménez-Muñoz et al. (2010).

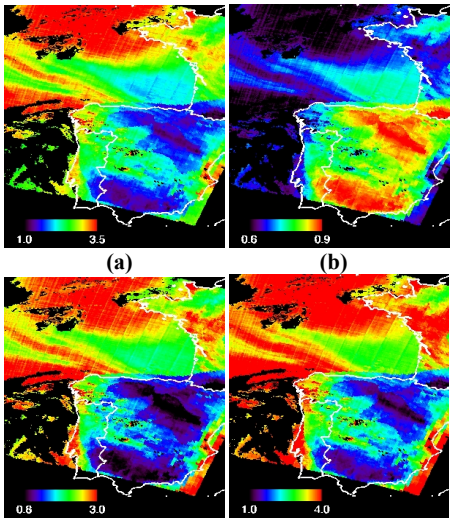


Figura 2: (a) Vapor de agua (g/cm^2), **(b)** transmisividad (τ), **(c)** radiancia atmosférica ascendente ($L^{\uparrow}$) y **(d)** radiancia atmosférica descendente en nadir ($L^{\downarrow}$) obtenidos a partir del producto MOD07 (13 de Julio de 2005; 11:45 UTC) y el código MOTRAN4. Los valores de τ, $L^{\uparrow}$, y $L^{\downarrow}$ corresponden al promedio para la banda térmica del sensor TM a bordo de Landsat 5. Los valores de radiancias vienen dados en unidades de $w \cdot m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$.

VALIDACIÓN: VAPOR DE AGUA Y TEMPERATURA DEL AIRE

El de vapor de agua y la temperatura del aire a varios niveles incluidos en el producto MOD07 se han validado a partir de los valores medidos por los radiosondeos lanzados periódicamente (a las 12 y 00 UTC) en las distintas estaciones localizadas en la Península Ibérica.

La Figura 3 muestra los resultados de la validación del vapor de agua (incluyendo tanto datos diurnos como nocturnos) a partir de los valores medidos en la estación de Madrid, con un error inferior a 0.3 g/cm^2 y un sesgo prácticamente nulo.

En la Figura 4 se muestran los resultados de la validación de la temperatura del aire para el nivel de los 1000 hPa en la estación de La Coruña, representando de forma independiente los datos diurnos (12 UTC) y los datos nocturnos (00 UTC). Los errores obtenidos son inferiores a 4 K, si bien en los datos diurnos se observa un bias (valor MOD07 menos valor del radiosondeo) de 2 K, mientras que en los datos nocturnos el bias es de -0.5 K.

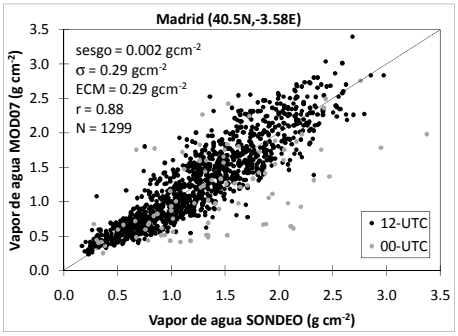


Figura 3: Comparación entre los valores de vapor de agua (g/cm^2) extraídos del producto MOD07 y los valores obtenidos a partir de los radiosondeos lanzados en la estación de Madrid a las 12 y 00 UTC para el periodo 2000-2010.

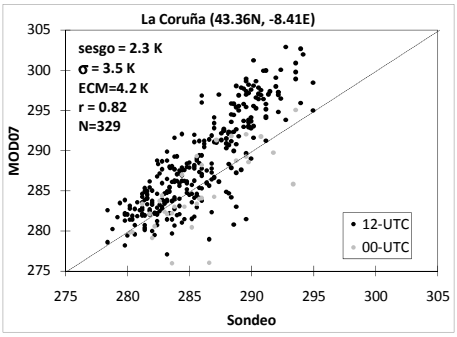


Figura 4: Comparación entre los valores de temperatura del aire (K) a 1000 hPa extraídos del producto MOD07 y los valores obtenidos a partir de los radiosondeos lanzados en la estación de La Coruña a las 12 y 00 UTC para el periodo 2000-2010.

APLICACIÓN

Mapas de la Península Ibérica

A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 5 los promedios mensuales del vapor de agua y la temperatura del aire a 850 hPa para los meses de enero y julio del año 2010.

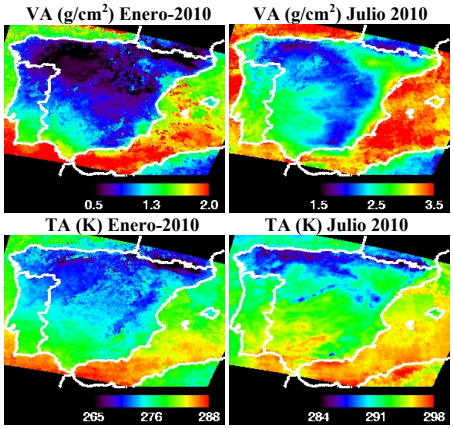


Figura 5: Promedio mensual del Vapor de Agua (VA) y la Temperatura del Aire (TA) a 850 hPa obtenido a partir de los productos MOD07 para los meses de enero y julio de 2010.

Evolución temporal en la región de Mieres

A partir de los productos nocturnos MOD07 generados desde el año 2001 hasta el año 2010, se ha analizado la variación temporal de los promedios mensuales del vapor de agua y la temperatura del aire a 920 hPa para un píxel centrado en Mieres (43.25N, -5.78E). Los resultados se muestran en la Figura 6. Se puede observar una tendencia negativa tanto en la temperatura del aire como en el vapor de agua, si bien esa tendencia parece no ser significativa.

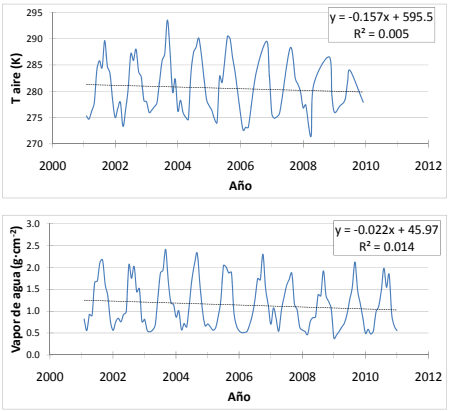


Figura 6: Valores medios mensuales nocturnos de temperatura del aire a 920 hPa y vapor de agua obtenidos a partir del producto MOD07 sobre la región de Mieres.

CONCLUSIONES

El producto MOD07 incluye información de gran utilidad para realizar correcciones atmosféricas de imágenes de satélite y para analizar las variaciones de ciertas variables climáticas (temperatura del aire y vapor de agua) en la última década (desde el año 2000). En el futuro se pretende extender la validación a datos medidos en otras estaciones, así como analizar tendencias en distintas regiones de la Península Ibérica.

BIBLIOGRAFÍA

BERK, A., ANDERSON, G.P., ACHARYA, P.K., CHETWYND, J.H., BERNSTEIN, L.S., SHETTLE, E. P. *et al.*, 1999. *MODTRAN4 User's Manual*. Hanscom AFB, MA: Air Force Research Laboratory.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., CRISTÓBAL, J., SOBRINO, J.A., SÒRIA, G., NINYEROLA, M. y PONS, X., 2009. *Revision of the Single-Channel algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(1), 339-349.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., SOBRINO, J.A., MATTAR, C. y FRANCH, B., 2010. *Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products*. Remote Sensing of Environment, 114, 2195-2210.

SEEMANN, S.W., BORBAS, E.E., LI, J., MENZEL, W.P. y GUMLEY, L.E., 2006. *MODIS Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document*. University of Wisconsin, Madison.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unión Europea (proyectos CEOP-AEGIS y WATCH) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto EODIX) por la ayuda financiera.

Estimación de la temperatura del aire a nivel superficial a partir de imágenes de satélite

R. Niclòs[1], J.A. Valiente[2], M.J. Barberà[2], M.J. Estrela[3] y V. Caselles[1]

[1] Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner, 50, 46100 Burjassot (Valencia, España). Correo electrónico: Raquel.Niclos@uv.es

[2] Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo CEAM - UMH. C/ Charles R. Darwin, 14, 46980 Paterna (Valencia, España).

[3] Departamento de Geografía. Universidad de Valencia. C/ Blasco Ibáñez, 28, 46010 Valencia (España).

RESUMEN

El conocimiento de los patrones de variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en superficie resulta clave para estudiar y comprender el clima y la meteorología específica de una región determinada. El objetivo de este trabajo es establecer correlaciones que nos permitan estimar dicha temperatura a nivel instantáneo a partir de la observación de la temperatura de la superficie terrestre desde satélite, de forma que podamos generar imágenes de temperatura del aire en superficie, con la continuidad espacial que esto implica en comparación con la medida desde estaciones meteorológicas. Sin embargo dichas correlaciones muestran dependencia con el tipo de cobertura terrestre y las condiciones geográficas y meteorológicas del emplazamiento de estudio, por lo que analizamos la inclusión de otras variables en las ecuaciones para la estimación de la temperatura del aire en superficie.

Palabras clave: temperatura del aire en superficie, temperatura de la superficie terrestre, teledetección.

ABSTRACT

The knowledge of the spatial and temporal patterns of surface air temperature is essential to monitor and define the climate and meteorology of a specific geographic region. The objective of this work is to establish correlations to estimate this temperature at an instantaneous level from satellite-retrieved land surface temperature to generate surface air temperature images, with the spatial continuity that they mean instead of that from meteorological station measurements and with a frequency given by satellite temporal resolutions. Nevertheless, such correlations depend on the land cover and the geographical and meteorological conditions of the studied sites, and therefore the inclusion of other variables in the equations to estimate surface air temperature is also analyzed.

Keywords: *surface air temperature, land surface temperature, remote sensing.*

INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire en superficie (T_a), definida entre 1 y 2m sobre la superficie terrestre, es una magnitud meteorológica y climática clave que nos permite cuantificar los procesos de intercambio a nivel superficial. La T_a ha sido tradicionalmente medida desde estaciones meteorológicas, de forma que la disponibilidad de datos ha venido limitada por la densidad y la distribución de la red de estaciones existentes. El objeto de este estudio es establecer correlaciones de estas medidas de T_a con variables obtenidas mediante teledetección y parámetros geográficos con las que poder generar mapas continuos de T_a, evitando la discontinuidad de los datos de campo. Para ello se han utilizado: datos meteorológicos medidos por la red de estaciones del Instituto CEAM-UMH, distribuidas en la Comunidad Valenciana, imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de los satélites EOS-Aqua y EOS-Terra, y datos geográficos y de cobertura terrestre.

DATOS UTILIZADOS

Para este estudio se seleccionaron imágenes libres de nubes del EOS-MODIS durante los meses de verano de 2009. La temperatura de la superficie terrestre (LST) fue obtenida a partir del producto EOSAqua-MODIS MYD11A1. Este producto se genera diariamente con una resolución espacial de 1km y contiene LSTs para el

paso diurno y nocturno del satélite, emisividades para los canales 31 y 32 (10,8-11,3µm y 11,8-12,3µm) usados en el algoritmo split-window de corrección atmosférica, tiempo de adquisición y ángulo de visión del satélite para cada pixel, además de indicadores de calidad. Se tomaron imágenes del EOSAqua-MODIS debido a que sus tiempos de adquisición sobre nuestra región (12-14UTC de día y 1-3UTC de noche, unas dos horas después a la adquisición de EOSTerra-MODIS) estaban más cerca de los tiempos de registro de las T_a máximas y mínimas del ciclo diurno. Además, se obtuvieron índices de vegetación espectrales, *Normalized-Difference Vegetation Index* (NDVI) y *Enhanced Vegetation Index* (EVI), a partir del producto MYD13A2, generado mediante composición de imágenes cada 16 días con una resolución espacial de 1km, y albedo (AL) con el producto MCD43A3, también disponible cada 16 días pero con una resolución espacial de 500m. Finalmente, generamos un mapa de tipologías de coberturas terrestres, o usos de suelo, a nivel regional mediante la aplicación de un método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud con una selección de polígonos CORINE representativos y comprobados como áreas verdad-terreno e imágenes espectrales del parámetro isotrópico de la Función de Distribución de Reflectividad Bidireccional (BRDF) proporcionado cada 16 días por el producto MCD43A1 (Niclòs *et al.*, 2010a).

A su vez, se midieron datos meteorológicos cada 10 minutos con la red de 36 estaciones del CEAM-UMH (http://www.ceam.es/ceamet/), la cual registra sistemáticamente: T_a, humedad relativa (Hr), dirección del viento, velocidad del viento (WS), precipitación e irradiancia solar (I), esta última solo en 13 estaciones. Dos de ellas cuentan además con radiómetros térmicos Apogee SI-111 & SI-112 (8-14 µm), cuyas medias de LST sirvieron para analizar la relación entre LST-T_a e I (Niclòs *et al.*, 2010b). En ambos casos se observó un incremento de LST-T_a con I, pero el grado de la dependencia fue diferente para cada lugar, siendo inferior en la zona con cobertura vegetal completa y bajo estrés hídrico. Estas medidas de LST fueron también usadas para validar las imágenes MODIS de LST, comprobándose que era conveniente limitar su uso dentro de este estudio a aquellas imágenes con ángulos de visión inferiores a 40º, puesto que su error aumentaba con el ángulo.

Ninyerola *et al.* (2007) y Cristobal *et al.* (2008) señalaron una dependencia de la T_a con variables geográficas, tales como: elevación (h), latitud (Lat), continentalidad y curvatura del terreno. Zaksek y Schroedter-Homscheidt (2009) también consideraron la dependencia con la curvatura del terreno e introdujeron un término definido como la diferencia entre la elevación de la estación y la elevación media en 20km (Δh). Así, se utilizó un modelo de elevación digital, con el que se obtuvieron orientaciones y pendientes topográficas (φ, s), distancia a la costa (dist), como una medida de continentalidad, y Δh. Adicionalmente, se calcularon los ángulos solares cenital y acimutal (z, a; con a=0º para S y a>0º hacía el E) en función del tiempo y la localización de cada estación.

Finalmente, se conformó una base de datos simultáneos de variables meteorológicas de campo (T_a, Hr, I y WS), datos obtenidos desde satélite (LST, NDVI, y AL) y datos geográficos (Lat, h, dist, Δh, φ, s, z y a) durante los meses del verano de 2009. 845 datos fueron finalmente usados para analizar las dependencias de la T_a durante la noche (después de eliminar las LSTs obtenidas desde satélite con ángulos >40°). Los datos analizados para el día fueron 285 debido al menor número de estaciones con medida de I, magnitud clave en este caso.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En primer lugar se analizó la dependencia de la T_a frente a todas las variables citadas, comprobándose la existencia de dependencias, más o menos acusadas, con: 1-NDVI, AL, I, Hr, WS, Lat, h, dist, Δh, cosz, y principalmente con LST. Tras esto, las bases de datos diurna y nocturna fueron separadas de forma aleatoria en una base de entrenamiento (con 80% de los datos) y otra de validación (20%). Ajustando T_a en función de LST (ambos en K) sobre la base de entrenamiento obtuvimos las siguientes relaciones: T_a=0,40LST+178,7 para los datos diurnos, con un coeficiente de determinación, r^2, de 0,41 y un error de estimación, $\sigma(T_a)$, de ±2K, y T_a=0,94LST+19,3 para los nocturnos, con r^2=0,71 y $\sigma(T_a)$=±1,8K. Las T_a calculadas con estas relaciones fueron comparadas con los datos de T_a de la base de validación, obteniendo errores sistemáticos o diferencias de -0,6K y 0,05K para día y noche, y desviaciones estándar, σ, de ±2K y ±1,7K respectivamente, con errores cuadráticos medios, RMSE, del mismo orden. A su vez, aplicamos un método *stepwise* (Draper y Smith, 1998) sobre la base de entrenamiento con el fin de seleccionar los términos estadísticamente significativos en una regresión multilineal de T_a con todas las variables con las que presentaba

dependencia, no únicamente la LST. De este modo obtuvimos las siguientes ecuaciones:

$$T_a=0,26LST-12,4(1-NDVI)-5,9I-0,102Hr-0,031Lat-0,8h-0,081dist+27,0AL+260,1 \quad (1)$$

$$T_a=0,86LST+1,7(1-NDVI)-0,130Hr+0,00056Hr^2-0,009Lat-0,7h-0,008dist-10,6AL+56,1 \quad (2)$$

La Ecuación 1 corresponde a la regresión obtenida para los datos diurnos (r^2=0,80 y $\sigma(T_a)$=±1,2K) y la 2 para los nocturnos (r^2=0,88 y $\sigma(T_a)$=±1,2K), las cuales muestran RMSEs sobre la base de validación de ±1,3K (con errores sistemáticos de -0,21K y -0,08K respectivamente, y σ de ±1,2K en ambos casos). La Figura 1 muestra las T_a calculadas con dichas ecuaciones frente a las medidas presentes en las bases de entrenamiento y validación. El buen acuerdo entre los resultados en ambas bases prueba la consistencia de las ecuaciones propuestas. Asimismo se probaron ecuaciones similares sin los términos de Hr, dado que su estimación puede resultar difícil sin datos de campo, pero ofrecían un RMSE mínimo de ±1,7K en la T_a tanto de día como de noche. Adicionalmente, se evaluó la bondad del modelo diurno propuesto por Zaksek y Schroedter-Homscheidt (2009) en nuestra región, obteniendo un RMSE mayor a ±3K tanto sobre la base de entrenamiento como la de validación. La Figura 2 muestra la T_a calculada con dicho modelo frente a los datos medidos, mostrando discrepancias mucho mayores a las de la Ecuación 1 propuesta. También se comprobó la bondad tras su ajuste a la base de datos de entrenamiento, pero el RMSE no bajó de ±2K.

Finalmente, dado que en la base de datos generada existían medidas tomadas en localizaciones con diferentes tipos de coberturas terrestres, se comprobó la bondad de las Ecuaciones 1 y 21 para cuatro tipos genéricos de superficies: matorral, bosque, zona de cultivo, y áreas urbanas. La figura 3 muestra los resultados para las diferentes coberturas, probando el buen funcionamiento de las ecuaciones propuestas para todas ellas a causa de la inclusión de términos relativos a variables superficiales como NDVI y AL.

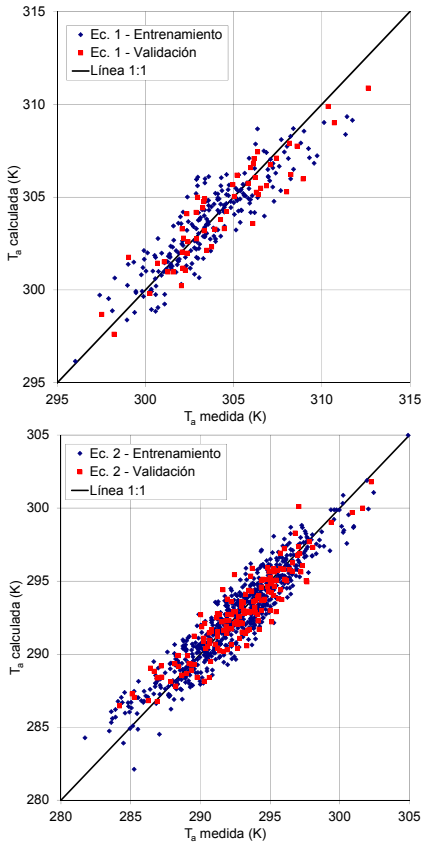


Figura 1: Valores calculados mediante las Ec. 1-2 propuestas frente a datos medidos por las estaciones en ambas bases de datos.

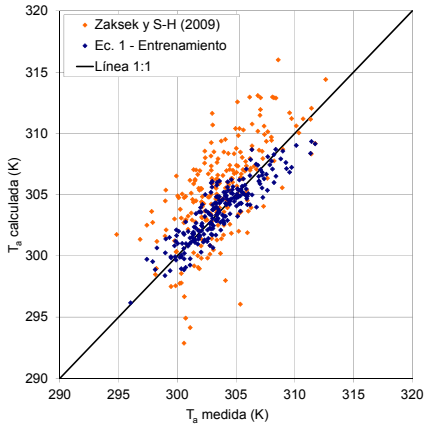


Figura 2: Valores calculados con el modelo de Zaksek y Schroedter-Homscheidt (2009) y la Ec. 1 frente a datos medidos por las estaciones.

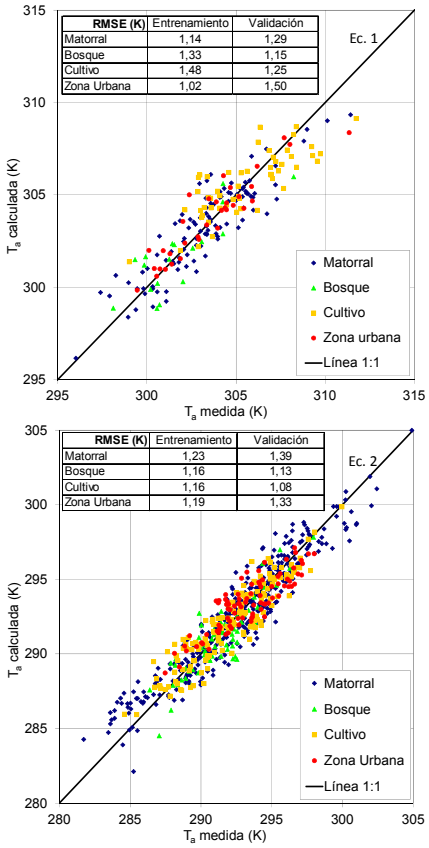


Figura 3: Resultados de las Ec. 1-2 para diferentes tipos de coberturas terrestres.

CONCLUSIONES

Este trabajo propone ecuaciones para la obtención de mapas de T_a a partir de imágenes MODIS y parámetros geográficos. El uso de regresiones lineales con la LST obtenida desde satélite proporciona T_a con errores mayores a ±2K durante el día y errores de ± 1,8K por la noche. Sin embargo, los errores en la estimación de la T_a disminuyen hasta ±1,3K cuando se consideran términos relativos a otras variables obtenidas desde satélite (NDVI y AL) junto con datos geográficos y meteorológicos (Lat, h, dist, I y Hr) (Ecuaciones 1-2), funcionando además de forma adecuada para todo tipo de coberturas terrestres. Niyerola *et al.* (2007) y Cristóbal *et al.* (2008) apuntaron la eficacia de combinar variables de teledetección con información geográfica para la estimación de la T_a, aunque no señalaron su dependencia con la Hr, cuya inclusión ha demostrado disminuir los errores. Por último, el modelo propuesto por Zaksek y Schroedter-Homscheidt (2009), con errores de ±3K en nuestra región, no mejora los resultados dados por simples regresiones lineales con LST.

BIBLIOGRAFÍA

CRISTÓBAL, J., NINYEROLA, M., y PONS, X., 2008: *Modelling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data.* Journal of Geophysical Research, 13, D13106.

DRAPER, N.R., y SMITH, H., 1998: *Applied Regression Analysis.* Ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 307-312.

NICLÒS, R., ESTRELA, M.J., VALIENTE, J.A., y BARBERÀ, M.J., 2010a: *Clasificación periódica de coberturas terrestres a escala regional con imágenes MODIS.* International Review of Geographical Information Science and Technology-GeoFocus, 10, 1-17.

NICLÒS, R., ESTRELA, M.J., VALIENTE, J.A., y BARBERÀ, M.J., 2010b: *Análisis de correlaciones entre la temperatura del aire y la temperatura de las superficies vegetadas medida con radiometría térmica.* Revista de Teledetección, 34, 36-43.

NINYEROLA, M., PONS, X., y ROURE, J.M., 2007: *Objective air temperature mapping for the Iberian Peninsula using spatial interpolation and GIS.* International Journal of Climatology, 27, 1231-1242.

ZAKSEK, K., y SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M., 2009: *Parameterization of air temperature in high temporal and spatial resolution from a combination of the SEVIRI and MODIS instruments*. ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 414-421.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos CGL2008-04550/CLI, CGL2010-16364, CGL2010-17577 y CONSOLIDER-INGENIO 2010 CSD2007-00067, además del Contrato de Investigación "Ramón y Cajal" de la Dr. Niclòs, y por la Generalitat Valenciana mediante el proyecto PROMETEO/2009/086. El Instituto Universitario CEAM – UMH está subvencionado por la Generalitat Valenciana y la Fundación BANCAJA.

Estudio comparativo del vapor de agua en columna en varias estaciones de la Península Ibérica usando diferentes técnicas

J. P. Ortiz de Galisteo[1, 2], Y.S. Bennouna[1], V. E. Cachorro[1], C. Toledano[1], A. Berjón[1], D. Fuertes[1], R. Gonzalez[1], B. Torres[1], J.L. Marcos[3], L. Martín[1] y A. M. de Frutos[1]

[1] Grupo de Óptica Atmosférica (GOA), Universidad de Valladolid, Prado de la Magdalena s/n, 47071 Valladolid (Castilla y León, España). Tel: 983-423-608, Fax: 983-423-013, E-mail: jportiz@goa.uva.es.

[2] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Delegación Territorial de Castilla y León, C/ Orión 1, 47014 Valladolid (Castilla y León, España).

[3] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid (Palencia), Av. De Madrid 57, 34007 Palencia (Castilla y León, España).

RESUMEN

Este estudio presenta una caracterización del contenido en columna de vapor de agua o agua precipitable (PWV) en 18 localizaciones de la Península Ibérica con 7 años de datos, obtenidos de sondeos, receptores GPS, y fotómetros solares. El PWV medio ha sido de 18.06 ± 2.62 mm. En general, el PWV es mayor en las costas, especialmente en la mediterránea, que en el interior. El PWV presenta un claro ciclo anual, con un mínimo en invierno, y un máximo hacia el final del verano. La amplitud media del ciclo es de 13.2 mm, y la razón entre el valor mensual máximo del verano y el mínimo del invierno es aproximadamente 2 en todos los emplazamientos. Las mayores amplitudes del ciclo se registran en la costa mediterránea y los más bajos en el interior. El ciclo anual del PWV sigue al de la temperatura, excepto por el mínimo relativo de PWV que tiene lugar en julio en los emplazamientos del suroeste.

Palabras clave: vapor de agua, agua precipitable, ciclo anual, GPS, fotómetros solares, sondeos.

ABSTRACT

This study reports a characterization of column integrated water vapor content or precipitable water vapor (PWV) at 18 sites over the Iberian Peninsula with 7-year data from GPS receivers, soundings, and sun photometers. The average PWV obtained was 18.06 ± 2.62 mm. In general, the PWV is higher at the stations on the coast, especially on the Mediterranean coast, than at the inland stations. The PWV presents a clear annual cycle, with a minimum in winter and a maximum at the end of the summer. The mean amplitude of the cycle is 13.2 mm, and the ratio between the maximum and minimum values of the monthly averages is approximately 2 at all sites. The largest amplitudes are registered on the Mediterranean coastal sites and the lowest ones at inland sites. The annual cycle of PWV follows the one of the temperature, except for a relative minimum of PWV in July at the southwestern sites.

Keywords: *water vapor, precipitable water vapor, annual cycle, GPS, sun photometers, soundings.*

INTRODUCCIÓN

El agua precipitable (PWV) se define como la altura que tendría la capa de agua si todo el vapor de agua contenido en una columna atmosférica de área unidad se condensase sobre la superficie. El PWV juega un papel crucial en muchos procesos atmosféricos, tales como el transporte meridional de energía, el efecto invernadero, el balance radiativo, etc.

Históricamente los Servicios Meteorológicos han utilizado los sondeos aerológicos para medir el vapor de agua. Estas medidas, si bien proporcionan un perfil vertical de la distribución de este componente, son escasas por su alto coste. Datos adicionales son deseables para tener una adecuada cobertura. El sistema GPS (*Global Position System*), diseñado para fines de posicionamiento, se ha revelado como una técnica muy útil para la determinación del PWV.

Aunque hay estudios en la literatura sobre el PWV, ninguno de ellos está centrado en la

Península Ibérica. Es por ello, que el objeto del presente estudio será el análisis y la caracterización del PWV sobre la Península Ibérica a partir de las medidas proporcionadas por receptores GPS, radiosondeos y fotómetros solares. Estas son las tres técnicas con un mayor número de estaciones en la Península.

METODOLOGÍA Y DATOS

En el caso de las radiosondas una serie de sensores, embarcados en un globo relleno de helio, van tomando medidas *in situ* a distintas altitudes de la atmósfera conforme el globo asciende. El PWV se obtiene por integración de la humedad absoluta a lo largo de la trayectoria seguida por el globo.

La determinación del PWV con fotómetros solares se basa en la medida de la transmitancia de la atmósfera mediante la comparación entre la irradiancia solar directa en el exterior de la atmosfera y la medida en la superficie terrestre en en un canal de fuerte absorción del vapor de agua (Cachorro et al., 1998).



Figura 1: Mapa de estaciones.

La determinación del PWV con el sistema GPS se basa en el retraso que experimenta la señal de estos satélites al atravesar la atmósfera (Bevis et al., 1992). El retraso total (ZTD) se puede descomponer en: retraso hidrostático (ZHD) y húmedo (ZWD) (Saastamoinen 1972). El ZHD se puede obtener de la presión en superficie, y el ZWD se puede transformar en PWV conociendo el dato de la temperatura al nivel de la superficie. Estos equipos pueden medir de día y de noche y en todas las condiciones de tiempo atmosférico.

Se han utilizado 7 años de datos, desde el año 2002 a 2008 ambos inclusive. Los datos de los sondeos se han descargado de la página Web de la Universidad de Wyoming. Las medidas de los fotómetros se han obtenidos de la página Web de AERONET (*Aerosol Robotic Network*). Se han seleccionado los datos procesados con la Versión 2 y con el nivel de calidad 1.5. Para los receptores GPS se han utilizado los datos de ZTD de las estaciones de EUREF (*European Reference Frame*) generados por el IGN (Instituto Ggeográfico Nacional).

RESULTADOS

La media anual del PWV varía de 12 a 17 mm en las estaciones del interior, y de 17 a 21 mm en las de la costa, siendo el PWV medio de 18.06 ± 2.62 mm. El PWV presenta un ciclo anual, con un mínimo en invierno, incrementando durante la primavera hasta alcanzar el valor máximo hacia finales del verano, y disminuyendo durante el otoño, de una manera más pronunciada que el ascenso de la primavera (Figura 2). En las estaciones ubicadas hacia el norte, el mínimo valor del PWV se registra en febrero, mientras que en el resto lo hace en enero. Por su parte, el máximo de PWV se registra principalmente en el mes de agosto, retrasándose a septiembre para las estaciones más al sur. Solamente se observa un comportamiento singular en las estaciones del cuadrante suroeste, que consiste en la presencia de un mínimo relativo en el mes de julio.

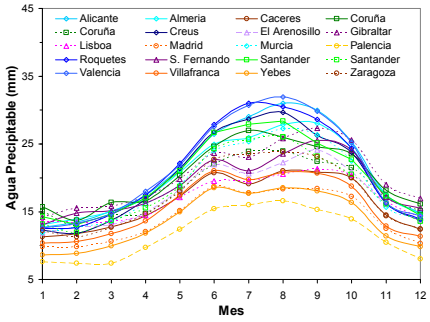


Figura 2: Ciclo anual del PWV.

Los valores máximos del ciclo oscilan entre los 16.6 y 32 mm, registrándose los más bajos en las estaciones del interior, y siendo normalmente más bajos cuanto mayor es la altitud de la estación, mientras que los más altos se dan en las estaciones costeras, y especialmente en las de la costa mediterránea, destacando los 32 mm de Valencia, y los 31 mm de Roquetes y Alicante. Respecto a los valores mínimos, estos oscilan entre los 7.4 y los 14.3 mm. Los más bajos aparecen en el interior peninsular, en las mismas

estaciones que registraban los máximos más bajos, destacando Palencia con 7.4 mm. Sin embargo, los mínimos más altos no se registran en la costa mediterránea, sino en la costa atlántica y en el área del estrecho, destacando Gibraltar con 14.2 mm. Los valores máximos del verano son del orden del doble de los mínimos del invierno. La razón entre ambos valores varía entre 1.9 y 2.5, excepto en Lisboa donde es 1.6.

La amplitud del ciclo anual, diferencia entre el valor mensual máximo y mínimo, es máxima para las estaciones mediterráneas, con valores en torno a los 18-19 mm, y es mínima en las del interior, con valores entre los 8 y 10 mm, aunque el menor valor se da en Lisboa con 7.9 mm.

La zona mediterránea se caracteriza por un ciclo anual con un elevado valor medio del PWV y un amplio rango de variación. En la zona interior se dan los valores más bajos tanto del valor medio como de la amplitud, sin embargo la razón entre el máximo y mínimo es ligeramente superior a la de la zona cantábrica o atlántica. Por su parte, en las zonas cantábrica y atlántica la media y la amplitud del ciclo toman valores intermedios entre los de las otras dos zonas, pero mientras que el mínimo toma un valor similar en ambas, el máximo y la amplitud es mayor en la cantábrica que en la atlántica.

Gaffen et al. (1992) clasificaron los ciclos del PWV para todo el globo en cinco tipos: continental de latitudes medias y altas, oceánico de latitudes medias y altas, monzón de latitudes medias, tropical oceánico, y monzón tropical. El régimen continental se caracteriza por un pronunciado ciclo anual con un máximo al final del verano de 3 a 10 veces mayor del mínimo del invierno, y un bajo valor medio entre 2 y 15 mm. Mientras que el régimen oceánico se caracteriza por un ciclo anual menos pronunciado con un máximo en verano en fase con la temperatura, una razón entre máximo y mínimo de 1.5 a 3, y un valor medio entre 5 y 20 mm. Los resultados obtenidos en este estudio, indican que el régimen predominante sobre la Península es el oceánico de latitudes medias y altas.

Con la excepción del mínimo relativo del mes de julio, el ciclo anual del PWV se ajusta bastante bien al de la temperatura (Figura 3). Solamente se observa un pequeño desfase en el valor máximo, alcanzándose el del PWV con posterioridad al de la temperatura. Este desfase es más patente en las estaciones de la costa mediterránea, mientras la temperatura media mensual suele alcanzar su valor máximo en el mes de julio, el PWV lo hace en el mes de agosto.

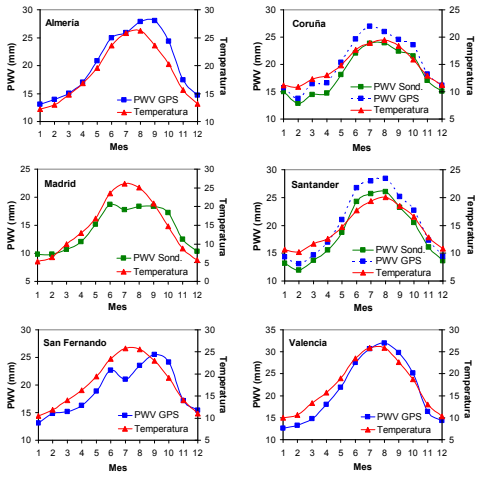


Figura 3: Ciclo anual del PWV y de la temperatura para algunos emplazamientos.

En término medio cuanto mayor es la temperatura mayor es el PWV. Pero esto es sólo cierto para cada emplazamiento de forma individual, cuando comparamos distintos emplazamientos entran en juego las características geográficas de las ubicaciones, que juegan un papel determinante. En el interior peninsular los valores medios de la temperatura máxima son similares a los de la costa mediterránea, pero mayores que los de las costas cantábrica y atlántica, sin embargo el PWV máximo es el más bajo de todos. Es decir, en las estaciones del interior por mucho que en verano aumente la temperatura el PWV no aumenta en la misma proporción. Por el contrario, los valores mínimos si están correlacionados, mientras menor es la temperatura menor es el PWV.

Tampoco la amplitud del ciclo del PWV guarda una proporcionalidad directa con el de la temperatura, sino que depende del carácter continental o marítimo de la estación y de la latitud. La variación de temperatura entre el invierno y el verano es máxima para las estaciones del centro peninsular, pero la del PWV es mínima, mientras que en las estaciones costeras ocurre a la inversa.

El ciclo anual de la anomalía del PWV (diferencia respecto del PWV anual medio) se descompuso en armónicos simples. Así, el PWV del mes *m* vendría dado por la expresión:

$$PWV(m) = PWV_0 + \sum_{n=1}^{4} S_n(m) + R \qquad (1)$$

siendo S_n,

$$S_n(m) = A_n \cdot \sin(n \cdot m + \sigma_n) \qquad (2)$$

donde PWV_0 es el valor medio anual, R el residuo, $S_{n,\ n=1,2,3,4}$ denota los armónicos de periodo 12, 6, 4 y 3 meses respectivamente, A_n la amplitud, y σ_n el desfase.

El primer armónico (periodo 12 meses) es el dominante en todas las estaciones, con una amplitud media de 6.63 mm y un desfase de ocho meses (máximo valor respecto del origen). Este armónico explica en término medio el 96% de la varianza, mientras que los otros tres armónicos explican menos del 1%. Sólo en alguna estación en particular alguno de ellos es significante, siendo especialmente relevante la varianza explicada (4 a 5%) por el segundo armónico (periodo 6 meses) en las estaciones próximas al estrecho de Gibraltar.

La comparación del ciclo anual en las ubicaciones en las que existen estaciones con dos técnicas de medida (Figura 4) muestra como la forma del ciclo anual obtenido con distintas técnicas es muy similar, con unos coeficientes de correlación altísimos, mayores de 0.99. Aunque la correlación es alta aparece un desplazamiento vertical entre ambos ciclos, con unas *bias* entre 1.5 y 2 mm. Los receptores GPS sobrevaloran siempre el PWV respecto de los sondeos, en torno a un 10%.

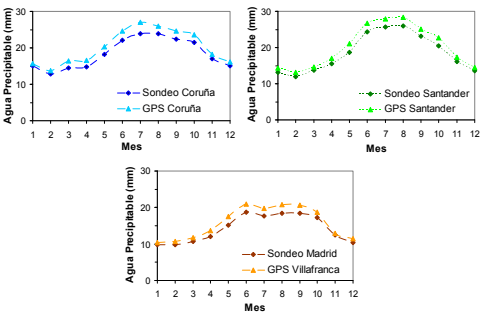


Figura 4: Comparativa del ciclo anual del PWV con distintas técnicas.

CONCLUSIONES

Este estudio presenta la primera caracterización del PWV sobre la península Ibérica, a partir de siete años de datos de sondeos, fotómetros y receptores GPS en dieciocho emplazamientos. El PWV medio fue de 18.06 ± 2.62 mm. Las estaciones situadas en el interior registran los valores más bajos y las de la costa los más altos. El PWV presenta un claro ciclo anual, con los menores valores en invierno y los mayores en verano, siendo estos el doble que los del invierno. La costa mediterránea se caracteriza por tener la mayor amplitud del ciclo anual del PWV. El ciclo anual del PWV sigue aproximadamente al de la temperatura, excepto por un ligero desfase en la hora del máximo en la costa mediterránea y un mínimo relativo de PWV en julio en el suroeste. El análisis de armónicos muestra que el primer armónico de periodo 12 meses explica el 96 % de la varianza, mientras que los tres siguientes explican menos del 1 %.

BIBLIOGRAFÍA

BEVIS, M. et al., 1992. *GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor using the Global Positioning System.* J. Geophys. R., 97, 15787-15801.

CACHORRO, V.E., UTRILLAS, P., VERGAZ, R., DURAN, P., DE FRUTOS, A.M., y MARTINEZ-LOZANO, J.A., 1998. *Determination of the atmospheric-water-vapor content in the 940-nm absorption band by use of moderate spectral-resolution measurements of direct solar irradiance.* Applied Optics, 37(21), 4678-4689.

GAFFEN, D.J., ROBOCK, A., and ELLIOT, W.P., 1992. *Annual cycle of tropospheric water vapor.* J. Geophysical R., vol. 97, pag. 18185-18193.

SAASTAMOINEN, J., 1972. *Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of Artificial Satellites for Geodesy.* Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S. W. Henriksen, et al., pp. 247-251, AGU, Washington, D.C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación al MICIIN de los proyectos de referencias CGL2008-05939-CO3-01/CLI and CGL 2009-09740 y a la acción complementaria CGL2010-09480-E. También se agradece al ITACyL para la financiación del proyecto EVACyL.

Estimación de la temperatura del aire a partir de la temperatura de superficie obtenida con el sensor MODIS e información espacio-temporal. Aplicación en modelos de riesgo de incendios forestales en la Península Ibérica

C. Recondo[1, 2], E. Zapico[1], J. J. Peón[2], E. Pendás[1], R. Aguirre[1] y A. Abajo[1]

[1] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: mdrecondo@uniovi.es

[2] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España).

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de las correlaciones entre la temperatura del aire (T_a) y la temperatura superficial terrestre (*LST*) obtenida a partir de varios algoritmos MODIS globales: los algoritmos LST1, LST2 y LST3 de Sobrino et al. (2003) y los productos MOD11 y *LST* IMAPP. Los datos proceden de estaciones meteorológicas repartidas por toda España y de imágenes Terra-MODIS del año 2010. Los mejores resultados se obtienen con la temperatura media y los algoritmos elegidos son LST1 y *LST* IMAPP, dado que obtienen buenos resultados (R^2=0.86-0.88 y RSE=2.5-2.7 K) y pueden generarse en tiempo real. Si, además, se incluyen en los modelos de estimación de T_a variables como W, el NDVI, el día juliano, la altura y la pendiente, el grado de acuerdo mejora (R^2=0.92, RSE=1.94-2.07 K).

Palabras clave: temperatura del aire, temperatura superficial terrestre, MODIS.

ABSTRACT

In this work we present the results of the correlations between the air temperature and the land surface temperature (LST) obtained from several global MODIS algorithms: LST1, LST2 and LST3 by Sobrino et al. (2003) and the MOD11 and LST IMAPP products. The data are from ground meteorological stations spread across España and from Terra-MODIS images of the year 2010. The best results are obtained with the mean temperature and the chosen algorithms are LST1 and LST IMAPP, because they obtain good results (R^2=0.86-0.88 y RSE=2.5-2.7 K) and they can be obtained in real time. If other variables are included in the estimation of T_a, such as W, the NDVI, the Julian day, the altitude and the slope, the correlations improve (R^2=0.92, RSE=1.94-2.07 K).

Keywords: *air temperature, Land Surface Temperature (LST), MODIS.*

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto *FireGlobe*: *"Análisis de los escenarios de riesgo de incendios a escala nacional y global"*, necesitamos métodos operativos rápidos y eficaces para obtener la temperatura del aire (T_a) y humedad relativa (HR) a escala diaria para la Península Ibérica. Ambas variables son fundamentales en los modelos de riesgo de incendios ya que, además de su importancia intrínseca, intervienen en otras variables como el contenido de humedad del combustible. Tradicionalmente, las variables meteorológicas se han obtenido desde estaciones en tierra, pero éstas son generalmente escasas y están dispersas, especialmente en áreas montañosas. En estos casos los métodos de interpolación pueden no ser capaces de proporcionar datos fiables para las zonas situadas entre las estaciones meteorológicas (Han et al., 2003). Por esta razón, la Teledetección se revela como la mejor opción para obtener estos datos, por su capacidad de generarlos a una resolución espacial regular y en espacios cortos de tiempo. En este trabajo se usan los datos diarios del sensor MODIS. El trabajo se ciñe a la variable de temperatura (ver Recondo et al., 2010, para la variable de humedad) y geográficamente a la España Peninsular.

DATOS

En este trabajo se han usado varios tipos de datos para 29 días del año 2010, seleccionados

como los de menor nubosidad sobre la Península Ibérica y con la condición de que todos los meses estuvieran representados. Estos datos son:

- Datos de 331 estaciones meteorológicas españolas repartidas por toda la Península (Figura 1), con información disponible a través de páginas *web*. Las variables obtenidas de cada estación para las fechas seleccionadas son la temperatura y la humedad relativa. Los datos concretos son el valor medio, máximo y mínimo diario de cada una de las variables. El rango temporal de estos datos está entre las 00:00 y las 24:00 horas (GMT≅UTC).



Figura 1: Localización de las 331 estaciones meteorológicas españolas usadas en este estudio.

- Datos diurnos Terra-MODIS. Se han preferido los datos del satélite Terra a los del Aqua por su paso más temprano sobre la Península Ibérica, lo que permitirá generar antes la previsión diaria de riesgo de incendio. Las horas de toma de las imágenes Terra-MODIS están entre las 10:20 y las 12:00 GMT. Todos los datos están libres de nubes y tenemos tres tipos diferentes de datos (todos con 1 km de resolución espacial):

  - MOD021km, producto que contiene las radiancias (L) calibradas y geolocalizadas (WGS84) de las 36 bandas espectrales con una resolución espacial de 1 km.

  - MOD11 (*Land Surface Temperature, LST*), producto estándar de la NASA que proporciona la temperatura superficial terrestre (*LST*) mediante el algoritmo de Wan (2008). El producto incluye también la emisividad de la superficie además de la *LST*.

  - *LST* IMAPP, producto similar al MOD11 pero que, a diferencia de éste, podemos generarlo en tiempo real.

    En el Campus de Mieres de la Universidad de Oviedo contamos con una antena MODIS que permite obtener los datos de este sensor en tiempo real. Además, existe un software gratuito, IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package; Huang et al., 2004; ver *http://cimss.ssec.wisc.edu/imapp/*), que permite, a partir de estos datos, generar productos de nivel superior, como los citados MOD021km y *LST* IMAPP. Aunque en la documentación de IMAPP se indica que *LST* IMAPP es realizado con el mismo método que MOD11, éste último ha sido descargado de la página web de la NASA para su comprobación (LP DAAC: https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data).

Por otra parte, dado que necesitamos incluir en el cálculo de algunos algoritmos y modelos de temperatura la variable de contenido en vapor de agua total (g cm^{-2}) o agua precipitable total (cm), W, tres tipos de datos para esta variable (ver más detalles de su cálculo u obtención en Recondo et al., 2010) han sido obtenidos para las fechas seleccionadas en este estudio:

- $W_{Sobrino}$: W calculada según el algoritmo de Sobrino et al. (2003). Se elabora a partir de MOD021km, de forma que puede generarse en tiempo real.

- MOD05: producto W estándar de la NASA. No podemos elaborarlo en la actualidad en tiempo real.

- W IMAPP: producto W generado por IMAPP. En este caso el algoritmo de cálculo es diferente al utilizado en el producto MOD05.

- Datos espacio-temporales. De las fechas de las imágenes han sido obtenidos el día juliano (DJ) y la hora MODIS (hora). De la localización espacial de las estaciones han sido extraídas su latitud (φ), su longitud (λ) y su distancia a la costa (dcosta). A partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 1 km de resolución espacial han sido obtenidas las siguientes variables en la localización de cada una de las estaciones: altura (h), pendiente (p) y curvatura del MDE (cur).

MÉTODO

Nuestro método está basado en la posibilidad de obtener la temperatura del aire (T_a) directamente de la temperatura superficial terrestre (*LST*) y de distintas variables espacio-temporales. Los productos/algoritmos MODIS globales para la estimación de la *LST* que han sido probados en

este trabajo son: el producto MOD11, el *LST* IMAPP y los algoritmos LST1, LST2 y LST3 de Sobrino et al. (2003). Todos ellos se basan en la temperatura de cuerpo negro de los canales 31 y 32 de MODIS, así como en la emisividad promedio de la superficie en ambos canales (ε) y en la diferencia de emisividad entre ambos (Δε). Además, los algoritmos de Sobrino incluyen también W en su formulación ($W_{Sobrino}$) y calculan ε y Δε a partir del NDVI. Siguiendo las fórmulas de Sobrino et al. (2003) pueden elaborarse LST1, LST2 y LST3 en tiempo real a partir del producto MOD021km.

RESULTADOS

La comparación entre T_a y *LST*, sin incluir en principio otras variables espacio-temporales, indica que:

- Para todos los productos/algoritmos *LST* MODIS probados, los mejores acuerdos son con la temperatura media y máxima (R^2=0.86-0.89; RSE (*Residual Standard Error*=2.5-2.9 K) y los peores con la temperatura mínima (R^2=0.69-0.71; RSE=3.6-3.8 K). En todos los casos los acuerdos con la temperatura máxima son un poco mejores en R^2 (0.88-0.89) que los obtenidos con la temperatura media (0.86-0.88), pero peores en lo que respecta al RSE (2.8-2.9 K de la máxima frente a 2.5-2.8 K de la media).

- No hay diferencias significativas entre los algoritmos LST1 y LST3, siendo ambos mejores que el LST2, tanto en R^2 como en RSE. Por ser más simple su cálculo es preferible el LST1 al LST3. La comparación de la temperatura media con LST1 da un R^2=0.88 y un RSE=2.52 K (Figura 2a).

- El producto MOD11 es un poco mejor que el *LST* IMAPP (Figura 2b), tanto en R^2 (0.88 frente a 0.86 para la T_a media) como en RSE (2.64 frente a 2.71 K para la T_a media). Pero la ventaja del *LST* IMAPP es que puede ser generado en tiempo real. En cualquier caso, ambos son un poco peor que el LST1.

La comparación entre T_a y un modelo lineal que incluya *LST* y las variables espacio-temporales descritas indica que:

- Las correlaciones mejoran al incluir estas variables. Por ejemplo, para la temperatura media del aire, tanto con el algoritmo LST1 de Sobrino como con el *LST* IMAPP, el valor de R^2 aumenta a 0.92 y el RSE disminuye a 2 K (2.07 y 1.94 K, respectivamente).

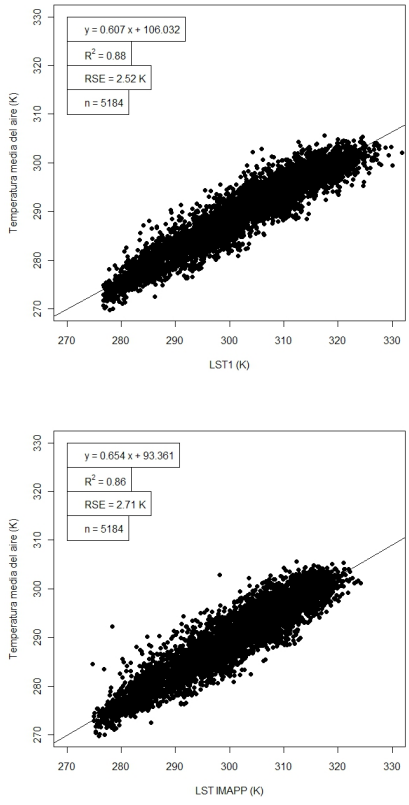


Figura 2: Comparación entre la temperatura media del aire y la temperatura superficial terrestre (*LST*) obtenida por medio de: a) el algoritmo LST1 de Sobrino et al. (2003). b) El producto LST IMAPP.

- Para el algoritmo LST1 de Sobrino las variables espacio-temporales significativas que lo han de acompañar en el modelo son el día juliano, la altura y la pendiente. Además, debe incluirse también el NDVI para obtener las correlaciones indicadas anteriormente (R^2=0.92 y RSE=2.07 K). Ver Figura 3a.

- Para el producto *LST* IMAPP las variables significativas que lo han de acompañar en el modelo son también el día juliano, la altura, la pendiente y el NDVI. Además en este caso debe incluirse también W (por medio de W IMAPP), variable ya incluida en los algoritmos LST de Sobrino et al. (2003), para obtener las

correlaciones indicadas anteriormente (R^2=0.92 y RSE=1.94 K). Ver Figura 3b.

- Las conclusiones son similares para el producto MOD11, usando en este caso MOD05 como estimación de W. Sin embargo, la desventaja de ambos es que actualmente no podemos generarlos en tiempo real.

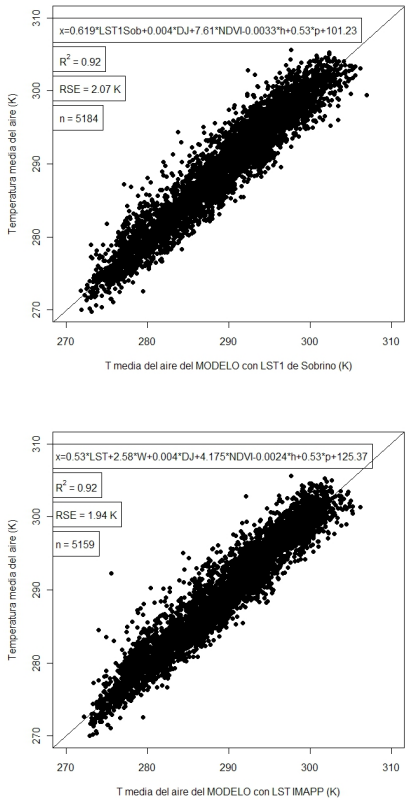


Figura 3: Comparación entre la temperatura media del aire y el modelo generado para su estimación a partir de *LST* y otras variables. a) Con el algoritmo LST1 de Sobrino et al. (2003). b) Con el producto *LST* IMAPP.

CONCLUSIONES

La conclusión principal de este trabajo es que es posible estimar la temperatura media del aire a partir de la temperatura superficial terrestre (*LST*), obtenida con diferentes algoritmos MODIS globales, con un alto grado de acuerdo (R^2=0.86-0.88 y RSE=2.5-2.7 K). Si, además, en los modelos de estimación de esta temperatura media se incluyen otras variables como W (en el caso de que no esté incluida ya en el cálculo de la *LST*), el NDVI, el día juliano, la altura y la pendiente, el grado de acuerdo mejora (R^2=0.92, RSE=1.94-2.07 K). Por otra parte, el modelo más rápido de generar es el que incluye el producto *LST* IMAPP (y W IMAPP), ya que ambos se calculan automáticamente con el software IMAPP. Esto es prioritario en la elaboración de un modelo diario de riesgo de incendios.

BIBLIOGRAFÍA

HAN, K.-S., VIAU, A. A., and ANCTIL, F., 2003. *High-resolution forest fire weather index computations using satellite remote sensing*. Canadian Journal of Forest Research, 33, 1134–1143.

HUANG, H.-L., GUMLEY, L. E., STRABALA, K., LI, J., WEISZ, E., RINK, T., BAGGETT, K. C., DAVIES, J. E., SMITH, W. L., and DODGE, J. C., 2004. *International MODIS and AIRS processing package (IMAPP): A direct broadcast software package for the NASA earth observing system*. Bulletin of the American Meteorological Society, 85, 159–161.

RECONDO, C., PENDÁS, E. and AQUIRRE, R., 2010. *Using several water vapor MODIS-NIR algorithms for retrieval of the surface water vapor pressure in the Iberian Peninsula. First results*. Proceedings of 3rd international symposium on *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Ed. José A. Sobrino. Servicio de Publicaciones. Universitat de Valencia. Valencia, 2010. ISBN: 978-84-370-7952-3. Pag. 740-744.

SOBRINO, J. A., EL KHARRAZ, J., and LI, Z.-L., 2003. *Surface temperature and water vapor retrieval from MODIS data*. International Journal of Remote Sensing, 20, 5161–5182.

WAN, Z. (2008). *New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/ Emissivity products*. Remote Sensing of Environment, 112, 59-74.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto *FireGlobe*, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación entre 2009-2011 (CGL2008-01083; IP: Emilio Chuvieco). Eva Zapico es Personal Técnico de Apoyo del proyecto *FireGlobe* (PTA2009-02281-P) y Adán Abajo Personal Técnico de Apoyo para la antena MODIS de la Universidad de Oviedo (PTA2008-1623-I).

METODOLOGÍA, DIVULGACIÓN Y FORMACIÓN

Nuevos recursos para la enseñanza de la fotogrametría basados en herramientas de geometría dinámica

C. Allende

Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España). Correo electrónico: callende@uniovi.es

RESUMEN

En la actualidad, el proceso de enseñanza-aprendizaje que se está implantando en el ámbito universitario se encuentra estrechamente vinculado con la utilización de recursos y herramientas informáticas. Geogebra es un software libre educativo en matemáticas en el que, desde comienzos del año 2010, sus desarrolladores están trabajando en una nueva versión (Geogebra 5.0 Beta Release Version) que permite la representación tridimensional de conceptos matemáticos directamente vinculados al ámbito de la enseñanza de la Fotogrametría. El objetivo de este artículo es mostrar las aplicaciones de esta nueva versión como herramienta de generación recursos formativos que permitan a los estudiantes entender e interactuar con los conceptos de geometría tridimensional que intervienen en el estudio de esta asignatura.

Palabras clave: Fotogrametría, Geogebra, Educación, Geometría.

ABSTRACT

Currently, the teaching-learning process in the university is closely connected with the use of resources and computer tools. Geogebra is a free software educational mathematics. Since early 2010 the software developer are working on a new version (Geogebra 5.0 Beta Release Version) and it´s possible generating an interactive three-dimensional geometries directly related to the basics of teaching for Surveying and Mapping engineering. The goal of this paper is present Geogebra as a tool for interactive resource generation to enable understand the basic dimensional geometry in engineering.

Keywords: *Photogrammetry, Geogebra, Education, Geometry.*

INTRODUCCIÓN

Los actuales procesos de enseñanza se encuentran directamente vinculados con las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. Unas de las principales ventajas de estos métodos es la posibilidad de adquirir formación "on line" a través de Internet (Országhová, D., 2010), pero otra de las ventajas más significativas es la posibilidad de facilitar la comprensión de conceptos hasta ahora limitados a representación bidimensional.

La generación de recursos educativos multimedia se ha convertido en parte del trabajo del profesor y se ha podido comprobar que su utilización en la educación superior es muy positiva. Una de las herramientas más significativas en este aspecto es Geogebra, un software libre educativo para la enseñanza de los fundamentos de las matemáticas y la geometría, que integra la utilización de herramientas dinámicas y la creación de páginas web interactivas para estudiantes desde la escuela intermedia hasta la educación superior (www.geogebra.org).

Hasta el momento, esta herramienta nos ha permitido trabajar sólo en 2D, pero desde principios de 2010 se puede acceder a una versión en desarrollo (Geogebra 5.0 Beta Release) con la cual es posible generar una geometría interactiva tridimensional (Martinovic, D., et al., 2009) con nuevas posibilidades en la enseñanza de la ingeniería (Hu, Thomas Wei Chung et al., 2001).

Uno de estos campos de enseñanza es la fotogrametría, la cual se encuentra directamente relacionada con la comprensión de conceptos geométricos tridimensionales y su relación matemática (ZHU, Q., 2008). Las posibilidades que ofrece Geogebra en cuanto a la representación e interacción con estos conceptos es esencial para su comprensión (Lavicza, Z., 2010).

Geogebra es además una herramienta de código abierto y es compatible con INTERGEO, el proyecto europeo de normalización que tiene como objetivo organizar y mejorar la interopera-

bilidad del material didáctico de geometría dinámica o interactiva para la enseñanza de las matemáticas en la Unión Europea (http://www.inter2geo.eu/es). Además, Geogebra está disponible para diversas plataformas: Windows, Mac Os, Unix / Linux, y todos los sistemas que soportan el lenguaje de Java.

El objetivo de este artículo es la presentación de un conjunto de recursos formativos dinámicos e interactivos que permiten la representación gráfica de una serie de conceptos fotogramétricos utilizando la nueva versión de Geogebra 3D. Estos recursos se presentan en un entorno que consiste en dos ventanas gráficas en las que aparecen representados geométricamente los objetos matemáticamente definidos en el módulo algebraico del programa. Una de las ventanas muestra la representación de las geometrías en 2D y otra ventana que muestra la misma representación geométrica en 3D. Los objetos matemáticos se clasifican en objetos libres y objetos dependientes. Los objetos libres pueden ser modificados por el alumno de forma interactiva con el ratón del ordenador y modificar consecuentemente los objetos dependientes.

Uno de los objetivos más importantes de la Fotogrametría es la obtención de información tridimensional de objetos a partir de la adquisición de imágenes que proporcionan una información bidimensional. El conjunto de procesos implicados en la metodología utilizada en esta técnica, se basan en el planteamiento de ecuaciones y cálculos que pueden representarse gráficamente a partir de la utilización de las distintas herramientas que nos ofrece Geogegra.

A continuación, se presentan una serie de recursos interactivos cuyo objetivo es ayudar al alumno a comprender y relacionar un conjunto de conceptos fundamentales en la enseñanza de la fotogrametría. Dependiendo de donde se encuentre ubicada la cámara fotográfica, la fotogrametría se clasifica en fotogrametría aérea y fotogrametría terrestre. En este artículo, la representación de los conceptos se lleva a cabo considerando el caso de la fotogrametría aérea y tomando como altura media del terreno el plano de comparación coincidente con el nivel medio del mar o cota cero.

PRIMER RECURSO: ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA Y COBERTURA FOTOGRÁFICA.

En este recurso se representa gráficamente la relación entre una imagen fotográfica y la cobertura de ésta sobre el terreno. Para su determinación es necesario conocer la altura de vuelo del avión y la focal de la cámara, conceptos representados en la figura 1.

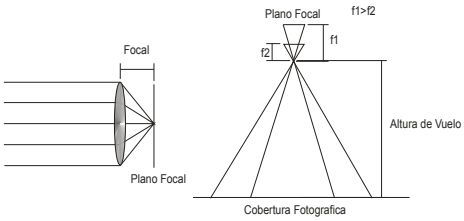


Figura 1: Escala de la fotografía aérea

La representación matemática de estos conceptos en Geogebra se muestra en la figura 2.

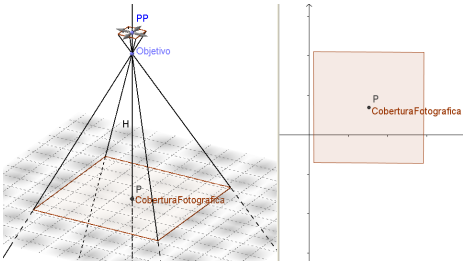


Figura 2: Primer recurso

En este recurso se representan los siguientes objetos libres: *Punto Principal de la fotografía* (PP) y *Objetivo*; y los siguientes objetos dependientes: *Punto Principal en el terreno* (P), *Altura de Vuelo* (H), *Distancia Focal* y *Cobertura Fotográfica*. En él, la modificación interactiva por parte del alumno de las coordenadas x, y, z del *Punto Principal de la fotografía* (PP), modificará el valor de la *Altura de Vuelo* y consecuentemente la *Cobertura Fotográfica*. Por otro lado, la variación en coordenada z *Objetivo*, modificará el valor de la *Distancia Focal* y consecuentemente, también la *Cobertura Fotográfica* tal y como se muestra en la figura 3.

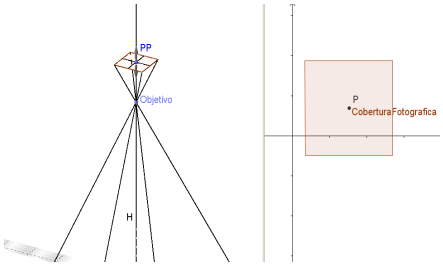


Figura 3: Cobertura fotográfica

Los alumnos pueden mover interactivamente los objetos libres en la vista gráfica tridimensional y modificar la figura o escena geométrica. El resultado de la variación de la cobertura fotográfica, puede verse representada también en vista gráfica bidimensional.

SEGUNDO RECURSO: ROTACIÓN TRIDIMENSIONAL

En fotogrametría, la posición de un punto en el espacio viene definido por un sistema tridimensional de coordenadas y la posición del avión en el momento de la toma de las imágenes, tal y como se muestra en la figura 4, está relacionado con este sistema mediante los ángulos de rotación ω, φ y κ (R_ω, R_φ, R_κ).

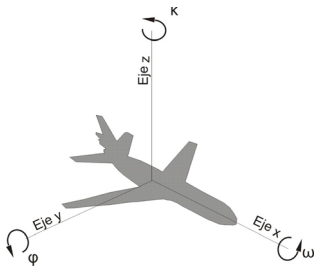


Figura 4: Rotación Tridimensional

La representación matricial de la rotación 3D (R_T), es de la forma (1):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_T \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_\kappa \cdot \mathrm{R}_\varphi \cdot \mathrm{R}\omega \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

En este recurso se representa gráficamente la rotación tridimensional alrededor de los ejes x, y, z. Incluye en la vista gráfica bidimensional tres herramientas deslizadoras que permiten modificar interactivamente los valores de cada uno de los tres ángulos de rotación. El resultado de la modificación gráfica tridimensional en cuanto a configuración geométrica y variación de la cobertura fotográfica se muestra en las dos ventanas gráficas (2D y 3D). La vista gráfica 2D, contiene además un conjunto de textos dinámicos que muestran los valores trigonométricos de los ángulos y la matriz de rotación resultante para cada valor de ω, φ y κ. (Figura 5).

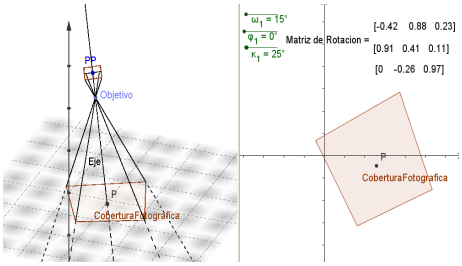


Figura 5: Segundo recurso

TERCER RECURSO: ERROR POR CURVATURA TERESTRE

El último recurso que se presenta en este artículo, está relacionado con el error cometido en las coordenadas de los puntos en la imagen fotográfica debido a la esfericidad terrestre. Según se indica en la figura 6, este error se corresponde con la distancia entre el punto a y a' ($\overline{aa'}$) sobre la imagen y está relacionado con el radio terrestre (R), la *Altura de Vuelo* (H), la *Distancia Focal* de la cámara (f) y la posición del punto en la imagen respecto al punto principal (r), según se indica en la fórmula (2):

$$\overline{aa'} = \frac{H}{2 \cdot R \cdot f^2} \cdot r^3 \quad (2)$$

Según se muestra en la figura 7, en la ventana gráfica bidimensional aparece el resultado de la cobertura fotográfica dependiente de los valores de la *Distancia Focal y Altura de Vuelo.* También se representa la proyección de los puntos a y a' sobre este plano y que se corresponden con los puntos A y A'. El recurso permite al alumno conocer el efecto de este error en base a la fórmula (2). Considerando el valor del radio de la tierra como constante, el alumno puede modificar interactivamente la posición (x, y) del punto A sobre la ventana gráfica bidimensional y determinar las variaciones en la posición del punto A'.

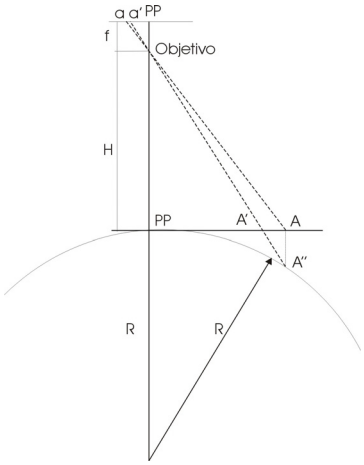


Figura 6: Error debido a la esfericidad terrestre

Los resultados se pueden visualizar de forma simultánea y gráfica sobre la ventana tridimensional. Sobre esta última, también se pueden modificar interactivamente los valores de la *Distancia Focal y Altura de Vuelo,* lo que modificará la cobertura fotográfica de la imagen y consecuentemente, las posibilidades de modificación del punto A.

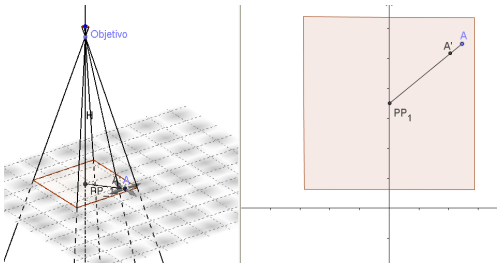


Figura 7: Tercer Recurso

CONCLUSIONES

Esta nueva versión de Geogebra es una herramienta muy eficiente para la generación de gráficos tridimensionales utilizables en la enseñanza superior porque combina el álgebra, la geometría y el cálculo mediante una representación múltiple en un entorno gráfico interactivo. Geogebra proporciona las posibilidades adecuadas para que la optimización del aprendizaje de conceptos relacionados con la fotogrametría, las aplicaciones geomáticas, las técnicas de posicionamiento espacial, y todos aquellos campos que impliquen la representación y manipulación de geometrías tridimensionales.

BIBLIOGRAFÍA

ORSZÁGHOVÁ, DANA, 2010. "*The use of information technology in mathematics"*. Journal of Applied Mathematics, Volume III, number III. P. 147-154. ISBN: 1337-6365.

MARTINOVIC, D. et al., 2009. *"On line learning: collaborative mathematical exploration"*. Report based on the Canadian Mathematics Education Forum. Printer 2009.

HU, THOMAS WEI CHUNG et al., 2001. *"New possibilities in surveying education via the use of spreadsheet software and web technology"*. Institutional repository. The Hong Kong University of Science and technology library.

RUZGIENĖ, B., 2008. **"***Some aspects in photogrammetry education at the department of geodesy and cadastre of the VG"*. Geodesy and Cartography. Vilnius, 2008, V 34, No. 1, 29-33.

DESHOGUES, A AND GILLIÉRON, P.Y. 2010. *"Enhancement of e-learning in geomatics by the integration of dynamic mathematics' tools"*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XXXVIII, part 6. ISSN: 1682-1777.

ZHU, QING., 2008. "*The Photogrammetry Education for Multidisciplinary Geomatics in China*". International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XXXVI, part 6, ISSN: 1682-1750**.**

LAVICZA, Z. And Papp-Varga, Z., 2010. *"Integrating Geogebra into IWB-equipped teaching environments: Preliminaresults"*. Technology, Pedagogy and Education. V. 19, 245:252.

Radiometría de la vegetación acuática sumergida de Doñana: variación temporal de las firmas espectrales

D. Aragonés[1], R. Fernández Zamudio[1 2], I. Afán[1], R. Díaz-Delgado[1], J. Bustamante[1] y P. García Murillo[2]

[1] LAST-EBD. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección; Departamento de Ecología de Humedales. Estación Biológica de Doñana (CSIC). Avda. Américo Vespucio, s/n. 41092 Sevilla (Andalucía, España). Tel: 954232340, Fax: 954621125. Correo electrónico: daragones@ebd.csic.es

[2] Departamento de Biología vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla. C\ Profesor García-González., s/n. 41012 Sevilla (Andalucía, España).

RESUMEN

En este trabajo se describe el diseño experimental para la obtención en laboratorio de la espectro-radiometría de cuatro especies de plantas acuáticas (macrófitos) de la marisma de Doñana (SO España). El objetivo es obtener y documentar los espectros característicos de las especies de macrófitos más abundantes a partir de un sistema de cultivo controlado, ya que la toma de datos *in situ* dificulta la toma de medidas estandarizadas. Asimismo se pretende estudiar su variación temporal a lo largo del ciclo de vida de las especies, controlando los principales factores que modifican la respuesta espectral sobre el terreno (profundidad, turbidez del agua, porcentaje de recubrimiento y estado fenológico de las especies estudiadas).

Palabras clave: *espectro-radiometría de laboratorio, macrófitos acuáticos, marisma de Doñana, cultivo controlado.*

ABSTRACT

This paper describes an experimental approach to make spectroradiometrical measurements of four species of aquatic plants (macrophytes) that inhabit the Doñana marshes (SW Spain). Because of the difficulties to take standarized measurements in situ, they are obtained from plants in a controlled growing system. The main aim is to obtain the characteristics spectra of selected macrophyte species and also to study the temporal dynamics of spectra over their life cycle, controlling the main factors that could influence their response in the field (depth, water turbidity, percentage of coverage and phenological status of the species).

Keywords: laboratory *spectroradiometry*, *aquatic macrophytes, Doñana marshes, controlled growing system*

INTRODUCCIÓN

El principal reto de la teledetección de la vegetación acuática sumergida es aislar la señal de la planta de la interferencia de la columna de agua (Thiago et al 2008). Aparte del agua, la presencia de materiales ópticamente activos afecta a la dispersión y la absorción de la radiación (Han y Rundquist 2003; Kirk 1994). Además, la reflexión del suelo es un factor a tener en cuenta al interpretar la señal radiométrica de las praderas de macrófitos en aguas poco profundas (Bustamante et al 2009). En aguas someras, la señal de la reflectividad está determinada principalmente por el recubrimiento de la vegetación. Con la profundidad, la absorción de la columna de agua enmascara la señal de la vegetación (Ackleson y Klemas 1987).

El objetivo del experimento es obtener espectros radiométricos representativos, en condiciones de laboratorio, de especies de macrófitos acuáticos sumergidos en función del grado de desarrollo y estado fenológico de la especie para lo cual se efectuaron medidas radiométricas a lo largo de un ciclo simulado de inundación. Las medidas radiométricas realizadas se tomaron controlando la profundidad, turbidez del agua y grado de recubrimiento de la especie. Al interés inmediato de este experimento se añade el objetivo secundario de validar los resultados obtenidos a escala de imágenes de teledetección con objeto de poder realizar cartografías extensivas de la vegetación acuática en los humedales de Doñana.

ÁREA Y ESPECIES DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en la marisma del Parque Nacional de Doñana (SO España), en el estuario del río Guadalquivir. La marisma es un ecosistema de un alto dinamismo hídrico estacional. En este entorno impredecible se desarrollan un gran número de especies vegetales adaptadas a dicha temporalidad, formando ecosistemas característicos con praderas de macrófitos sumergidos y flotantes (García Murillo et al 2006).

Para el estudio se escogieron cuatro especies abundantes en el área de estudio:

Ruppia drepanensis Tineo. Especie de ambientes salinos, con tallos delgados y hojas capilares sumergidas.

Myriohpyllum alterniflorum DC. Especie de ambientes dulces, con hojas finamente divididas sumergidas. Forman praderas de alta cobertura.

Ranunculus peltatus Schrank. Especie de amplio espectro ecológico, las hojas presentan heterofilia (las sumergidas, finamente divididas y las flotantes, de limbo plano aparecen con las flores).

Chara galioides DC. Alga Clorofita, crece formando densos tapices monoespecíficos con estructuras sexuales de color naranja.

Se seleccionaron cinco puntos para los cuáles se conocía la existencia de amplias praderas de las especies de interés en periodos previos de inundación (Figura 1).



Figura 1: Localidades de extracción de los sustratos con praderas de 1 *Ranunculus peltatus*, 2 *Myriophyllum alterniflorum*, 3 *Ruppia drepanensis*, 4 y 5 *Chara galioides*.

SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA TEMPORAL

El cultivo se realizó en acuarios bajo condiciones controladas durante 30 semanas en una cámara climática (Aralab FitoClima 10.000 EHF), que se programó para simular la temperatura media del agua, su oscilación térmica diaria y el fotoperiodo, en un ciclo anual medio, desde el 15 enero al 15 de julio.

Se modelizó la temperatura del agua a partir de la temperatura del aire y de la oscilación térmica diaria en el agua. Los datos climáticos se obtuvieron de la estación manual del Palacio de Doñana (temperatura del aire, 1978-2010), estación automática del grupo Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña (temperatura del agua, 2006-2007) e Instituto Geográfico Nacional (fotoperiodo, 2010). Se estimó mediante regresión lineal la relación entre temperatura media del agua y la del aire para el bienio 2006-2007, reconstruyendo posteriormente la temperatura media del agua esperada a partir de los datos de la serie histórica de temperaturas de los últimos 30 años.

CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO

En el interior de la cámara climática se dispusieron 50 acuarios de 24x24x50 cm, cada uno con 4 macetas (7x7x8 cm). El total de macetas del experimento ascendió a 200. Las macetas sembradas con el sedimento fueron sumergidas en agua sin cloro procedente de un filtro de carbón activo (Culligan Cullar). En las semanas iniciales, los acuarios se mantuvieron únicamente con 20 cm de agua, simulando el inicio del periodo de inundación. Después de la aparición de las primeras plántulas dicha profundidad se aumentó hasta los 40 cm, que es la profundidad media en las praderas de macrófitos de la marisma de Doñana, para favorecer su desarrollo. Todos los acuarios se mantuvieron a este nivel, rellenando de modo continuo las pérdidas de agua por evaporación.

Cada una de las macetas se revisó semanalmente para identificar la presencia y número de individuos de las especies de interés, su estado fenológico y la presencia de otras especies acompañantes. Además se indicó el estado general de cada acuario anotando la presencia de algas o zooplancton, entre otros. Cada cuatro semanas se tomaron medidas físico-químicas *in situ* de cada acuario: turbidez (Turbidímetro HANNA HI 93703), oxígeno disuelto en la

columna de agua, conductividad y pH (Sonda multiparamétrica WTW multi 304i). Adicionalmente se tomaron muestras de agua para analizar el contenido en nutrientes disueltos (fósforo y nitrógeno total, fosfatos, nitratos y nitritos). Partiendo de los datos de la revisión semanal de las macetas y acuarios, se llevó a cabo el mantenimiento semanal del cultivo y se eliminaron las especies acompañantes para favorecer los cultivos monoespecíficos.

El montaje de este mesocosmos permitió también el estudio temporal de las comunidades de zooplancton o la evaluación del proceso de germinación del banco de semillas y/o esporas en medios temporales.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El presente estudio se planteó como un diseño multifactorial radiométrico, con cinco factores: turbidez (con dos niveles, turbio, alrededor de 10 NTU, y claro, menos de 3 NTU); profundidad (5 y 35 cm); recubrimiento (53 y 100 % de cobertura de macetas con plantas respecto de macetas con suelo); especie (*Chara*, *Ranunculus*, *Ruppia* y *Myriophyllum*) y estado fenológico (emergente, vegetativo, floración, fructificación y senescencia).

Las medidas radiométricas para cada combinación de factor y nivel se llevaron a cabo quincenalmente a partir de la semana seis del inicio del experimento, según el método descrito en la toma de datos radiométricos. De forma paralela, cada diez semanas, se procedió a un muestreo extensivo aumentando los niveles de los factores profundidad (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm), turbidez (2.5, 5, 9, 26, 55 NTU) y recubrimiento (0, 5, 15, 26, 47 %). Se obtuvo un espectro radiométrico medio para cada una de las combinaciones.

TOMA DE DATOS RADIOMETRICOS

Para medir la radiancia espectral se utilizó un espectroradiómetro ASD FieldSpec Pro JR (Analytical Devices, Inc., Boulder, Colorado. USA). Este instrumento adquiere un espectro continuo en el rango entre 350 y 2500 nm, a través de una fibra óptica con un IFOV (campo de visión instantáneo) de 25º (0,44 rad). Las medidas se tomaron sobre un set de 19 macetas (Figura 2) colocadas sobre una rejilla metálica pintada de negro. Ésta se suspendió dentro de un cubo estanco de polietileno de color negro de 44 cm de diámetro y 65 cm de altura con un volumen de 73 litros (Figura 3). En la tapa del cubo, que impide la contaminación por radiación externa, se fijó la lámpara halógena (Lowel Pro-Lamp de 50 W) con un ángulo de 27º con respecto a la vertical y la fibra óptica dirigida hacia el nadir, girando solidariamente con la tapa mientras que la rejilla permaneció fija en el cubo. Los espectros de referencia se midieron sobre un panel blanco difuso, estándar de reflectancia, al 99 %, (Spectralon SRT-99-100, Labsphere, North Sutton, New Hampshire, USA).

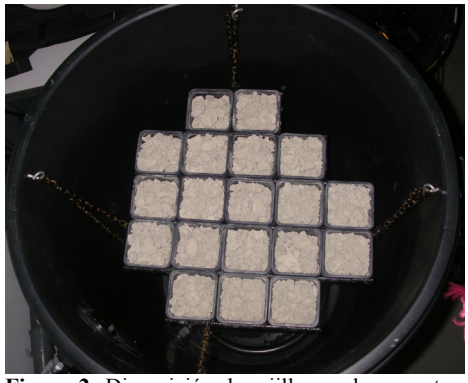


Figura 2: Disposición de rejilla con las macetas suspendidas en el cubo.

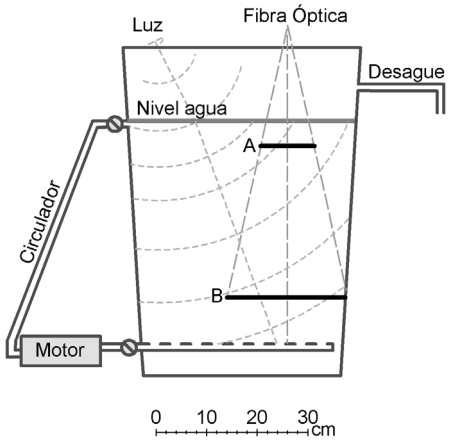


Figura 3: Esquema del cubo radiométrico (A. GIFOV a 5 cm de profundidad, B. GIFOV a 35 cm de profundidad).

El número de medidas radiométricas a tomar por muestra se determinó de modo empírico. Diversos autores (Mac Arthur et al 2006) recomiendan realizar entre 25 y 50 medidas para mejorar la relación señal/ruido. Además, señalan que la zona realmente muestreada por el ASD depende de la región del espectro que se considere, siendo distinta para cada longitud de onda. El ruido del aparato es entre 20 y 40 veces menor

que la variabilidad debida a la heterogeneidad propia de la muestra. Con 20 medidas distintas, el coeficiente de variación alcanzó el 4%, considerándose un valor razonable. Por lo tanto, se determinó que para cada muestra de la que se quería obtener un espectro se tomasen datos en 20 posiciones regularmente distribuidas, para cada una de las cuales se recogieron 3 espectros. Con estos 60 espectros se calculó el espectro medio de cada muestra.

RESULTADOS PRELIMINARES

La especie más avanzada en su ciclo vegetativo, *Chara galioides,* presentó los valores más altos de reflectividad (Figura 4).

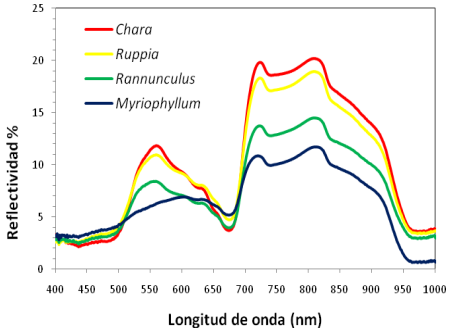


Figura 4: Espectro radiométrico de las 4 especies estudiadas en la semana 13 del cultivo, en condiciones de baja turbidez, alto recubrimiento y a 5 cm de profundidad.

La variación temporal de *Ruppia drepanensis* determinó dos períodos importantes de crecimiento y cambio de fenología, observándose a partir de la semana 15 el inicio de la floración de la especie (Figura 5). Los cambios fenológicos observados en el cultivo de las diferentes especies objeto de estudio permitirán construir una librería espectral de macrófitos bajo diferentes condiciones ambientales.

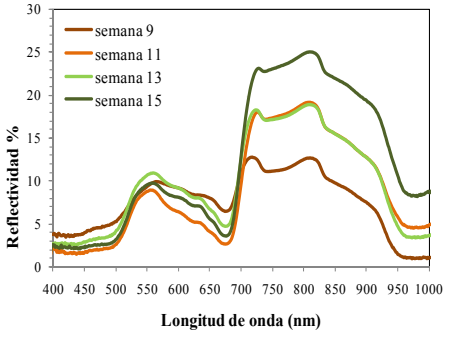


Figura 5: Cambios del espectro radiométrico de *Ruppia drepanensis* entre las semanas 9 y 15 del cultivo, en condiciones de baja turbidez, alto recubrimiento y a 5 cm de profundidad.

BIBLIOGRAFÍA

ACKLESON, S. G., y KLEMAS, V., 1987: *Remote sensing of submerged aquatic vegetation in lower Chesapeake bay: A comparison of Landsat MSS to TM imagery*. Remote Sensing of Environment, 22: 235–248.

BUSTAMANTE J., F. PACIOS, R. DÍAZ-DELGADO y D. ARAGONÉS, 2009: *Predictive models of turbidity and water depth in the Donana marshes using Landsat TM and ETM+ images,* Journal of Environmental Management, V. 90, I. 7.

HAN, L., y RUNDQUIST, D., 2003: *The spectral responses of Ceratophyllum demersum at varying depths in an experimental tank*. International Journal of Remote Sensing, 24(4): 859–864.

GARCÍA MURILLO, P., R. FERNÁNDEZ ZAMUDIO, S. CIRUJANO & A. SOUSA, 2006: *Aquatic macrophytes in Doñana protected area (SW Spain): An overview*. Limnetica, 25(1-2): 71-80

KIRK, J. T. O., 1994: *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, 2nd edn. Cambridge University Press.

MACARTHUR, A., MACLELLAN, C., y MALTHUS, T. J., 2006: *What does a spectroradiometer see? Remote Sensing and Photogrammetry Society*, Proceedings of the Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society. Cambridge, UK

THIAGO S. F. SILVA, MAYCIRA P. F. COSTA, JOHN M. MELACK, EVLYN M. L. M. NOVO, 2008: *Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications*. Environment Monitoring and Assessment 140:131–145

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer la ayuda prestada a: Francisco, Marina, Verónica, Cristina, Arantza y José Luís, por su colaboración durante el experimento. Este estudio está enmarcado dentro del proyecto de investigación del Plan Nacional del MICINN "Reconstrucción histórica mediante teledetección de la dinámica hídrica y de las comunidades de vegetación acuática de las marismas de Doñana" CGL2009-09801.

Indicadores de cambio umbralizados con algoritmos basados en la entropía

A. Arquero[1], I. Molina[2], E. Martínez[1] y J. E. Fernández[2]

[1] Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid. Campus de Montegancedo, UPM. 28660 Boadilla del Monte (Madrid, España). Correo electrónico: aarquero@fi.upm.es

[2] Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM, Campus Sur, Ctra. de Valencia, km.7, 28031 Madrid (España).

RESUMEN

La detección de cambios es una de las aplicaciones más frecuentes de la Teledetección. Las metodologías utilizadas para detección de cambios en Teledetección se agrupan de manera general en supervisadas y no supervisadas. En este trabajo, se demuestra que las técnicas de umbralización basadas en el cálculo de la entropía, son métodos muy adecuados para generar mapas de cambios obtenidos mediante metodologías no supervisadas en entornos urbanos. Para ello, se han aplicado algoritmos basados en la entropía a distintos 'Indicadores de Cambio', a partir de un conjunto de datos aéreos y de satélite (SPOT5, XS, PAN). Se ha aplicado un método de fusión de los resultados que permite obtener un único mapa de cambios para cada nivel. Se ha puesto de manifiesto la validez de la aplicación de estas metodologías en Detección de Cambios.

Palabras clave: indicadores de cambio, entropía, umbralización, fusión de resultados.

ABSTRACT

Change detection is one of the most common applications of Remote Sensing. The methodologies used for change detection in remote sensing are generally grouped into supervised and unsupervised. In this paper, we show that thresholding techniques based on the entropy calculation, are appropriate methods to generate change maps obtained by unsupervised procedures in urban environments. For this purpose, entropy-based thresholding algorithms have been applied to 'Change Indicators' derived from aerial and SPOT 5 satellite data. Thereafter, these results have integrated in a multisource decision algorithm in order to produce a single change detection map. The achieved results highlight the suitability of this Change Detection methodology.

Keywords: *change indicators, entropy, thresholding, results fusion.*

INTRODUCCIÓN

La evaluación y detección de cambios medioambientales es una de las aplicaciones más frecuentes en Teledetección. Como consecuencia de ello, ha habido una gran proliferación de investigaciones sobre el tema, estableciéndose diferentes metodologías de Detección de Cambios a partir de datos suministrados por imágenes multi-temporales. De una manera general, se puede indicar que en las metodologías supervisadas, se obtiene un mapa de cambios que indica además de la localización espacial del cambio producido, las categorías temáticas implicadas en dicho cambio. La obtención de dicha información temática requiere adicionalmente de las denominadas fases de aprendizaje. Las técnicas no supervisadas no requieren de ellas, sin embargo, la calidad de los resultados dependerá fundamentalmente de procesos de umbralización que evaluarán la capacidad del algoritmo elegido. La umbralización es una técnica importante usada para identificar y separar objetos del fondo, en base a la distribución de los niveles de gris o la textura de los objetos en las imágenes. Muchas técnicas de umbralización se basan en la estadística del histograma de los niveles de gris o en la matriz de co-ocurrencia de una imagen. La determinación de los umbrales puede realizarse mediante procedimientos paramétricos o no paramétricos. Los primeros utilizan la distribución de niveles de gris del histograma para calcular el umbral (Tsai, 1985) (Wang, 1984). En los no paramétricos, los umbrales se obtienen de

acuerdo a algún criterio. Por ejemplo, el método de Otsu (Otsu, 1979) selecciona los umbrales óptimos maximizando la varianza entre clases, utilizando procesos de agrupamiento a partir de dos distribuciones Gaussianas en las que se representan, respectivamente, las zonas de cambio y no cambio. Otros métodos (Kapur et al., 1985) (Li and Tam, 1998) obtienen el umbral a partir del cálculo de la entropía a partir del histograma.

Este trabajo se ha centrado en el estudio y análisis de umbralización de índicadores de cambio aplicados a imágenes aéreo-espaciales disponibles de diferentes fechas. Con el objetivo de comparar con otros métodos, los resultados obtenidos mediante métodos de umbralización basados en entropía, se han aplicado también un método iterativo (Ridler, 2007) y otro basado en el agrupamiento de celdas (Otsu, 1979).

DATOS DE PARTIDA

Las imágenes utilizadas en este estudio para determinar la máscara de cambios en diferentes niveles de resolución espacial, son: para el nivel 1, Spot5-XS; para el nivel 2, Spot5-PAN y para el nivel 3, Ortoimágenes. Las escenas multitemporales, co-referenciadas entre sí, están geográficamente situadas en las cercanías de Alcoy (Alicante).

METODOLOGÍA

En los algoritmos basados en la entropía se establece para una imagen, un valor umbral *T* en función de la entropía *(H)* de la distribución de los valores de la imagen. La entropía, como término asociado al procesamiento digital de imágenes, es una medida de la heterogeneidad en los niveles de gris en ventanas de inspección en una imagen. En este tipo de algoritmos se aplica la entropía de Shannon *H(T)* para las clases Cambio $H_C(T)$ / No_Cambio $H_{NC}(T)$. La entropía correspondiente al conjunto global de la imagen queda definida por la Ecuación 1:

$$H(T)=H_C(T)+H_{NC}(T) \quad (1)$$

Los métodos basados en la entropía que se aplican en esta investigación son los indicados a continuación:

1. El método de Kapur (Kapur et al., 1985).
2. El método de Li (Li and Tam, 1998).
3. El método de Shanbang (Shanbang, 1994).
4. El método Renyi-Sahoo (Sahoo, 1998).
5. El método Yen (Sezgin, 2001).

El método iterativo de Riddler (Ridler, 2007) se inicializa mediante un valor umbral estimado a partir de la media de valores del histograma. Cada nuevo umbral T_{n+1} es calculado a partir de las medias obtenidas en la etapa anterior, T_n. El proceso converge si se cumple (Ecuación 2):

$$T_n - T_{n+1} \leq Tolerancia \quad (2)$$

donde: *Tolerancia (valor seleccionado)=0,5*

El método Otsu (Otsu, 1979) persigue iterativamente agrupamientos con minimización (maximización inter-clase) de la suma ponderada de las varianzas dentro de las clases Cambio (C)/No_Cambio(NC), para establecer un umbral óptimo.

Las imágenes en las que se han aplicado los métodos de umbralización, han sido las resultantes de calcular determinados índices espectrales u operaciones a las imágenes de origen. Así, para el nivel de resolución 1 son: CVA (Análisis del Vector de Cambios) y NDVI (Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada); para el nivel 2, Diferencia y Ratio entre bandas; y para el nivel 3, CVA-RGB y CVA-Textura.

Se generan las máscaras binarias de C/NC a partir de los umbrales, que se evalúan cualitativa y cuantitativamente (Champion, 2007). Después se aplica un procedimiento de fusión que permite obtener un único resultado a partir de los resultados anteriores. Se aplica un método estadístico paramétrico (Bayesiano) (Bruzzone, 1999), determinando: la probabilidad a priori de las clases C/NC, la probabilidad condicionada y un factor de ponderación (λ), para cada indicador de cambios. Se lleva a cabo un control de calidad basado en el análisis de matrices de confusión y las propiedades del espacio ROC, con el fin de determinar qué mapa de cambios resultante de una determinada combinación de coeficientes de ponderación es el más fiable (Champion 2007).

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra resaltados los umbrales que generan las máscaras de cambio evaluadas como mejores, para cada nivel de resolución espacial, que se recogen en la Figura 2 (d, e, h, i, l, m), junto los resultados de su evaluación Figura 2 (f, j, n).

La Figura 1 muestra los resultados finales del control de calidad de fusión en el espacio ROC correspondiente a las áreas de testeo indicadas en la Figura 2 (c). Los puntos rojos indican los mejores resultados de fusión, cuyas imágenes finales se encuentran en la Figura 2 (g, k, o), donde se indican los factores de ponderación adecuados (λ) en cada caso.

Método	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3	
	CVA	NDVI	DIF	RATIO	CVA (RGB)	CVA (Text)
Kapur	64	127	60	51	135	105
Li	21	20	17	31	44	39
Shanbhag	152	**55**	224	119	**71**	154
Renyi	64	110	58	46	122	**105**
Yen	64	131	**55**	46	122	107
Ridler	39	33	37	**36**	61	61
Otsu	**38**	32	37	35	61	60

Tabla 1: Valores de umbralización en el intervalo [0,255] de cada algoritmo respecto al indicador de cambio.

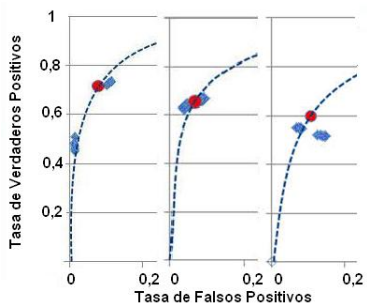


Figura 1: Control de calidad de la fusión en el espacio ROC para los niveles 1, 2 y 3.

CONCLUSIONES

Esta metodología no supervisada que aúna procesos de umbralización y de fusión de la información obtenida, a partir de diferentes indicadores de cambio resulta se muy adecuada para las imágenes aeroespaciales de alta resolución.

BIBLIOGRAFÍA

BRUZZONE, L., & PRIETO, D. F., 1999. *A bayesian approach to automatic change detection*, Proc. of IGARSS´99, 1816–1818.

CHAMPION, N., 2007. *2D Building change detection from high resolution aerial images and correlation digital surface models*, Int. Arch. of Photogrammetry, Rem. Sen. and Spat. Inf. Sci., Stilla U. et al (Eds) PIA07, 36 (3/W49A) 197-202.

KAPUR, J. N., SAHOO, P. K., WONG, A. K. C., 1985. *A New Method for Gray-level Picture Thresholding Using the Entropy of the histogram*, Grap. Mod. and Image Proc., 29, 273-285.

LI, C. H., TAM, P. K. S., 1998. *An Iterative Algorithm for Minimum Cross-Entropy Thresholding*, Pattern Rec. Letters, 19, 771-776.

OTSU, N., 1979. *A threshold selection method from gray level histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9, 62-66.

RIDLER, T., CALVARD, S., 2007. *Picture thresholding using an iterative selection method*, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 8(8), 630-632.

SAHOO, P. K., SOLTANI, S., WONG, A. K. C., CHEN, Y., 1998. *A survey of Thresholding Techniques*, Comp. Grap. and Image Proc., 41, 233-260.

SEZGIN, M., SANKUR, B., 2001. *Comparison of Thresholding methods for nondestructive testing applications*, Int. Conference on Image Processing IEEE ICIP'01, Thessaloniki, Greece.

SHANBHAG, A. G. (1994). *Utilization of information measure as a means of image thresholding*, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 56(5), 414-419.

TSAI, W. H. (1985). *Moment-preserving thresholding: a new approach*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 29, 377-393.

WANG S. AND HARALICK R. (1984), *Automatic multithreshold selection*, Comp., Vision, Grap. and Image Processing, 25, 46-67.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) por la financiación del proyecto "ESPAÑA VIRTUAL" dentro del cual se ha desarrollado esta investigación y al CNIG por los datos suministrados.



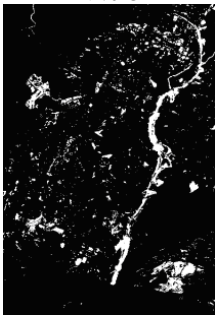
a) Ortoimagen 2005 Nivel 3



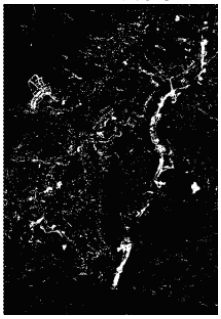
b) Ortoimagen 2007 Nivel 3



c) Areas test, Verde (NC) Rojo (C) para la evaluación de fusión



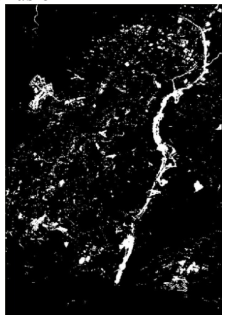
d) Otsu (Nivel 1)



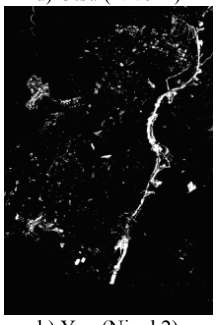
e) Shanbhag(Nivel 1)

	Verdad Terreno (%)	
	C	NC
C	71,7	7,8
NC	28,3	92,2
Total	100 %	100 %
Compleción	71,7 %	
Corrección	89,7 %	

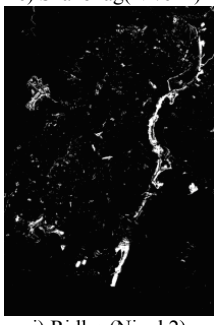
f)



g) λ_{CVA}=0,5, λ_{NDVI}=0,5



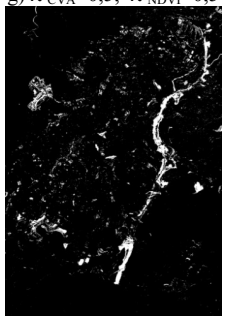
h) Yen (Nivel 2)



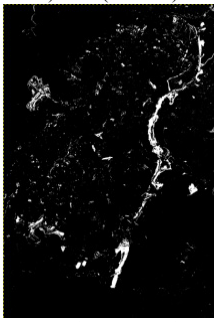
i) Ridler (Nivel 2)

	Verdad Terreno (%)	
	C	NC
C	63,4	3,9
NC	36,6	96,1
Total	100 %	100 %
Compleción	63,4 %	
Corrección	93,1 %	

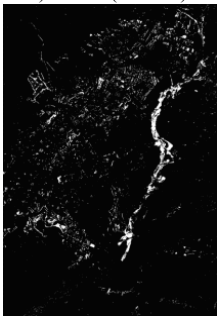
j)



k) λ_{DIF}=0,2, λ_{RATIO}=0,8



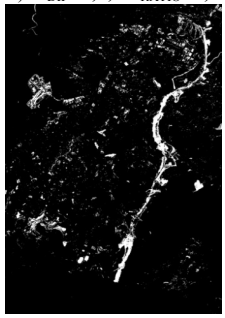
l) Shanbhag (Nivel 3)



m) Renyi (Nivel 3)

	Verdad Terreno (%)	
	C	NC
C	59,7	10,7
NC	40,3	89,3
Total	100 %	100 %
Compleción	59,7 %	
Corrección	82 %	

n)



o) λ_{CVA}=0,5, λ_{TEXT}=0,5

Figura 2: Composición RGB de Ortoimágenes (a, b). Áreas test evaluación (c). Mejor máscara de cambio para cada nivel de resolución de las imágenes y método de umbralización (d, e, h, i, l, m). Datos de evaluación para Cambio (C), No_Cambio (NC) (f, j, n). Mejor máscara de cambio tras la fusión con su factor de ponderación (g, k, o).

Una revisión de las principales magnitudes relacionadas con la caracterización de los sensores usados en teledetección

A. Calle, J.L. Casanova y P. Salvador

LATUV. Universidad de Valladolid. Edificio I+D, Paseo de Belén, s/n, 47011-Valladolid.
e-mail: abel@latuv.uva.es

RESUMEN

Un sensor viene representado a través de su resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral, aunque estas definiciones no siempre son usadas con precisión. El trabajo que se presenta tiene un perfil académico y formativo en teledetección, que realiza una revisión de las definiciones de las magnitudes relacionadas con el diseño de sensores, para que puedan ser comparadas.

Palabras clave: MTF, PSF, NEΔT, NEΔρ

ABSTRACT

A satellite sensor is characterized by its spatial, temporal, radiometric and spectral resolution; however these features are not clearly addressed. This work has an academic profile into the remote sensing topics; it is a review of the main sensor magnitudes related to design of sensors, in order to have knowledge to compare them.

Keywords: MTF, PSF, NEΔT, NEΔρ

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una gran diversidad de sensores para responder a las necesidades de los proyectos de observación de la tierra. Además el desarrollo de aplicaciones requiere disponer de datos de calidad, por lo que en la práctica, el usuario debe establecer una relación adecuada calidad/coste de las imágenes para trabajar. Uno de los criterios principales en la elección de imágenes suele ser, por ejemplo, la resolución espacial, de forma que el usuario prefiere una imagen de 1 m antes que otra de 4 m. Sin embargo, ¿se comprenden adecuadamente estos números?. Una llamada de atención sobre los parámetros electro-ópticos que es necesario conocer, para comparar dos sensores, la realiza Joseph (2000) en una comunicación abierta, como presidente de la Comisión Técnica del ISPRS "*Sensors, Platforms and Imagery*", para pedir una reflexión acerca de la información precisa que los usuarios de imágenes deberían disponer a fin de decidir por la calidad de las imágenes utilizadas.

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL

A menudo se ofrece la definición de resolución espacial como la dimensión del objeto más pequeño que se puede discernir en una imagen. Esto es no decir nada si no se establece el contraste ni se precisa la dimensión del píxel del que procede la radiancia; tal definición resulta insuficiente e imprecisa. Hay dos conceptos que tienden a usarse como sinónimos para definir el píxel: el IGFOV (*Instantaneous Geometric Field of View*) que es el tamaño de la imagen del detector proyectado por el sistema óptico sobre el suelo (también conocido como *footprint*) y el GSD (*Ground Sampling Distance*) que cuantifica la distancia del suelo a la que son grabados dos pixeles consecutivos; si expresamos el GSD como el ángulo de muestreo del sensor tendremos el IFOV (*Instantaneous Field of View*) en unidades angulares. IGFOV y GSD son conceptos diferentes pero el ratio entre ellos tiene un impacto directo sobre el valor de la radiancia que atribuimos a un píxel. Es muy recomendable el artículo de revisión que hace Cracknell (1998) que titula con la pregunta: "¿Qué hay en un píxel?" acerca del contenido radiométrico real de un píxel de imagen, dado que la relación que existe entre los valores IGFOV y GSD determina la mezcla de cubiertas del suelo que contribuyen al valor radiométrico. Debe entenderse que el IGFOV no es una función cuadrada uniforme, sino que tiene una degradación mayor en los bordes de forma que se parece a una función

gausiana tridimensional. Esta degradación se produce debido a varios factores: i) difracción del sistema óptico, ii) limitación del detector, iii) influencia de los circuitos eléctricos y iv) la interacción de la radiación con la atmósfera; todo ello tiende a generar un IGFOV parecido a una mancha degradada, con la consiguiente reducción del contraste. Por ello, la función más importante para establecer la resolución espacial es la MTF (*Modulation Transfer Function*) que establece el contraste de la imagen. La MTF cuantifica la sensibilidad del sensor para detectar el contraste a través de la frecuencia de las variaciones radiométricas de la escena; dicho de otro modo, la función MTF tiene el mismo significado, en el dominio de las frecuencias, que la PSF (*Point Spread Function*) en el dominio espacial. Para comprender la relación entre MTF y PSF y su determinación analítica a través de un modelo de sensor se recomienda el artículo de Markham (1985) dedicado a la caracterización espacial de los sensores Landsat MSS (*Multispectral Scanner*) y TM (*Thematic Mapper*).

La recomendación de la NASA (1973) para establecer un concepto de resolución espacial que permita comparar sensores fue introducir el EIFOV (*Effective Instantaneous Geometric Field of View*) definido como la dimensión espacial en la superficie de la tierra correspondiente a la frecuencia para la cual el valor de la MTF es 0.5. Los cuatro factores mencionados que degradan la MTF del sensor son diferentes para las direcciones de movimiento del satélite (*track*) y barrido de línea de imagen (*scan*); la MTF_{scan} está más degradada debido al mayor impacto de la componente electrónica necesaria para registrar los pixeles de cada línea con mayor velocidad que en la dirección *track*, donde la componente electrónica casi no tiene efecto. Por lo tanto el valor MTF 0.5, en cada dirección, establece la resolución espacial correspondiente y, por lo tanto, diferente. Existe un límite de frecuencia máxima establecida por la mitad de la frecuencia de muestreo (valor del GSD en el dominio de las frecuencias), más allá del cual, el detector no puede discriminar ninguna variabilidad de contraste; este límite es la *frecuencia de Nyquist*, f_N (f_N=0.5/IFOV ciclos/rad). Si la señal que está siendo muestreada tiene componentes de frecuencia más altas que la frecuencia de *Nyquist*, entonces el muestreo produce una degradación denominada *aliasing*. Precisamente el valor de MTF en la frecuencia de *Nyquist* es una figura de mérito de los sensores. La caracterización espacial se completa con la relación de las magnitudes involucradas: IGFOV, EIFOV, GSD y MTF. En el caso ideal, con una MTF de valor 1 para frecuencias menores de *Nyquist* y nula para superiores, tendríamos que IGFOV, EIFOV y GSD deberían coincidir. Sin embargo en el caso real, ocurre que EIFOV<IGFOV, por lo que las funciones PSF de pixeles contiguos se encuentran superpuestas y el valor de GSD debería ser muy cercano al EIFOV. El grado de cercanía lo establece al final la diferencia entre las resoluciones *scan* y *track*. Un ajuste en la dirección *track* implicará un exceso de solapamiento en la dirección *scan*, y mayor emborronamiento. Este caso es preferible a ajustar la dirección *scan* que conllevaría la introducción potencial de *aliasing* en la dirección *track*. Un ejemplo interesante es la figura 1 adaptada del análisis de Markham (1985) del sensor TM, que con un IFOV de 42.5µrad le corresponde una frecuencia de Nyquist de 11765 ciclos/rad. Los valores de MTF 0.5 corresponden a resoluciones de 31.7 y 35.3 metros. Ajustando el GSD a la resolución *track* existe un ligero solapamiento, para evitar el *aliasing*.

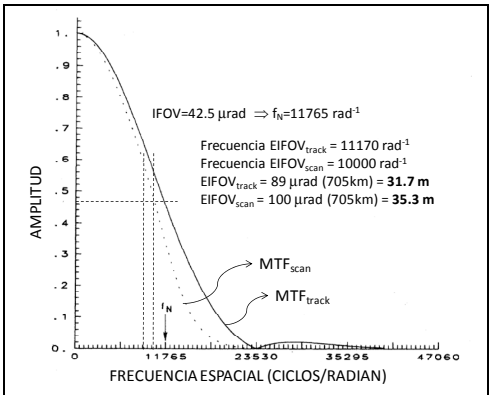


Figura 1: Funciones MTF del sensor TM y determinación de las resoluciones espaciales en direcciones *track* y *scan*

CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL

La determinación de propiedades a partir de la reflectancia o temperatura, donde la superficie exhibe discontinuidades, debe realizarse en un intervalo espectral localizado, y con bandas que no superen un valor umbral de anchura. Esta afirmación está clara; sin embargo no existe una definición clara de anchura espectral efectiva ($\Delta\lambda$) y lo más importante, la longitud de onda representativa, λ_c. La SRF (*Spectral Responsivity Function*) es la función que especifica la sensibilidad con la que el sensor detecta radiancia para cada longitud de onda, λ, y tiene valor nulo por

debajo y por encima de dos límites dados de longitud de onda. Un método muy extendido, para expresar la anchura de una banda espectral, es el FWHM (*Full-Width at Half-Maximum*) consistente en establecer como $\Delta\lambda$ la diferencia entre los valores de λ en los que la SRF tiene el valor del 50%. Este procedimiento, sin embargo, es impreciso cuando se aplica a funciones SRF asimétricas dado que lleva a establecer una longitud de onda central, λ_c, en el valor medio, introduciendo un error cualitativo en la interpretación del valor de la radiancia en esa banda. Palmer (1984) realiza una discusión muy esclarecedora acerca de los métodos de caracterización espectral y los inconvenientes que presenta cada uno, proponiendo, finalmente, la técnica de normalización radiométrica del ancho de banda (*Radiometric bandwidth normalization*), consistente en asignar a un sensor con SRF conocida, una función equivalente cuadrada con un valor de respuesta constante, R_n. La figura 2 esquematiza gráficamente esta definición; el área de la función cuadrada será el mismo que el área de la SRF real, el valor de λ_c es el centro de la función cuadrada y el ancho efectivo, $\Delta\lambda$, es la anchura de la función cuadrada. De esta forma λ_c es el centroide de la función SRF, por lo que pondera adecuadamente las funciones SRF asimétricas. Obsérvese que SRF(λ_1) y SRF(λ_2) no tienen el valor de 0.5, que hubiera sido lo propuesto por el método FWHM.

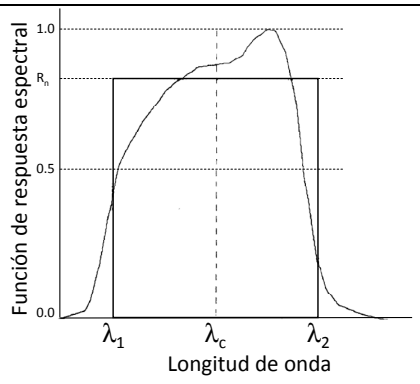


Figura 2: Representación de una SRF asimétrica, y la función cuadrada auxiliar que permite definir la anchura efectiva, $\Delta\lambda=(\lambda_2-\lambda_1)$ y la longitud de onda central, λ_c

$$\lambda_c = \frac{\int \lambda \cdot SRF(\lambda) \cdot d\lambda}{\int SRF(\lambda) \cdot d\lambda} \quad ; \quad \int SRF(\lambda) \cdot d\lambda = R_n \cdot \Delta\lambda$$

La longitud focal del telescopio excede las dimensiones del bus del satélite, por lo que el diseño involucra lentes y espejos que introducen algunas aberraciones y limitan la calidad espectral. Su discusión está fuera del alcance de este trabajo, pero se recomienda al lector el trabajo de Cawthorne, *et al.* (2008), autores que pertenecen a SSTL (*Surrey Satellite Technology Limited*) y que realizan una excelente revisión de los sistemas de telescopios en satélites de muy alta resolución espacial, explicando ventajas e inconvenientes, de cada diseño, relacionadas con la caracterización espectral y radiométrica. También se puede encontrar una discusión académica en Larson & Wertz (1999).

CARACTERIZACIÓN RADIOMÉTRICA

Otro concepto que, frecuentemente, se maneja con imprecisión es la resolución radiométrica, entendida, de forma insuficiente como el número de bits que usa un sensor para estratificar la medida física de la radiancia ($W/m^2/\mu m/sr$). Mucho más precisa es la caracterización radiométrica de un sensor a través de la temperatura/reflectancia diferencial equivalente en ruido $NE\Delta T/NE\Delta\rho$ (*Noise Equivalent diferential Temperature/Reflectance*), en el espectro térmico/solar que significa el mínimo cambio en temperatura/reflectancia que puede ser detectado por el sensor; esta magnitud, a su vez, depende del valor SNR (*Signal to Noise Ratio*), del rango dinámico en que se establece la saturación y el número de bits de cuantificación.

Con la idea de unificar los espectros térmico y solar, Joseph (2000) propone y usar la radiancia diferencial equivalente en ruido, $NE\Delta R$, con las unidades propias de la radiancia espectral. Es habitual encontrar la referencia del parámetro SNR en las características de los sensores por parte de los fabricantes; sin embargo se encuentran valores elevados de SNR gracias a dispositivos externos como el TDI (*Time Delay and Integration*) que consiste en usar el movimiento de la imagen a lo largo de las filas que componen el *array* del plano focal para extender el tiempo de integración de la radiancia entrante. La ventaja del uso del TDI consiste en aumentar considerablemente el parámetro SNR y, consiguientemente, la resolución radiométrica; sin embargo es un elemento mecánico que puede producir alteración en los parámetros de apuntamiento (*attitude*). La forma más natural de aumentar la SNR, en satélites de alta resolución espacial consistiría en aumentar el intervalo de la función de respuesta espectral, de forma que se aumentaría la radiancia recibida sin necesidad de aumentar el tiempo de integración. Este es el

principio de las bandas pancromáticas (PAN); sin embargo se perdería la capacidad para discernir discontinuidades en la firma espectral de las cubiertas, como se explicaba en el apartado anterior.

RESOLUCIÓN TEMPORAL

El concepto de resolución temporal suele ser el que presenta menor confusión de los cuatro aspectos tratados aquí; aunque debe matizarse. La resolución temporal o ciclo de repetición especifica el tiempo que tarda un sensor en volver a cubrir una localización determinada manteniendo la geometría de visión que establece el ancho de barrido (conocido en inglés como *swath*). En sensores antiguos el concepto era inequívoco pero cuando aparecieron satélites con la capacidad de programar el apuntamiento del sensor para realizar capturas solicitadas (p.e. SPOT) apareció el término de "tiempo de revisita". Los sensores con capacidad de apuntamiento aminoran el tiempo de retraso en disponer de una captura sobre cualquier lugar, aunque el coste de la imagen es más elevado. Tal y como sugiere Joseph (2000) resolución temporal y tiempo de revisita son conceptos diferentes y, por lo tanto, no debieran ser usados como sinónimos puesto que las imágenes obtenidas mediante el ciclo natural de repetición conservan la misma geometría de visión, de forma que las variaciones radiométricas provocadas por la función BDRF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) son mínimas, lo que no ocurre en imágenes obtenidas mediante orientación solicitada del sensor (cuando disponen de esta posibilidad). Esta precisión cobra mayor importancia cuanta más alta sea la resolución espacial. Por otra parte, aún en el caso de conocer un valor del ciclo de repetición, debiera aportarse dicho parámetro a diferentes valores de latitud o especificar el valor a latitud 0º, que representa el caso más desfavorable. Joseph (2000) propone los valores de latitud 0º y 40º como estándar representativo, para poder interpretar y comparar esta magnitud.

CONCLUSIÓN Y SÍNTESIS

El aumento de sistemas de observación de la tierra y la amplia oferta en imágenes de sensores, sobre todo en alta resolución espacial, requiere comparar su calidad y justificar el coste de su adquisición. Para sintetizar de forma muy simple un proceso de comparación entre sensores, en Larson & Wertz (1999) se propone un índice relativo de calidad RQI (*Relative Quality Index*) que permite comparar un sensor con otro cuyas características sirven de referencia:

$$\mathrm{RQI} = \frac{\mathrm{SNR}}{\mathrm{SNR}_{\mathrm{ref}}} \frac{\mathrm{MTF}}{\mathrm{MTF}_{\mathrm{ref}}} \frac{\mathrm{GSD}_{\mathrm{ref}}}{\mathrm{GSD}}$$

siendo el valor MTF a la frecuencia de *Nyquist* y el subíndice "ref" indica el parámetro del sensor con el que se compara.

BIBLIOGRAFÍA

CAWTHORNE, A., PURLL, D. and EVES, S. 2008. *Very high resolution imaging using small satellites*, 6th Responsive Space Conference, April 28-May, 1, 2008. Los Angeles, CA.

CRACKNELL, A.P., 1998. *Review article. Synergy in remote sensing: what's in a pixel?*. International Journal of Remote Sensing. 19, (11), 2025-2047.

JOSEPH, G., 2000. *How well do we understand Earth observation electro-optical sensor parameters?*. Remote Sensing of Environment, 55, 9-12.

LARSON, W. and WERTZ, J.R. (Eds.). 1999. *Space Mission Analysis and Design*. 3rd Ed. Space Technology Library Published jointly by Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers.

MARKHAM, B.L. 1985. *The Landsat Sensors Spatial Responses*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-23, (6), 864-875

NASA SP 335, 1973. *Advanced scanners and imaging systems for earth observation*. Working Group Report, NASA/GSFC.

PALMER, J.M., 1984. *Effective Bandwidths for LANDSAT-4 and LANDSAT-D Multispectral Scanner and Thematic Mapper Subsystems*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-22, (3), 336-338.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto CGL2004-00173 financiado por el Ministerio Ciencia y Tecnología y fondos europeos FEDER.

Obtención de series multitemporales y multisensor de índices de vegetación mediante un procedimiento de normalización absoluta

I. Campos, M. Odi, M. Belmonte, C. Martínez-Beltrán y A. Calera

Instituto de Desarrollo Regional. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus de Albacete. Campus Universitario s/n. 02071. Albacete (España). Isidro.Campos@uclm.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología de normalización absoluta aplicada a los índices de vegetación (IV) derivados de la reflectividad mediante el método de superficies pseudo-invariantes. Este método se basa en que es posible encontrar superficies en la imagen cuyo IV es invariante en el tiempo y que dichas superficies exhiben un rango de valores de IV que abarque una gama dinámica adecuada de valores. El IV de dichas superficies es conocido e invariante y se utiliza como patrón en la normalización de una serie multitemporal de imágenes de los sensores TM (Landsat-5) y DMC (Deimos-1 y UKDMC-2).

La idoneidad de la metodología de normalización absoluta se evalúa comparando las imágenes normalizadas frente a imágenes con corrección atmosférica absoluta. Para esta comparación se utilizaron 6 imágenes Landsat 5 TM, además de 3 imágenes DMC cuasi-sincrónicas con imágenes TM. La comparación concluye en un buen acuerdo para todo el rango de IV estudiado. Estos resultados indican la posibilidad de utilizar el método de normalización absoluta propuesto en la obtención de series multitemporales y multisensor de imágenes de satélite.

Palabras clave: Corrección atmosférica relativa; NDVI; Series multitemporales

ABSTRACT

This paper presents a methodology for absolute normalization applied to reflectance based vegetation indices (VI) using the methodology of pseudo-invariant surfaces. This method is based on surfaces that can be found in the image whose IV is invariant along time and that these surfaces exhibit a range of VI values which comprises a suitable dynamic range of values. The VI of the invariant surfaces is known and is used as a standard in the normalization of multitemporal series of images of the TM sensors (Landsat-5) and DMC (UKDMC-2 and Deimos-1).

The adequacy of the absolute normalization methodology has been evaluated by comparison with Landsat-5 images corrected using absolute atmospheric correction. Comparing the corrected TM images using both methods (6 images) and also the quasi-synchronous DMC images (less than 2 days apart on the acquisition date) with TM images (3 images). The comparison results in a good agreement for the entire range of IV. These results let us to confirm the absolute normalization procedure as a valid tool to obtain multitemporal and multisensor satellite time series.

Keywords: *Relative atmospheric correction; NDVI; Multitemporal series*

INTRODUCCIÓN

La obtención de una serie multitemporal y multisensor requiere que las observaciones de los distintos sensores sean comparables en el tiempo. Además de los efectos de ángulo de iluminación y calibrado del sensor, el principal efecto es la corrección del efecto de la atmósfera.

Los métodos denominados de corrección absoluta se basan en el estudio de las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen. La medida de las variables requeridas como contenido en aerosoles y vapor de agua no suele estar disponible en la mayoría de los estudios. Una aproximación al estado de la atmósfera en el momento de adquisición de la imagen puede extraerse de la propia imagen, seleccionando píxeles con unas condiciones determinadas. A continuación los valores de reflectividad de superficie se obtienen mediante modelos de transferencia radiativa. Existen además métodos de corrección relativa que basan

la corrección de las series de imágenes en una imagen considerada como referencia. La reflectividad de cada banda del sensor es corregida en función de superficies consideradas invariantes (Schroeder et al., 2006), o los índices de vegetación son corregidos en base a esas superficies (Chen et al., 2005).

En este trabajo se presenta una metodología de normalización absoluta aplicada a los índices de vegetación (IV) mediante el método de superficies con IV invariante. La metodología propuesta se denomina normalización puesto que las imágenes se reescalan respecto a valores de IV conocidos, y absoluta porque los valores patrón de IV han sido obtenidos a partir de medidas en tierra, eliminando el efecto de la atmósfera. Este método se basa en que es posible encontrar superficies en cada imagen cuyo IV presenta un valor similar (invariante) y que dichas superficies deben abarcar el rango completo de valores de IV. El IV invariante de estas superficies debe ser conocido.

Las mejores superficies IV-invariantes son el suelo desnudo y la vegetación verde muy densa, que representan los dos extremos del rango dinámico de valores de IV para la superficie terrestre. Los índices de vegetación de estas superficies han sido medidos con radiometría de campo y contrastados para distintas áreas, obteniendo en todo caso valores muy similares y constantes en el tiempo. Los valores conocidos se toman como patrón y en base a ellos se procede a la normalización de las imágenes estudiadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Información de partida

La serie temporal de imágenes empleadas se presentan en la Tabla 1. Las imágenes estudiadas son Landsat 5-TM (TM) y Deimos-1 y UKDMC-2 (DMC) y fueron obtenidas durante el año 2010. La presencia de nubes fue considerada y eliminados los píxeles afectados en el proceso de evaluación de los resultados.

TM	DMC
24/05/2010	
31/05/2010	30/05/2010
16/06/2010	
02/07/2010	30/06/2010
11/07/2010	
18/07/2010	19/07/2010

Tabla 1: Fechas de las imágenes estudiadas de los sensores empleados (día/mes/año).

El área de estudio se restringe a una zona de 30*30 Km cuyas coordenadas centrales son 39.05 N; 1.86 W. Las cubiertas naturales del área de estudio son principalmente cultivos, suelo desnudo y matorral.

En este trabajo se utiliza una adaptación del modelo de corrección atmosférica absoluta desarrollado por la Universidad de Valencia (Guanter et al., 2007) como método de comparación y evaluación. La modificación de esta metodología y su adaptación a sensores multiespectrales, Landsat-5 TM, ha sido desarrollada por el mismo autor dentro del proyecto DEMETER.

Metodología de normalización absoluta

El procedimiento a aplicar sobre el NDVI registrado por el sensor ($NDVI_{TOA}$) que aquí se describe se basa en las siguientes hipótesis:

- Es posible encontrar superficies en la imagen que corresponden a cubiertas con IV máximo (vegetación muy densa y fotosintéticamente activa) y mínimo (suelo desnudo) medidos en tierra para las superficies naturales.
- Se conocen los valores de IV en superficie de las cubiertas de interés, medidas con radiometría de campo.
- El efecto de la atmósfera sobre el IV puede ser descrito con precisión suficiente mediante una función lineal.

Bajo estas hipótesis es posible llevar los valores de $NDVI_{TOA}$ a los valores NDVI de la superficie. La aplicación del método propuesto requiere de la identificación de las superficies consideradas con IV invariante en cada una de las escenas analizadas. En este trabajo, la selección se realiza de forma manual, obteniendo el NDVI promedio de parcelas agrícolas sin vegetación ($NDVI_{TOA\text{-}suelo}$) y el NDVI promedio para zonas de vegetación muy densa ($NDVI_{TOA\text{-}max}$). A partir de los valores obtenidos en cada escena y el NDVI en superficie ($NDVI_{real}$) de las mismas se obtiene el NDVI normalizado de la escena completa ($NDVI_{NA}$) (Eq. 1).

$$NDVI_{NA} = m \cdot NDVI_{TOA} + b \qquad (1)$$

donde m y b son respectivamente la pendiente y la ordenada en el origen de la recta de normalización obtenida a partir de los valores de $NDVI_{TOA\text{-}suelo}$; $NDVI_{TOA\text{-}max}$ y $NDVI_{real}$ del suelo desnudo y la vegetación densa.

Para la zona de estudio, el $NDVI_{real}$ de las superficies con IV invariante es igual a 0.13 para el suelo y 0.91 para la vegetación verde muy densa. Dichos valores han sido obtenidos mediante radiometría de campo, para los anchos de banda y filtros del sensor TM.

Aplicación y evaluación del método de normalización absoluta

El método de normalización se aplica a una serie de imágenes Landsat-5 TM. La idoneidad de la metodología propuesta se evalúa comparando la imagen normalizada frente a la misma imagen con corrección atmosférica absoluta. La comparación de imágenes TM se realiza píxel a píxel para un total de 65000 píxeles seleccionados (muestreo aleatorio) sobre al área de estudio, eliminando aquellos píxeles afectados por nubes o sombras. Además el proceso de normalización se aplica en una serie de 3 imágenes DMC cuasi-sincrónicas con imágenes TM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuaciones de normalización obtenidas para los sensores TM y DMC

Las ecuaciones de normalización del índice de vegetación NDVI obtenidas para las imágenes TM y DMC se presentan en la Tabla 2. Los valores de la pendiente y ordenada en el origen de las ecuaciones obtenidas son similares en todas las fechas estudiadas puesto que el $NDVI_{TOA}$ muestra cierta estabilidad en todo el periodo. Además estas relaciones son similares para los sensores TM y DMC, a pesar de las diferencias de la respuesta espectral de ambos sensores. Las ecuaciones obtenidas se aplican para todo el área de estudio obteniendo imágenes de NDVI normalizado ($NDVI_{NA}$) para las fechas estudiadas.

Fecha	m	b	Sensor
24/05/2010	1,0833	0,0108	TM
31/05/2010	1,1143	-0,0149	TM
16/06/2010	1,0986	0,0092	TM
02/07/2010	1,1143	-0,0037	TM
11/07/2010	1,0833	0,0217	TM
18/07/2010	1,1304	-0,0057	TM
30/05/2010	1,1014	0,0068	DMC
30/06/2010	1,2258	-0,0034	DMC
19/07/2010	1,1515	0,0003	DMC

Tabla 2: Ecuaciones de normalización obtenidas para las imágenes TM y DMC estudiadas, $NDVI_{NA}=m \cdot NDVI_{TOA}+b$.

Evaluación del procedimiento aplicado a imágenes TM

La comparación de los valores de $NDVI_{NA}$ respecto a los valores de $NDVI_{BOA}$ (derivados del método de corrección atmosférica absoluta) obtenidos a partir de imágenes TM, Fig. 1, muestra un buen acuerdo para todo el rango de valores. La pendiente de las rectas de regresión obtenidas presentan valores muy cercanos a 1 y la ordenada es inferior a 0.02 en todos los casos tal y como se muestra en la Tabla 3.

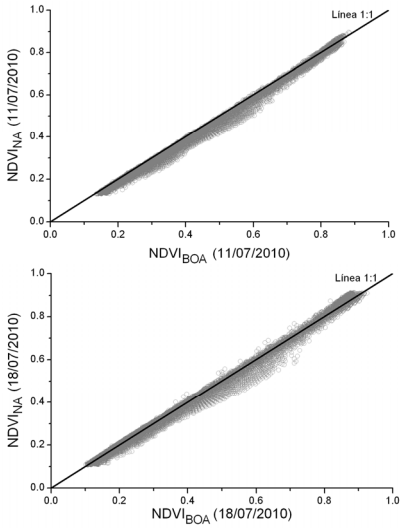


Figura 1: Correlación de los valores de NDVI obtenidos mediante el método de normalización absoluta propuesto y el método de corrección atmosférica absoluta utilizado como referencia.

El acuerdo entre las series de datos, cuantificado mediante el error cuadrático medio (RMSE), Tabla 3, indica que el método propuesto puede considerarse equivalente al método de corrección atmosférica absoluta utilizado en la evaluación.

Fecha	Pendiente	Ordenada	RMSE
24/05/2010	0,985	-0,007	0,025
31/05/2010	0,980	0,020	0,022
16/06/2010	0,985	-0,013	0,024
02/07/2010	0,975	-0,011	0,027
11/07/2010	0,980	0,014	0,023
18/07/2010	0,984	-0,003	0,017

Tabla 3: Pendiente, ordenada en el origen y RMSE de la comparación de $NDVI_{NA}$ frente a $NDVI_{BOA}$ (método de corrección absoluta). ($NDVI_{NA}=pdt \cdot NDVI_{BOA}+ordenada$)

Efecto de la corrección atmosférica absoluta sobre el NDVI

Se ha analizado el efecto del método de corrección atmosférica absoluta aplicado sobre el índice de vegetación NDVI. En el área de estudio y para las cubiertas estudiadas se obtiene una fuerte relación lineal del NDVI TOA respecto al BOA para todas las imágenes estudiadas (r^2>0.99). Asimismo el acuerdo obtenido a partir de la comparación $NDVI_{NA}$ frente a $NDVI_{BOA}$ indican que la aplicación de una ecuación lineal de normalización es válida para el rango de índices de vegetación analizado.

Evaluación del procedimiento aplicado a imágenes DMC

El proceso de normalización propuesto se aplica a la serie de imágenes DMC utilizada. En este caso no es posible comparar los resultados con el método de corrección absoluta utilizado para TM. Pero se analiza la capacidad de la serie multisensor para describir la evolución de la vegetación.

El procedimiento aplicado permite describir la evolución de la vegetación a partir de los sensores estudiados, obteniendo valores comparables y compensando el efecto de la atmósfera en toda la serie temporal estudiada. En la Figura 2 se muestra la evolución de 2 de los píxeles estudiados que corresponden a zonas de cultivo de regadío de primavera (tipo trigo) y cultivo de regadío de verano (tipo maíz) utilizando los sensores TM y DMC. El acuerdo obtenido en las evoluciones de las cubiertas descritas a partir de ambos sensores indica la validez del método de normalización empleado e indica la posibilidad de utilizar el método propuesto en la obtención de series multitemporales y multisensor.

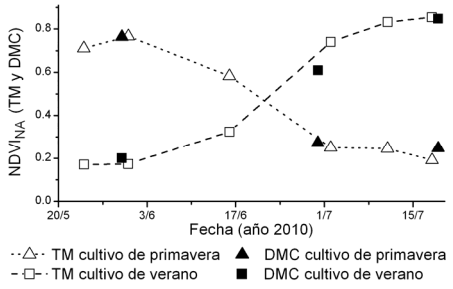


Figura 2: Evolución de 2 de los píxeles estudiados durante toda la serie temporal analizada.

CONCLUSIONES

El método de normalización absoluta presentado se muestra como un método de corrección válido que además permite la comparación de imágenes de múltiples sensores. Su aplicación requiere del conocimiento del área de estudio, dinámica de las cubiertas vegetales presentes y respuesta radiométrica de las mismas. A pesar de que los patrones utilizados en este estudio no pueden ser directamente extrapolados a otras áreas, la metodología desarrollada es fácilmente aplicable, pero se requiere su comprobación y validación previas.

BIBLIOGRAFÍA

CHEN, X., VIERLING, L. and DEERING, D., 2005. *A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time*. Remote Sensing of Environment, 98: 63-79.

GUANTER, L., ESTELLÉS, V. and MORENO, J., 2007. *Spectral calibration and atmospheric correction of ultra-fine spectral and spatial resolution remote sensing data. Application to CASI-1500 data.* Remote Sensing of Environment, 109: 54-65.

SCHROEDER, T.A., COHEN, W.B., SONG, C., CANTY, M.J. and YANG, Z., 2006. *Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon.* Remote Sensing of Environment, 103: 16-26.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos SIRIUS (Sustainable Irrigation water management and River-basin governance: Implementing User-driven Services) y EBHE (Evapotranpiración, Balance Hídrico y Estrés) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, España, CGL2008-04047. Las imágenes DMC han sido obtenidas en el marco del convenio ERMOT y las imágenes TM utilizadas han sido facilitadas por el Plan Nacional de Teledetección, Instituto Geográfico Nacional.

Procedimiento simplificado para la caracterización de la textura a nivel de parcela catastral mediante los parámetros de Haralick

R. Ciriza [1], M. González-Audícana [2] y L.Albizua [1]

[1] TRACASA. Cabárceno, 6. 31621. Sarriguren. Navarra. Correo electrónico: rciriza@tracasa.es

[2] Área de Ingeniería Agroforestal. Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía. 31006. Pamplona.

RESUMEN

Los parámetros de Haralick derivados de la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris (MCNG) son, probablemente, los más utilizados para caracterizar la textura de cubiertas agrícolas con el objeto de inventariar la superficie ocupada por las mismas. El cálculo de esta matriz a nivel de parcela catastral resulta complejo, pues cada parcela tiene forma y tamaño diferentes. En este trabajo, se presenta un procedimiento simplificado que permite caracterizar la textura a nivel de parcela catastral, mediante dichos parámetros, aplicable utilizando cualquier software de procesamiento de imágenes que tenga un modulo de cálculo de texturas a través de ventanas móviles.

Palabras clave: teledetección, textura, a nivel de parcela, Haralick.

ABSTRACT

Haralick parameters derived from the co-occurrence matrix of gray levels (MCNG) are, probably, the most used parameters to characterize the texture of agricultural covers, in order to inventory the area occupied by them. The calculation of this matrix at per-field level is complex because each parcel has a different shape and size. In this paper, we present a simplified procedure to characterize the texture at per-field level, using those parameters, applicable with any image processing software having a texture extraction module based on moving windows.

Keywords: *remote sensing, texture, parcel level, Haralick.*

INTRODUCCIÓN

El aumento de la resolución espacial en las imágenes captadas por sensores óptico electrónicos implica, en muchos casos, un aumento en la dificultad de la definición de la firma espectral de una cubierta vegetal en su conjunto. Al trabajar con cubiertas estructuradas a una resolución espacial media (como la de SPOT 5 o Landsat TM), la información recogida por los píxeles es mixta, es decir, no pertenece a una sola cubierta. La firma espectral de una cubierta vegetal de este tipo, como por ejemplo una viña, lleva asociada a su definición la porción realmente correspondiente a cepas y la porción de suelo desnudo entre-hileras. El aumento de la resolución espacial permite incrementar el número de píxeles puros, de modo que la firma espectral de éstos deja de hacer referencia a la cubierta en su conjunto y comienza representar a los componentes de la misma. Es entonces, cuando cobran importancia las técnicas que consideran la parcela, y los píxeles que la componen en su conjunto, como unidad elemental de estudio.

Trabajar *a nivel de parcela*, implica segmentar una imagen ráster con el objetivo de crear agrupaciones de píxeles, u objetos, con significado físico (Blaschke et al., 2000), en este caso, parcelas catastrales. Segmentar permite caracterizar cada parcela en función de multitud de parámetros. Además de la información espectral, puede extraerse información inherente al hecho de que un objeto esta formado por grupos de píxeles con distintos ND que siguen patrones de comportamiento concretos como, por ejemplo, la textura.

El estudio de la textura proporciona información sobre la distribución espacial de estas variaciones de tono de una imagen. En el ámbito de la agricultura, su utilización resulta especialmente interesante, ya que ayuda a discriminar cultivos vegetales espectralmente similares. Desde el punto de vista estadístico, el estudio de la textura se centra en el análisis de la distribución espacial de los niveles de gris. Este enfoque se basa en la identificación de parámetros que diferencien y cuantifiquen los patrones de

variación que caracterizan a un grupo de píxeles y que describan la interdependencia, o co-ocurrencia, existente entre los mismos. Los métodos de análisis de texturas más utilizados se basan en la extracción de parámetros estadísticos de segundo orden a partir de la matriz de co-ocurrencias de niveles de gris (MCNG) (Haralick et al., 1973).

Diferentes autores han ratificado la utilidad de estos parámetros en la discriminación de cubiertas *a nivel de parcela* en áreas de estudio de extensión reducida (Lloyd et al., 2004). Sin embargo, al tratar de implementar estas metodologías a nivel comarcal o regional surgen problemas relacionados con el tiempo de procesamiento que la extracción de este tipo de información requiere. En este trabajo, se propone un procedimiento simplificado para la caracterización de la textura mediante los paramentos derivados de la MCNG, es decir, que implica un menor coste de procesamiento comparado con el procedimiento habitual de caracterización de parámetros de Haralick nivel de parcela catastral.

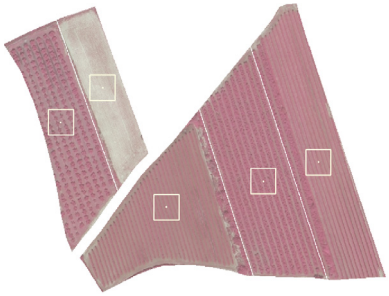


Figura 1: SMR sobre 5 parcelas muestra.

La metodología presentada se basa en que, desde el punto de vista estructural, las texturas que muestran un patrón regular están compuestas por elementos repetidos, dispuestos según reglas de colocación. El tamaño de estos elementos repetidos determina el valor de la superficie mínima representativa de una textura (SMR), es decir, aquella que se precisa para que un conjunto de píxeles siga un patrón concreto, cuantificable y estable. En este trabajo se ha determinado el valor de la SMR para la clase de cubierta Frutal.

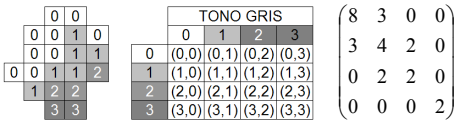


Figura 2: a) Parcela ejemplo, b) MCNG genérica, c) MCNG para la relación espacial 0º.

A continuación, se muestra cómo utilizar esta información para simplificar el cálculo de los parámetros derivados de la MCNG. Posteriormente, se comparan en dos municipios piloto de Navarra, el valor de estos parámetros obtenidos considerando todos los píxeles que componen la parcela, a nivel de parcela catastral, o únicamente los definidos por la SMR, a nivel de SMR.

INFORMACIÓN DE PARTIDA

Para realizar este estudio se recurre a 313 parcelas situadas en los municipios piloto de de Fontellas y Sartaguda. Para ello, se utiliza la banda IRcλ ([675 – 850]µm) de la ortofoto Navarra 2008 (E 1:5.000) a 0,5m de resolución y el Registro de Frutales de Navarra de 2006.

PARÁMETROS DE HARALICK A NIVEL DE PARCELA CATASTRAL

Como ya se ha comentado anteriormente, uno de los métodos más utilizados para medir matemáticamente la textura, es aquel que se basa en la extracción de parámetros estadísticos de segundo orden obtenidos a partir de la Matriz de Co-ocurrencia de Niveles de Gris (MCNG). La MCNG, es un resumen de la forma en la que los valores de los píxeles ocurren al lado de otro valor dentro de un objeto o parcela. Generar esta matriz para cada parcela es complicado y costoso debido a que cada una de ellas tiene un tamaño y una forma diferentes.

La MCNG se genera considerando la relación espacial entre pares de píxeles situados a una distancia *d*, llamados píxel de referencia y píxel vecino, de una parcela. Existe una matriz de co-ocurrencia diferente para cada relación espacial, según se considere el vecino situado en posición horizontal (0º), el vertical (90º) o en ambas diagonales (45º y 135º). En la figura 2 se presenta una parcela donde los ND de los píxeles varían entre 0 y 3, y su correspondiente matriz de co-ocurrencia para la relación espacial 0º. Si se considera la relación espacial 0º y una distancia d=1, el elemento en la posición (2,1) de la matiz indica el número de veces que dos píxeles con valores de gris 2 y 1 coinciden horizontalmente de manera adyacente. Para determinar este valor, se cuenta el número de pares de píxeles de la parcela en los que píxel de referencia sea 2, y el píxel vecino sea 1.

Considerando la dificultad que implica programar el cálculo de la matriz de co-ocurren-

cia para parcelas de diferente tamaño y forma, se plantea la siguiente cuestión ¿Es posible utilizar una parte de la parcela, igual en forma y tamaño para todas ellas, sin perder información? Simplificar la forma de la parcela y reducir el área de cálculo a una superficie representativa mínima (SRM), facilitaría procesos que consideran grandes volúmenes de información, como la actualización de bases de datos agrícolas.

DETERMINACIÓN DE SMR

Existen diferentes herramientas geo-estadísticas que permiten describir el patrón y la escala de distribución de una variable espacial. En concreto, el semivariograma, explica como cambia la semivarianza entre observaciones con la distancia. Desde el punto de vista geo-estadístico, la textura, es decir, la distribución de ND de una imagen, puede considerarse una variable espacial (Corburn et al., 2004), lo que permite la utilización del semivariograma para el estudio de la misma. En una imagen, el semivariograma se estima como:

$$\gamma = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \qquad (1)$$

siendo *Z(x)* el valor del ND de la imagen en un píxel localizado en *x*, *Z(x+h)* el valor de ND en un píxel distante *h* del anterior y *N(h)* el número de pares de datos separados por una distancia *h*.

Normalmente, el semivariograma es una función monótona creciente, que alcanza un límite, denominado meseta, equivalente a la semivarianza muestral. La meseta se alcanza para un valor *h* conocido como rango o alcance. Sin embargo, no todos los semivariogramas alcanzan una meseta, es decir, no siempre la semivarianza entre dos píxeles aumenta hasta alcanzar un máximo estable. Si la imagen presenta una textura periódica o regular, el semivariograma presentará un patrón cíclico. Partiendo de la apariencia cíclica de este tipo de semivariograma, es posible establecer características cuantitativas del patrón estructural de la textura de la imagen, la distancia entre estructuras repetidas o la regularidad de los patrones (Balaguer et al., 2010). Esta relación existente entre el semivariograma y las propiedades estructurales de la textura de una imagen, ayuda a definir la superficie mínima representativa de una textura (SMR), es decir aquella que se precisa para que un conjunto de píxeles siga un patrón concreto, cuantificable y estable.

En esta fase del estudio, se define la unidad mínima representativa de la textura propia de la clase *Frutal.* Para realizar este estudio se han tomado muestras de diferentes tamaños en una parcela representativa de la clase *Frutal* y se ha calculado el semivariograma experimental para cada una de ellas.

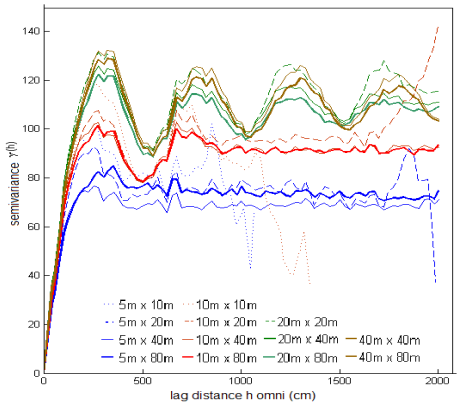


Figura 3: Semivariograma experimental omnidireccional para superficies de diferente tamaño.

En la Figura 3 se muestra como varía el semivariograma experimental omnidirecciónal al modificar el tamaño del recinto sobre el que se calcula. Al aumentar el tamaño de la parcela la forma del semivariograma varía, aproximándose al perfil sinusoidal característico de las texturas periódicas. Las muestras de 5m de anchura muestran un semivariograma con apenas efecto agujero. A partir de los 10m de anchura este efecto comienza a distinguirse, acentuándose al crecer el tamaño de la superficie. Analizando la figura, se escoge la muestra de 20x20m como SMR de la textura de la clase *Frutal.*

PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS TEXTURALES BASADOS EN LA MCNG

Este procedimiento consiste en sustituir cada parcela por una ventana, colocada sobre el centroide de cada una de ellas, de lado igual a la SMR. La caracterización de la textura se simplifica, ya que únicamente se calcula para estas unidades básicas, todas de igual tamaño, independientemente de la forma y la dimensión de las parcelas catastrales. Esta simplificación puede llevarse a cabo en gran parte de los paquetes de tratamiento de imágenes digitales.

ESTUDIO COMPARATIVO

Una vez calculados los parámetros textuales mediante los dos procedimientos, a *nivel de parcela* catastral y a *nivel de SMR* utilizando software específico de tratamiento de la imagen a nivel de objeto, se cuantifica el grado de relación lineal entre los mismos. Se calculan: homogeneidad (HOM), entropía (ENT), media (MEAN) y segundo momento angular (ASM).

Con el fin de estudiar gráficamente la relación cualitativa existente entre todos los parámetros, se realiza un *Análisis de Componentes Principales* categórico *(ACP)*. Posteriormente, para cuantificar el grado de relación lineal entre los parámetros calculados por estos dos procedimientos, se utilizan los coeficientes de correlación de *Pearson (r) o Spearman (ρ),* según los parámetros sigan o no una distribución normal. Para analizar su significación, se contrasta la hipótesis nula de que el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es cero.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el gráfico de saturaciones (Figura 4) que definen la CP1 y la CP2, se observa que los parámetros calculados nivel de parcela y los extraídos a nivel de SMR, se sitúan en posiciones muy cercanas, lo que indica alta correlación.

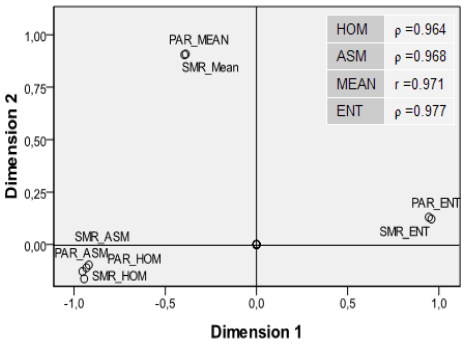


Figura 4: ACP categórico y coeficientes *r* y *ρ*

Los parámetros calculados a nivel de parcela y los extraídos a nivel de SMR presentan correlaciones superiores a 0.95, lo que corrobora la fuerte relación observada en el gráfico de saturaciones. Estas altas correlaciones, analizadas sobre más de 300 parcelas de área media de entre 1 y 2 ha, indican que los descriptores calculados a nivel de SMR aportan el mismo tipo de información que los extraídos a nivel de parcela catastral. Todas las correlaciones son significativas al 99%, lo que muestra que la relación observada no es fruto del azar. Esto implica que es posible caracterizar la textura de parcelas de *Frutal,* utilizando únicamente una SMR de 20x20m. Calcular los parámetros de textura basados en la MCNG en una ventana, simplifica el procedimiento de caracterización de la textura de una parcela, siendo éste aplicable utilizando cualquier software de procesamiento de imágenes que tenga un modulo de cálculo de texturas a través de ventanas móviles.

BIBLIOGRAFÍA

BALAGUER, A., RUIZ, L. A., HERMOSILLA, T. AND RECIO, J. A. (2010). *Definition of a comprehensive set of texture semivariogram features and their evaluation for object-oriented image classification.* Comput. and Geosci. 36(2): 231-240.

BLASCHKE, T., LANG, S., LORUP, E., STROBL, J., ZEIL, P., (2000). *Object- oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications.* Environmental Information for Planning. Vol. II. pp. 555– 570

COBURN, C. A. AND ROBERTS, A. C. B. (2004). *A multiscale texture analysis procedure for* improved forest stand classification. Int. J. of Remote Sensing 25(20): 4287-4308.

HARALICK, R. M., SHANMUGA.K AND DINSTEIN, I. (1973). *Textural features for image classification*. IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern., SMC-3 (6): 610-621.

LLOYD, C.D., BERBEROGLU, S., CURRAN, P.J. AND ATKINSON P.M. (2004). *A comparison of texture measures for the per-field classification of Mediterranean land cover Int*. J. of Remote Sensing 25 (19):3943-3965.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido subvencionado por el INIA.

Modelo operativo para estimar la Productividad Primaria Neta de pastizales y pasturas a escala regional (Argentina)

P.M. Cristiano[1], G. Posse[2] y C.M. Di Bella[12]

[1] CONICET (Buenos Aires, Argentina). Correo electrónico: pcristiano@cnia.inta.gov.ar

[2] INTA, Instituto de Clima y Agua. Los Reseros y Las cabañas s/n, Hurlingham (1686) (Buenos Aires, Argentina).

RESUMEN

En este trabajo se propone un modelo operativo para estimar la Productividad Primaria Neta aérea (PPNA) de pastizales y pasturas a escala regional en la Llanura Pampeana (Argentina) tomando en cuenta los factores de estrés hídrico y nutricional. La PPNA se estimó mediante el modelo de Eficiencias utilizando imágenes mensuales de NDVI (MODIS), mapas de Irradiación Solar global media y una cartografía de síntesis de Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) según las condiciones hídricas y nutricionales edáficas. El nivel de ajuste entre la PPNA estimada y los datos de campo fue bajo, el modelo sobreestimó los valores observados a bajas productividades mientras que la subestimaron a altas productividades. Sin embargo cuando fue comparado con otros 2 set de datos, la estimación de la PPNA presentó mayores niveles de ajuste cuando se realizó con el mapa de EUR variable que con una EUR fija que es lo propuesto por el método tradicional.

Palabras clave: Productividad Primaria, pastizales, eficiencia.

ABSTRACT

This paper proposes a method to estimate aboveground Net Primary Productivity (ANPP) of grasslands and pastures at the regional level in the Pampas (Argentina) taking into account water stress and soil nutrition factors. ANPP was estimated by the efficiency model using monthly NDVI images (MODIS), mean global solar irradiation maps and a synthesis mapping of Radiation Use Efficiency (RUE) taking into account water and nutritional soil conditions. The level of fit between estimated ANPP and field data was low; the model overestimated the observed values at low productivity while the high productivity was underestimated. However, when it was compared with other 2 sets of data, the estimation of ANPP had higher levels of adjustment when a map of variable RUE was used than with fixed RUE that is suggested by the traditional method.

Keywords: *Primary Productivity, grassland, efficiency*.

INTRODUCCIÓN

El modelo de Eficiencias desarrollado por Kumar & Monteith (1982) permite estimar la Productividad Primaria Neta (PPN) a escala regional utilizando información satelital. Este modelo relaciona directamente la PPN con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (APAR) y la eficiencia en su utilización (EUR). El APAR puede descomponerse en la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR) y la fracción de esa energía que es interceptada por el canopeo (fPAR). Es posible estimar el fPAR utilizando información remota a través del NDVI. El modelo queda entonces definido como (1):

$$PPN \equiv EUR * \int_t APAR \equiv EUR * \int_t fPAR * PAR \quad (1)$$

Sin embargo, la utilización de este modelo resulta más imprecisa cuando las condiciones de crecimiento de la vegetación son subóptimas ya que los componentes de la ecuación (principalmente la EUR) pueden sufrir alteraciones. Los pastizales naturales de la Llanura Pampeana ocupan en la actualidad áreas marginales, cuyos suelos están sometidos a algún tipo de limitación. La actividad ganadera se encuentra actualmente centrada en este tipo de áreas y depende fundamentalmente de la producción del forraje. Por ello, la dinámica

de la PPNA es un componente fundamental en los sistemas pastoriles para la toma de decisiones en cuanto al manejo de los recursos forrajeros. Con el fin de proporcionar una herramienta útil en el cálculo de los balances forrajeros, el objetivo fue proponer un modelo operativo para estimar la PPN aérea (PPNA) de pastizales y pasturas a escala regional en la Llanura Pampeana (Argentina) mediante el modelo de eficiencias, tomando en cuenta los factores de estrés hídrico y nutricional.

INFORMACIÓN DE BASE

Con el fin de caracterizar el déficit hídrico en la región, se utilizaron datos de 34 estaciones meteorológicas para el período 2002-2005 (Tº de superficie, velocidad del viento, humedad relativa, heliofanía efectiva y precipitaciones). Se calcularon la evapotranspiración potencial (ETP) mensual promedio y las precipitaciones acumuladas mensualmente en los 5 años para cada estación. Se realizó un Balance Hidrológico Climático (Hurtado et al. 2007) utilizando la ETP mensual, las precipitaciones mensuales y la capacidad de campo de los suelos (fijada en 220) como variables de entrada que se acumularon para dos períodos del año (biestacional): otoño-invierno (abril a septiembre) y primavera-verano (octubre a marzo). Con las variables biestacionales de salida para cada localidad y los dos períodos (Déficit y Exceso de agua) se calculó el Índice Hídrico de Thornthwaite (IHT, 1948) que permite realizar una caracterización, desde una perspectiva geográfica, en base al clima, la capacidad de retención de agua de los suelos y la hidrología. Se interpolaron los datos puntuales del IHT con el método geoestadístico de interpolación espacial de Kriging (Ordinario) (Fortin & Dale, 2007). El IHT permitió delimitar la zona según las condiciones de humedad en suelo en dos clases: Seco (IHT<0) y Húmedo (IHT >0).

Para caracterizar la fertilidad de los suelos, se utilizó el Atlas de Suelos de la República Argentina (Instituto de Suelos, INTA, 1990) que posee una resolución espacial de 1: 50000. El área de estudio incluye 5 de los 8 órdenes propuestos para el país que se agruparon en 2 categorías en base a su contenido de materia orgánica, íntimamente relacionada con la fertilidad: buena calidad (Molisoles y Alfisoles) y baja calidad (Vertisoles, Entisoles y Aridisoles).

Para obtener las variables del componente radiativo de la ecuación 1, se utilizaron los productos del promedio diario de radiación global (W/m^2) para cada mes del período 2005-2007 realizados por el INPE (Brasil, resolución espacial de 16 km^2 y temporal de 8 días). Estos mapas mensuales se convirtieron a PAR acumulado mensual (en MJ/m^2) (Akmal & Jansen 2004). Por otro lado, se utilizaron dos escenas que abarcan la región de estudio del producto NDVI del sensor MODIS (MOD13Q1, h12v12 y h13v12) con una resolución espacial de 250 x 250 m y temporal de 16 días. Se seleccionó el máximo NDVI de las dos quincenas correspondientes a cada mes con el fin de evitar la interferencia atmosférica.

INFORMACIÓN DE SÍNTESIS

Se calcularon los valores de fPAR a partir de los datos de NDVI mensual mediante el método no lineal (Potter et al. 1993). Multiplicando las cartografías de PAR acumulado mensual y de $fPAR_{(NDVI)}$ mensual se calculó el APAR acumulado mensual para los años 2005-2007. Los productos de las condiciones hídricas (IHT) de la región y las condiciones nutricionales edáficas se combinaron para generar un producto de síntesis para los dos períodos del año para los cuales se caracterizó la región: otoño-invierno y primavera-verano. La resultante fue un mapa con 4 categorías: N1W1, N0W1, N1W0 y N0W0 donde N es fertilidad, W disponibilidad hídrica, 1 representa alta condición y 0 baja condición. A cada una de estas categorías le fue asignado un valor de EUR basada en datos obtenidos experimentalmente sobre el efecto que ambos factores de estrés (hídrico y nutricional) produjeron en la eficiencia máxima (N1W1) de 4 especies de gramíneas. Estos porcentajes se aplicaron a una eficiencia óptima (0.48) para pastizales tomada de bibliografía (Tesis doctoral Cristiano 2010, Tabla 1).

Categoría	EUR (g/MJ)
N1W1	0.48 (100%)
N1W0	0.34 (71%)
N0W1	0.32 (67%)
N0W0	0.26 (55%)

Tabla 1: Valores de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) utilizados para estimar la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) y los porcentajes aplicados a la EUR óptima (0.48). N: fertilidad, W: disponibilidad hídrica, 1: alta condición y 0: baja condición.

METODOLOGÍA Y VALIDACIÓN

Se estimó la PPNA mensual, estacional y anual para los años 2005-2007 a partir de los mapas de APAR acumulado mensual y de la EUR como lo indica la ecuación 1. La PPNA estimada con nuestro modelo EUR variable para el año 2005 fue comparada con la PPNA obtenida con el modelo tradicional de Kumar & Monteith (1982) que propone utilizar una EUR fija (en este caso, 0.48 g/MJ). Ambos modelos se validaron contra tres set de datos independientes mediante regresiones lineales simples donde se analizaron los coeficientes de determinación (R^2) y las pendientes:

- PPNA observada a campo ($PPNA_{campo}$): los datos fueron estimados con el método de cosechas sucesivas para las cuatro estaciones del año 2005 en 3 sitios con pasturas de diferente composición específica.
- PPNA estimada con el modelo de precipitaciones de Sala et al. (1988) (PPNApp): relaciona linealmente la PPNA con las precipitaciones acumuladas (PP). Se utilizaron los datos mensuales de precipitaciones de 27 estaciones meteorológicas y se calculó la PPNA mensual (en kg/ha) para el año 2005.
- PPNA estimada extraída de la cartografía de Imhoff et al. (2004) ($PPNA_{CASA}$): brinda valores mundiales de PPN total (aérea + subterránea, PPNT) estimada a través del modelo CASA. Se extrajeron los datos de PPNT en $gC/480km^2$año de las mismas 27 localidades del ítem anterior y se transformaron a valores de PPNA en $kg/480km^2$año asumiendo que el 50% de la biomasa corresponde a carbono y que de la biomasa total, el 50% corresponde a material aéreo y 50% a subterráneo.

RESULTADOS

En otoño-invierno (Figura 1a), el 7% de la región de estudio correspondió a los suelos nutricionalmente pobres y con deficiencias hídricas (N0W0). Los suelos ricos en nutrientes pero deficientes en agua correspondieron a un 26% (N1W0) mientras que la situación inversa representó un 8% (óptimas condiciones hídricas pero con deficiencias nutricionales, N0W1). Los suelos con óptimas condiciones hídricas y nutricionales representaron un 59% de la superficie total (N1W1). En primavera-verano (Figura 1b), la incidencia de estrés hídrico aumentó a un 66% (N1W0) y 13% (N0W0). Los suelos que permanecieron con buenas condiciones hídricas fueron del 20%, un 18% con alta calidad nutricional (N1W1) y un 2% con baja calidad nutricional (N0W1).

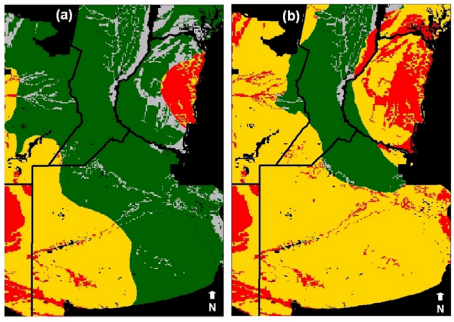


Figura 1: Condiciones ambientales en función de las características hídricas y nutricionales en la Región Pampeana. Período 2002-2005. (a) Otoño-Invierno, (b) Primavera-Verano. N1W1 (verde), N1W0 (amarillo), N0W1 (gris) y N0W0 (rojo). N: fertilidad, W: disponibilidad hídrica, 1: alta condición, 0: baja condición.

La PPNA mensual estimada varió estacionalmente según el patrón de las condiciones ambientales para cada período del año. Los mayores valores se hallaron en primavera-verano en el centro-norte de la región alcanzando valores de entre los 1000 a 1800 kg/ha mes. En otoño-invierno, los valores fueron menores, alcanzando como máxima PPNA valores entre los 300 a 1000 kg/ha mes al noreste de la región. La PPNA anual para el año 2005 fue menor en el suroeste de la región no superando los 5800 kg/ha año. Hacia el noreste, la PPNA fue aumentando hasta alcanzar valores de 14500 kg/ha año en algunas zonas de Buenos Aires, Santa Fe y Entre Ríos. Este patrón espacial se presento también para los años 2006 y 2007.

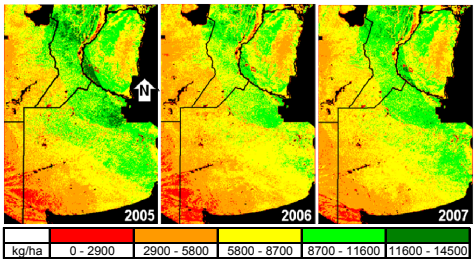


Figura 2: Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) anual (kg/ha) para los años 2005 a 2007 estimada con el modelo de Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) variable.

El nivel de ajuste entre la PPNA estimada y la PPNAcampo fue bajo con ambos modelos: EUR variable (R^2=0.25) y EUR fija (R^2=0.30), sobreestimando los valores observados a bajas productividades y subestimando a altas producciones de biomasa. No se encontraron diferencias significativas entre las pendientes de ambos modelos. Cuando la PPNA estimada con la EUR variable se comparó con la PPNA obtenida del modelo de Sala et al. (1998) (PPNApp) se observó un mayor nivel de ajuste (R^2=0.52) en relación a aquel que utiliza una EUR fija (R^2=0.35). Con ambos modelos la PPNA fue sobrestimada en, por lo menos, un 50%. Finalmente, cuando la estimación de la PPNA de ambos modelos de EUR (variable y fija) se compararon con la PPNA estimada por el modelo CASA, también se observaron mayores niveles de ajuste utilizando la EUR variable (R^2=0.45 para EUR variable y 0.19 para EUR fija). En este caso, la PPNA fue subestimada con ambos modelos.

CONCLUSIONES

El método obtuvo un bajo nivel de ajuste al comparar las estimaciones con los valores de productividad observados a campo. Esto pudo deberse a que los sitios utilizados se encuentran en las mismas categorías de estrés (N1W0 y N1W1). Esto indica que la cantidad de sitios con datos observados a campo de PPNA fueron escasos y no reflejaron la variabilidad requerida en las condiciones ambientales para realizar una validación apropiada. Cuando se utilizaron datos que abarcaron todas las condiciones ambientales de la región (estimaciones de PPNA obtenidos por el modelo CASA y por el modelo de precipitaciones), el nivel de ajuste aumentó notablemente y en ambos casos, el nivel de ajuste fue mayor utilizando una EUR variable de acuerdo a las condiciones ambientales. Sin embargo, creemos que es necesario realizar una validación apropiada del modelo utilizando más datos de PPNA de campo que abarquen toda la gama de condiciones ambientales estudiadas.

BIBLIOGRAFÍA

AKMAL, M. & JANSSENS, M.J.J. 2004. *Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies*. Field Crops Research 88: 143-155.

ATLAS DE SUELOS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA en CD-Rom. 1995. Instituto de Suelos CIRN/INTA, AEROTERRA, Fundación ArgenINTA, Buenos Aires.

CRISTIANO, P.M. Tesis doctoral: *Estimación de la Productividad Primaria mediante el Modelo de Eficiencias y Sensores Remotos*. Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Marzo 2010.

FORTIN, M.J. & DALE, M. 2007. *Spatial Analysis. A Guide for ecologist*. Cambridge University Press. UK. Pp 165-173.

HURTADO, R. H., FERNÁNDEZ LONG, M. E., BARBERIS, G. & BOMBELLI, E. 2007. Programas de Aplicación en Agroclimatología en CD-ROM. Editorial Facultad de Agronomía, ISBN 978-950-29-0984-4.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales de Brasil), Radiação Solar e Terrestre, Solar Global, Médias mensais, http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/#. Agosto 2009

IMHOFF, M.L., BOUNOUA, L., RICKETTS, T., LOUCKS, C., HARRISS, R. & LAWRENCE, W.T. 2004. *Global patterns in human consumption of net primary production*. Nature, 429: 870-873.

KUMAR, M. & MONTEITH, J.L. 1982. *Remote sensing of crop growth*. En: Plants and the daylight spectrum, pp. 133–144. H. Smith, Ed. Academic Press, London.

POTTER, C., RANDERSON, J. FIELD, C. MATSON, P. VITOUSEK, P. MOONEY H. & KLOOSTER, S. 1993. *Terrestrial ecosystem production-a process model based on global satellite and surface data*. Global Biogeochemical Cycles, 7: 811-841.

SALA, O.E., PARTON W.J., JOYCE, L.A. & LAUENROTH, W.K. 1988. *Primary Production of the Central Grassland Region of the United States*. Ecology, 69(1): 40-45.

THORNTHWAITE, C.W. 1948. *An approach toward a radiation classification of climate*, Geographical Review, 38(1): 55-94.

Validación de algoritmos científicos para el GPP de SEOSAT/Ingenio

Eduardo de Miguel[1], Raúl Valenzuela[2], Teodoro Bernardino[2], Verena Rodríguez[2], Alberto Pizarro[3], Diana de Miguel[3] y Cristina Robles[4]

[1] Área de Teledetección, INTA. Cta. de Ajalvir s/n. 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid (España). Correo electrónico: demiguel@inta.es

[2] GMV Aerospace and Defence, S.A.U. C/ Isaac Newton, 11. P.T.M. Tres Cantos, 28760 Madrid (España).

[3] Astrium-CASA Espacio. Avenida de Aragón 404, 28022, Madrid (España).

[4] INSA Ingeniería y Servicios Aeroespaciales, S.A. Pº Pintor Rosales, 34, 28008, Madrid (España)

RESUMEN

Dentro del desarrollo de la misión española de observación de la Tierra SEOSAT/Ingenio, se ha identificado la necesidad de implementar un prototipo del procesador de imágenes en tierra (Ground Processor Prototype, GPP). El GPP es parte del End-to-End Image Performance Simulator, y tiene un doble objetivo; por una parte, el análisis de las prestaciones del instrumento durante las fases de desarrollo y verificación en órbita y, por otra, constituirse en la base del procesador de tierra operacional a implementar en el centro de proceso de datos de la carga útil (PDGS). El GPP aborda fundamentalmente la calibración radiométrica y georreferenciación dentro de la cadena de proceso de datos SEOSAT/Ingenio. En esta presentación se resumen los algoritmos validados y sus principales características de interés para los futuros usuarios de la misión Ingenio. Posteriormente se revisan los procedimientos de validación, comentando las principales ideas aportadas a esta tarea y los problemas encontrados, y los principales puntos abiertos tanto en la definición de algoritmos como en su validación.

Palabras clave: Proceso de imágenes, georreferenciación.

ABSTRACT

In the framework of the Spanish Earth Observation mission Ingenio, a Ground Processor Prototype is being developed. This GPP is part of an end-to-end mission simulator, and has a double purpose. First, to be used for mission performance analysis during development and verification phases, and secondly to be the basis for the future operational ground processor, to be implemented within the Payload Data Ground Segment. The GPP main tasks are data ingestion, radiometric calibration, image restoration (denoising and deconvolution), georeferencing/resampling and basic image classification. In this paper the critical scientific algorithms are presented, focusing in the aspects relevant to future users. Next, the validation of the algorithms is presented, discussing the approach and implementation of the validation and the main problems and open points still present.

Keywords:*image processing, geolocation.*

INTRODUCCIÓN

Dentro del programa de desarrollo de la misión española de observación de la Tierra SEOSAT/Ingenio, se ha identificado la necesidad de implementar un prototipo del procesador de imágenes en tierra (Ground Processor Prototype, GPP). El GPP es parte del End-to-End Image Performance Simulator, y tiene un doble objetivo; por una parte, el análisis de las prestaciones del instrumento durante las fases de desarrollo y verificación en órbita y, por otra, constituirse en la base del procesador de tierra operacional a implementar en el centro de proceso de datos de la carga útil (PDGS). El GPP se desarrolla por la empresa GMV bajo contrato y especificación de Astrium-CASA Espacio. El Área de Teledetección del INTA participa en el proyecto asesorando a la industria en la definición de algoritmos científicos y, fundamentalmente, realizando su validación.

El GPP aborda entre otras las siguientes tareas dentro de la cadena de proceso de datos SEOSAT/Ingenio:

- detección de píxeles saturados o defectuosos,
- correcciones radiométricas y calibración,

- restauración de la imagen (reducción de ruido y filtrado para realce de frecuencias altas),
- corregistro entre bandas y entre detectores,
- georreferenciación y obtención de *Rational Polynomial Coefficients* (RPCs),
- clasificación preliminar de las imágenes (*land / sea / bright*),
- generación de *quicklooks*.

CARACTERÍSTICAS DE INGENIO

Para entender los algoritmos elegidos para los procesos anteriores es necesario previamente conocer las características principales de la misión Ingenio.

- Órbita heliosíncrona polar, 678 km altura.
- 4 bandas (MS) en VNIR con 10 m *Ground Sampling Distance* (GSD); 1 banda ancha entre 0.6 y 0.8 micras (PAN), 2.5 m GSD.
- Dos cámaras gemelas en paralelo (separación de 2.34º), FOV ≈2.5º por cámara; 55 km ancho total. Observación nominal nadir ±5º.
- Dos detectores por banda en cada cámara, separados en el plano focal (figura 1).
- MTF@Nyquist mínima = 0.11 (banda PAN).
- Banda PAN con 7 etapas *Time Delayed Integration* (TDI).
- Separación espectral por filtros.
- Digitalización en 12 bits.
- Precisión de apuntamiento sobre el terreno alrededor de 30 m.
- Ecualización y eliminación de corriente oscura a bordo.
- Telemedida científica formada mediante compresión con pérdida.

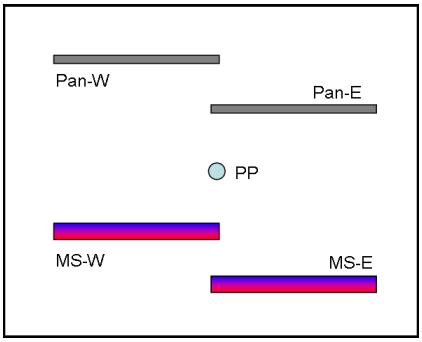


Figura 1: Plano focal de una cámara Ingenio visto desde su parte trasera, con los detectores distribuidos alrededor del punto principal (PP). La separación entre las dos líneas detectoras MS (*East* y *West*) equivale a aproximadamente 4 km en la dirección de avance. La separación MS-PAN es aprox 15 km.

ALGORITMOS DEL GPP

Algoritmos de corrección y calibración radiométrica

El primer paso en el proceso de calibración radiométrica es la detección y manejo de muestras no válidas. En este sentido se han identificado las siguientes categorías:

Missing samples: son píxeles donde no existe medición debido típicamente a problemas con la telemedida.

Bad samples: píxeles con valor incorrecto, y que no pueden ser calibrados. Se incluyen los píxeles saturados, ruidosos e inactivos. Estos dos últimos son normalmente problemas instrumentales crónicos, que por tanto aparecerían sistemáticamente.

Dubious samples: píxeles con un valor potencialmente incorrecto. El caso más normal es el de píxeles cercanos (espectral, espacial o radiométricamente) a una saturación.

Los criterios de manejo propuestos para cada caso son:

-Los *missing samples* no son nominalmente interpolados, ya que si aparecen formarán un bloque extenso. Se sustituirán por un valor "nodata" a definir.

-Los píxeles saturados y dudosos se anotarán en una máscara pero no se modificará su valor.

-Los píxeles ruidoso/muertos serán sustituidos por interpolación entre sus vecinos *across-track*, excepto si hay más de "N" (a definir) píxeles adyacentes.

El problema principal que debe considerarse aquí es el efecto de la compresión, que puede extender el criterio de píxel dudoso a todo píxel cuyo valor comprimido pueda estar afectado por un píxel defectuoso. Este análisis está por realizar.

El siguiente paso incluye la eliminación de componentes de la señal generados en el propio instrumento, agrupados en el término corriente oscura.

En la calibración radiométrica se siguen modelos rigurosos de la generación de la señal. El punto crítico aquí es la adopción de un método bilineal para considerar el efecto de la dependencia de la responsividad del píxel con el nivel de señal. Este modelo bilineal debe considerarse con cuidado a la hora de determinar y aplicar los coeficientes de calibración absoluta.

Otro aspecto a valorar es el del efecto de la posible luz parásita (*straylight*) en la imagen. Los modelos de *straylight* elaborados para Ingenio parecen confirmar un valor despreciable, pero si no fuera así, los requisitos radiométricos impuestos forzarían la necesidad de un algoritmo para eliminarla; dicho algoritmo no se ha considerado en esta fase del proyecto.

La validación de estos algoritmos se realiza inicialmente mediante análisis.

Algoritmos de restauración de la imagen

La baja MTF del sistema PAN sugiere el uso de un algoritmo de restauración, es decir intentar deshacer el severo efecto de suavizado espacial inducido por el sistema electro-óptico. Un algoritmo de este tipo amplifica el ruido, por lo que es recomendable aplicar un algoritmo de reducción de ruido previamente. Por precaución, ambos algoritmos se han previsto también para las imágenes MS.

Los algoritmos propuestos para estos procesos son:

- transformada *wavelet* con umbrales multiescala para la reducción de ruido,
- filtrado inverso mediante una matriz de deconvolución para recuperación del contraste.

Estos algoritmos están actualmente en proceso de implementación en el GPP, lo que implica ajustar su configuración y manejar adecuadamente los puntos problemáticos, especialmente los bordes de la imagen.

Para validar el algoritmo de reducción de ruido se siguen dos criterios:

- Evaluar el algoritmo en sí, cuantificando la disminución de ruido conforme al requisito de Ingenio, estimando la posible pérdida de contraste y chequeando (cualitativamente) la aparición de artefactos.

-Comparar los resultados con los obtenidos con algoritmos básicos de reducción de ruido, tanto mediante *wavelets* como otros.

La validación ha demandado la construcción de un modelo riguroso de señal y ruido para cada banda espectral de Ingenio. La implementación de ese modelo como una función MATLAB permite mantenerlo alineado con cualquier cambio en la configuración de las cámaras de Ingenio o en el proceso electrónico de la señal.

Para validar el algoritmo de deconvolución se siguen dos criterios similares a los aplicados en el anterior:

-Evaluar el algoritmo en sí, comparando su resultado numérico (el contraste tras la deconvolución a la frecuencia de Nyquist frente al inicial en la imagen) y la aparición de artefactos; además debe confirmarse que pese al posible incremento de ruido el requisito especificado sigue cumpliéndose.

-Comparar sus resultados con los obtenidos con un algoritmo básico de deconvolución, como es el filtro de Wiener en el espacio de frecuencias.

Georreferenciación

El procedimiento de georreferenciación es el más complejo dentro del GPP, debido a:

-la incertidumbre del apuntamiento, superior a la requerida por los usuarios,

-existencia de varios detectores dentro del plano focal,

-adquisición no síncrona en los diversos detectores.

El procedimiento de georreferenciación consta de los siguientes pasos:

-Filtrado inicial de los ángulos de orientación del satélite para disminuir el impacto del ruido presente en las mediciones del *star-tracker*.

-Geolocalización inicial de cada píxel utilizando un modelo riguroso del instrumento y la información de apuntamiento filtrada.

-Selección automática sobre una imagen de referencia de puntos de control (GCPs) para estimar el error de apuntamiento a lo largo de la escena.

-Cálculo y eliminación del desacoplamiento entre la orientación del satélite y las cámaras debido a deformaciones termoelásticas; este valor se determina a partir del sesgo en los errores de los GCPs y considerando un modelo teórico de deformación.

-Ajuste de los errores residuales en *roll* y *pitch* a una curva continua.

-Geolocalización definitiva con los valores corregidos de los ángulos de orientación.

Opcionalmente, podrá efectuarse un corregistro fino para garantizar la superposición de las diferentes bandas hasta el requisito de 0.1 píxels (0.3 para la banda MS-NIR).

Una vez geolocalizado cada dato por el procedimiento anterior, se genera la imagen remuestreada sobre una malla cartográfica UTM. Este remuestreo se realiza con el GSD nominal (2.5 m ó 10 m) y con un algoritmo *High-order B-spline*.

También se producirá, a partir de la geolocalización definitiva, una imagen "*Perfect Sensor*" similar a la prevista para la misión Pleiades (Baillarin et al, 2010), y se calcularán RPCs para la georreferenciación de ésta por parte de los usuarios interesados en esta opción.

La validación de la georreferenciación se realiza en tres partes.

i) El algoritmo de geolocalización se ha validado utilizando un desarrollo independiente basado en las librerías *Earth Observation* (ESA, 2010). Estas librerías son proporcionadas por la ESA para usuarios que estén interesados en desarrollar programas para el análisis de datos de sus misiones Earth Explorer.

ii) El algoritmo de ajuste por GCPs se valida a su vez en dos fases.

-Se ha validado la capacidad para localizar GCPs utilizando imágenes aeroportadas. La validación ha permitido comprobar la capacidad del algoritmo propuesto para detectar un número suficiente de puntos homólogos en escenas naturales en casos nominales (es decir cuando la deformación entre la imagen a corregir y la de referencia es limitada, y la presencia de nubes es despreciable).

-Se ha validado la capacidad para detectar errores en apuntamiento a partir de los puntos de control.

El algoritmo ha demostrado su capacidad para detectar deformaciones termoelásticas, y corregir el ruido y perturbaciones de los ángulos de orientación incluso con un número limitado de puntos de control.

iii) La generación del modelo de *Perfect Sensor* y de RPCs se validará comparando los resultados que se obtengan con este procedimiento de georreferenciación con aquellos obtenidos con la georreferenciación rigurosa.

Clasificación preliminar de las imágenes

El GPP debe proporcionar una clasificación básica de las imágenes Ingenio. Las categorías definidas son *Bright pixel*, *Land*, *Sea* y *Possible sun glint*. A la hora de acotar sin ambigüedades estas clases es necesario considerar el objetivo de cada una.

Bright pixel es fundamentalmente una máscara de nubes, con el objetivo de reportar una estimación de cobertura nubosa por imagen y de auxiliar a los algoritmos de georreferenciación (que deben evitar las zonas con nubes a la hora de buscar puntos de control). La dificultad de asegurar que los píxeles englobados en esta categoría son efectivamente nubes obliga a una definición menos comprometedora, como es *bright pixel*. El algoritmo para esta máscara está basado en umbrales de reflectancia aparente, lo que es especialmente arriesgado en el caso de que se necesite una máscara autónoma en la banda PAN. La definición precisa y validación del algoritmo para detección de nubes está actualmente en curso

La división *land / sea* está fundamentalmente destinada a alimentar el eventual procesador de nivel 2, que contaría con algoritmos diferentes para tierra y agua. En principio, la pertenencia se decide en base a información geográfica (no radiométrica).

La categoría *possible sun glint* está por confirmar, y se deduciría de la posición relativa entre las direcciones de iluminación y observación.

BIBLIOGRAFÍA

ESA, 2010. *Earth Observation CFI*. http://eop-cfi.esa.int/CFI/eo_cfi_software.html.

MALLAT, S., 1989. *A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation.* IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 11, nº 7, Jul 1989, pp.674:693.

BAILLARIN, S., PANEM, C., LEBEGUE, L., BIGNALET-CAZALET, F., 2010. *Pleiades-HR imaging system: ground processing and products performances*. ISPRS TC VIII symposium. IAPRS, vol XXXVIII, part 7B, pg. 51:55.

AGRADECIMIENTOS

La elaboración y validación de los algoritmos del GPP es el trabajo de un grupo extenso de técnicos en GMV, Astrium-CASA Espacio e INTA, con el soporte continuo de ESA y del CDTI a través del IMAG (Ingenio Mission Advisory Group).

Aplicación de las redes neuronales CGS para optimizar la detección de fuegos en Asturias

S. Delgado[1], E. Martínez[2], A. Arquero[2], C. Gonzalo[2], C. Recondo[3, 4] y A. Abajo[3]

[1] Dpto. de Organización y Estructura de la Información. Escuela Universitaria de Informática, Universidad Politécnica de Madrid. Ctra. de Valencia, Km. 7, 28031, Madrid (España). Correo electrónico: sole@eui.upm

[2] Dpto. de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos. Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid. Campus de Montegancedo s/n. 28660 Boadilla del Monte (Madrid, España).

[3] INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España).

[4] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias, España).

RESUMEN

El modelo Growing Cell Structures (CGS) es un tipo de mapa autoorganizativo (SOM) con una arquitectura dinámica soportada por la inserción y eliminación de neuronas durante el proceso de adaptación de la Red Neuronal Artificial (RNA). En este trabajo se propone una metodología para clasificar imágenes MODIS, basada en el modelo de red neuronal autoorganizativa no supervisada dinámica GCS, orientada para el seguimiento de incendios forestales. Todas las imágenes utilizadas han sido obtenidas en tiempo real por la antena receptora de imágenes MODIS de la Universidad de Oviedo. Los mapas obtenidos finalmente fueron contrastados con la información de alertas térmicas generadas por el producto MOD-14 de la NASA, así como con otro tipo de datos de localización de los incendios.

Palabras clave: redes neuronales CGS, incendios forestales, imágenes MODIS.

ABSTRACT

Growing Cell Structures (GCS) is a SOM (Self-organizing map) model with a dynamic architecture, adding and eliminating neurons during the adaptation process of the artificial neural network (ANN). This paper proposes a methodology to classify MODIS images, based on growing unsupervised self-organizing neural network (GCS), and oriented to monitor forest fires. All images used were obtained in real time by the receiving antenna of MODIS images from the University of Oviedo. Finally obtained maps were contrasted with the thermal alert information generated by the NASA MOD-14 product, as well as other data to locate fires.

Keywords: *Neural network CGS, forest fire, MODIS images.*

INTRODUCCIÓN

La robustez y eficiencia con la que los sistemas de inspiración biológica, como las Redes Naturales Artificiales (RNA), son capaces de procesar información, hacen de éstos un objetivo natural para el análisis de información multiespectral. Este modelo de computación se ha utilizado ampliamente en Teledetección para resolver problemas surgidos en tareas de clasificación temática. En este sentido las RNA supervisadas suelen proporcionar buenos índices de calidad de clasificación temática, aunque este alto grado de precisión sólo se logra con una selección representativa de áreas de la imagen a clasificar y la caracterización correcta de los píxeles a emplear en la fase de aprendizaje. Por otro lado, las RNA no supervisadas presentan como principal ventaja la capacidad de adaptación de la red, sin necesidad de un "tutor" que monitorice el proceso de entrenamiento.

La red neuronal GCS (Growing Cell Structures) (Fritzke, 1994) es un modelo de mapa autoorganizativo y como tal, se engloba dentro de los métodos de clasificación no supervisados

(Delgado *et al*., 2004). Su característica más destacable reside en el crecimiento y en la formación de clusters en la capa de salida de la red durante el proceso de adaptación de la misma (Figura 1).

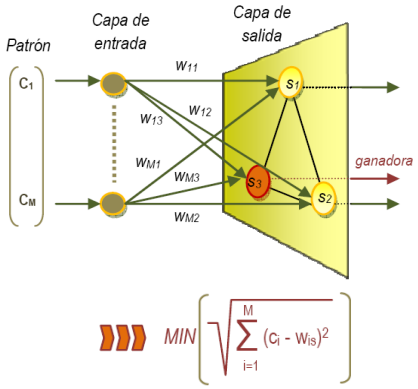


Figura 1: Arquitectura de una red GCS con tres neuronas y con factor k=2.

Este modelo de red puede emplearse como técnica de clasificación de patrones si se somete a la red a una fase de etiquetado posterior a su entrenamiento (Delgado *el al.*, 2008).

En este trabajo se muestra el potencial de las redes GCS en la detección de incendios registrados en imágenes MODIS. Por un lado se comprueba qué tipologías de cubiertas es capaz de discriminar este modelo de red y, por otro, se utiliza como base para el estudio de índices espectrales que discriminen las zonas de la imagen que se corresponden con áreas que se estén quemando del resto de cubiertas.

DATOS DE PARTIDA

Las imágenes multiespectrales utilizadas en este estudio son MODIS, de Asturias, del período comprendido entre 18-22 de marzo de 2009, seleccionadas de acuerdo a la existencia de incendios en esas fechas. Todas las imágenes utilizadas han sido preprocesadas adecuadamente para esta investigación. La imagen (7 bandas ópticas de 500 m de resolución espacial, 163x431 píxeles) de la que se muestran los resultados, es del 22 de marzo a a las 11:18 UTC, obtenida con el satélite Terra.

METODOLOGÍA

Para la fase de entrenamiento de la red, se seleccionan y etiquetan una serie de píxeles de la imagen mediante supervisión de sus firmas espectrales (Tabla 1). Para equilibrar el número de píxeles de cada clase, se unifica el volumen de los mismos clonando los patrones originales hasta conseguir 53 vectores para cada tipo de superficie.

Veg. 1	Veg. 2	Nieve	Urbano	Mixto	Incendio
53	51	49	41	19	8

Tabla 1: Volumen de píxeles seleccionados para seis clases detectadas.

La metodología se basa en cinco fases. En la primera se entrenan dos redes GCS sin eliminación de neuronas, con los criterios de inserción LUPD y LEAE descritos por Delgado *et al*. (2004), finalizando el entrenamiento al conseguir 100 neuronas. En la segunda fase se entrenan de nuevo dos redes GCS con ambos criterios de inserción y con eliminación de neuronas, finalizando el entrenamiento al obtener al menos seis clusters en la capa de salida. Estas dos redes se etiquetan de forma que a todas las neuronas del mismo cluster se les asigna la misma etiqueta genérica c1, c2,... En la tercera fase se clasifica la imagen original completa con las redes etiquetadas, calculando para cada pixel la neurona ganadora y asignándole la etiqueta de ésta. En la cuarta fase se examina el índice espectral más adecuado para detectar incendios, mediante el análisis de los planos de componentes combinados (Delgado *et al*., 2009) de las redes entrenadas en la segunda fase. Finalmente, en la quinta fase se aplica el índice espectral sobre la imagen completa.

RESULTADOS

Como resultado de la primera fase se puede indicar que ambas redes, LUPD y LEAE, identifican con éxito la cubierta incendio que se diferencia claramente de las demás. Respecto al resto de cubiertas, la nieve se distingue sin problemas, aunque las otras cuatro superficies son más difíciles de identificar. En la segunda fase, la red entrenada con criterio LEAE consigue 6 clusters en la capa de salida mientras que LUPD obtiene 7. En esta última, dos de los 7 clusters se corresponderían con la cubierta *mixto*. En la red entrenada con LEAE, dos clusters identifican la cubierta incendio, mientras que para las cubiertas veg1 y veg2 no se ha conseguido un cluster de neuronas para cada una que las discrimine inequívocamente (Figura 2).

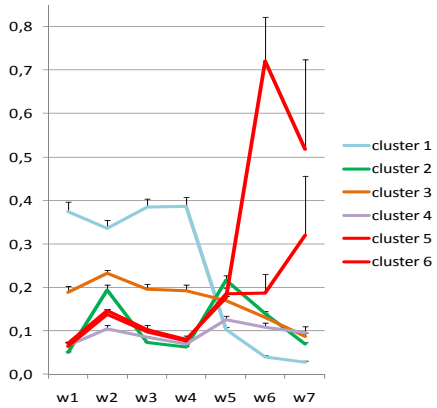


Figura 2: Valor medio y desviación de componentes de los vectores sinápticos por cluster de la red GCS entrenada con LEAE (c1: nieve; c2: veg1 y veg2; c3: mixto; c4: urbano; c5 y c6: incendio).

Como resultado de la tercera fase, en la que se clasifica la imagen completa con las dos redes de la fase previa, solo en el caso de la imagen procesada por la red LEAE se distinguen las zonas de incendios (Figura 3a en color rojo). La localización de dichas zonas coincide en su mayoría con la dada por las alarmas térmicas generadas por el producto MOD-14 de la NASA (15 *hotspots* en el caso de la imagen de ejemplo), así como con la de otro tipo de datos de localización de los incendios.

Utilizando la red GCS entrenada en la fase 2 con criterio LEAE, se pueden crear diversos mapas de componentes combinados. Partiendo de una expresión aritmética que combina uno o más pesos de los vectores sinápticos de la red, en un mapa de componentes combinado se muestra el mapa topográfico de la red, en el que cada neurona aparece del color asociado al valor numérico resultante de aplicar la expresión aritmética a los pesos correspondientes de su vector sináptico. Si todas las neuronas de un cluster aparecen en un tono cálido, será un buen indicador de que la expresión aritmética empleada puede ser un índice espectral adecuado para discriminar el tipo de cubierta a la que identifican las neuronas del cluster. La Figura 3 (b y c) muestra dos de los mapas de componentes combinados generados para esta red GCS, uno de ellos ((b7-b1)/(b7+b1)) capaz de discriminar la cubierta incendio del resto y el otro para discriminar la cubierta nieve.

Se ha aplicado el índice espectral (b7-b1)/(b7+b1) a la imagen completa, dividiendo el rango de valores que toma en cuatro secciones a las que se les ha asociado un color concreto. El rojo claro se corresponde con los valores más altos (incendio), seguido por el rojo, el marrón y finalmente el negro para los más bajos. Como la imagen estaba enmascarada dejando solo visible el territorio correspondiente a Asturias, para aquellos píxeles que tienen las siete bandas espectrales a cero, se les ha asignado el valor más bajo del índice espectral (aparecen en negro). Comparando la imagen clasificada por la red GCS LEAE (Figura 3a) con la obtenida con este índice espectral (Figura 3d), se puede observar que el índice, en principio, identifica más píxeles de incendios que la red.

CONCLUSIONES

La metodología para detección de incendios en imágenes MODIS basada en la utilización de modelos GCS de Redes de Neuronas Artificiales, da buenos resultados en el caso de realizar el entrenamiento con eliminación de neuronas y con criterio de inserción LEAE. Además se ha probado que es posible utilizarlo como base para estudiar el índice espectral más adecuado que permita discriminar las zonas de incendios de la imagen.

BIBLIOGRAFIA

DELGADO, S., GONZALO, C., MARTÍNEZ, E., ARQUERO, A. 2004. *Improvement of self-organizing maps with growing capability for goodness evaluation of multispectral training patterns.* IEEE International Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'04), 1, 564-567.

DELGADO S., GONZALO C., MARTÍNEZ E. Y ARQUERO A. 2008. Encyclopedia of Artificial Intelligence, Chapter: *Growing Self-Organizing Maps for Data Analysis.* (ISBN: 978-1-59904-849-9), IGI Publications, 781-787.

DELGADO S., GONZALO C., MARTÍNEZ E. Y ARQUERO A. 2009. *A graphic analyzer and builder of spectral indexes based on growing SOM*. 2nd South-East European Conference on Computational Mechanics. SEECCM'09. June 22-24. Rhodes, Grecia, 92.

FRITKE, B. 1994. *Growing cell structures- a self-organizing network for unsupervised and supervised learning.* Neural Networks., 7, 1441-1460.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto "Metodología para la elaboración de un sistema de alarmas de incendios en tiempo real a partir de datos del sensor MODIS válida para Asturias" (FC-09-IB09-149), financiado en 2010 por el Gobierno del Principado de Asturias a través de la FICYT. Adán Abajo tiene un contrato de Personal Técnico de Apoyo para la antena MODIS financiado en parte por el Programa Nacional de Recursos Humanos de Investigación 2008-2011 (PTA2008-1623-I).

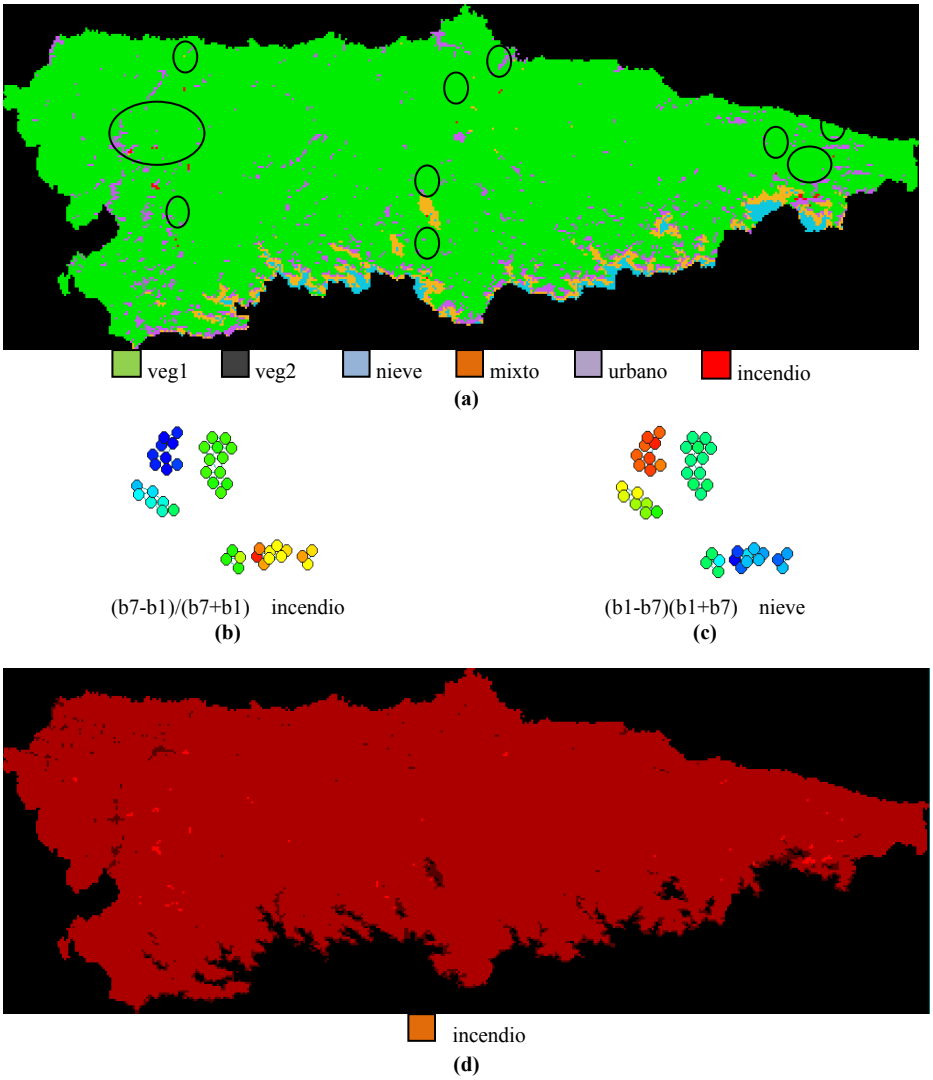


Figura 3: a) Imagen original clasificada por la red GCS LEAE. b) y c) Planos de componentes combinados. d) Índice espectral (b7-b1)/(b7+b1) aplicado a la imagen completa.

Análisis de la influencia de los efectos direccionales en la corrección atmosférica

B. Franch[1], E. Vermote[2], J.A. Sobrino[1] y E. Fédèle[2]

[1] Global Change Unit, Image Processing Laboratory (UCG-IPL). Parque Cientifico, Universitat de Valencia (Spain) belen.franch@uv.es

[2] Department of Geography, 2181 LeFrak Hall, University of Maryland, College Park MD

RESUMEN

Cuando se aplica la corrección atmosférica en la mayoría de estudios se asume que la superficie es lambertiana de manera que se simplifica significativamente el procesado de las imágenes. Sin embargo, las superficies naturales tienen un comportamiento anisótropo por lo que esta asunción puede inducir a errores en la estimación de parámetros como el albedo de la superficie. En este trabajo hemos evaluado la influencia de los efectos direccionales en la corrección atmosférica. Para ello hemos comparado el valor de albedo tanto a partir de datos en que se asume que la superficie es lambertiana como a partir de datos en que se han corregido los efectos direccionales a través la *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF). El estudio se aplica sobre datos *Climate Modeling Grid* (CMG) de MODIS, los cuales tienen una resolución espacial de 0.05°. Nos hemos centrado en el análisis de los datos adquiridos entre 2003 y 2006 en cuatro zonas de estudio de la red Aeronet en Estados Unidos. Los resultados muestran que los efectos direccionales afectan mayoritariamente a la región espectral del visible. Es en esta región donde el error relativo cometido en la estimación de la reflectividad superficial implica un error del 5-16%. Sin embargo, en el caso del albedo superficial, la estimación lambertiana supone un error relativo del 1-2%.

Palabras clave: teledetección, BRDF, albedo, MODIS.

ABSTRACT

When applying the atmospheric correction it is usually considered the Lambertian assumption, which significantly simplifies the image processing. However, natural surfaces are anisotropic and, therefore, this assumption can lead to incorrect estimation of parameters such as the surface albedo. In this paper we evaluate the influence of directional effects on the atmospheric correction checking its impact in the albedo computing. Thus, first we estimate the surface albedo from data corrected assuming a Lambertian surface. Then, we retrieve the albedo from data corrected considering the directional effects through the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). The study is applied to the Climate Modeling Grid (CMG) Modis data, which has a spatial resolution of 0.05°. We center the analysis in data acquired from 2003 until 2006 in four Aeronet sites in the United States of America. The results show that directional effects affect mainly the visible spectral region. In this region, the Lambertian assumption causes relative errors in the surface reflectivity estimation between 5-16%. However, in case of the surface albedo estimation they range between 1-2%.

Keywords: *remote sensing, BRDF, albedo, MODIS*

INTRODUCCIÓN

La corrección atmosférica es el proceso mediante el cual se elimina la perturbación provocada por la atmósfera en los datos adquiridos mediante teledetección. Esta es esencial en muchos estudios como, por ejemplo, en análisis multitemporales o en los que se necesita la estimación de parámetros absolutos. En este sentido es todo un reto la eliminación de estos efectos de la forma más precisa posible. La función *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) describe la dependencia de la reflectividad superficial con la geometría de iluminación y observación por lo que refleja la anisotropía de la superficie (Schaepman-Strub et al., 2006). El objetivo del presente trabajo consiste en analizar la influencia de considerar la anisotropía de la superficie en la corrección atmosférica.

BASE TEÓRICA

Con la finalidad de considerar la anisotropía de la superficie, se ha estimado la BRDF para

analizar los efectos direccionales de la interacción de la radiación en la misma. Con este fin se ha considerado el modelo Ross-Li-Maignan (Bréon et al., 2002). Los parámetros del modelo se han determinado a partir del proceso de inversión propuesto por Vermote et al. (2009). De esta manera, la reflectividad se estima como la suma de tres términos:

$$\rho(\theta_s,\theta_v,\phi) = k_0\left[1+\frac{k_1}{k_0}F_1(\theta_s,\theta_v,\phi)+\frac{k_2}{k_0}F_2(\theta_s,\theta_v,\phi)\right] \qquad (1)$$

donde F_1 es el kernel volumétrico, basado en la función Ross-thick pero corregida por el efecto de *Hot-Spot*, y F_2 es el kernel geométrico, basado en la función Li-sparse recíproco, y siendo k_0, k_1 y k_2 tres parámetros libres. A partir de este momento se considera $V = k_1/k_0$ y $R=k_2/k_0$.

METODOLOGÍA

En la figura 1 se presenta el esquema seguido en la corrección de la BRDF. Para ello, se ha utilizado el código de transferencia radiativa 6S (Vermote et al., 2006). En primer lugar se considera una superficie uniforme y lambertiana de reflectividad superficial, ρ_1, a partir de la cual se calcula la $BRDF_1$ y el $albedo_1$. Cabe destacar que el valor de $BRDF_1$ no es correcto ya que se estima a partir de datos corregidos asumiendo superficie lambertiana. Considerando $BRDF_1$ en la corrección atmosférica, estimamos la nueva reflectividad superficial ρ_2. Esta reflectividad se utiliza de nuevo para obtener una nueva $BRDF_2$ y un $albedo_2$. Finalmente, $BRDF_2$ se considera para estimar la reflectividad ρ_3.

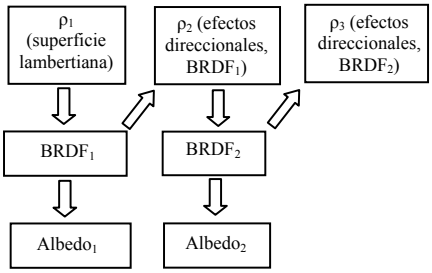


Figura 1: Esquema seguido en este trabajo.

DATOS

El estudio se ha realizado a partir de datos *Climate Modeling Grid* (CMG) de MODIS, con una resolución espacial de 0.05º (aproximadamente 5 km). Se han analizado datos correspondientes a los años entre 2003 y 2006 para cuatro zonas (cada una con una extensión de un píxel CMG) localizados en los Estados Unidos de América: KONZAEDC (una pradera en la region Flint Hills, Kansas), Howland (una zona forestal en Maine), Walker Branch (una zona forestal en Tennesse) y GSFC (centrado en los edificios del *Goddard Space Flight Center* de la NASA en Maryland).

RESULTADOS

En la Figura 2 hemos representado la evolución temporal de los parámetros V y R en el caso particular de KONZAEDC.

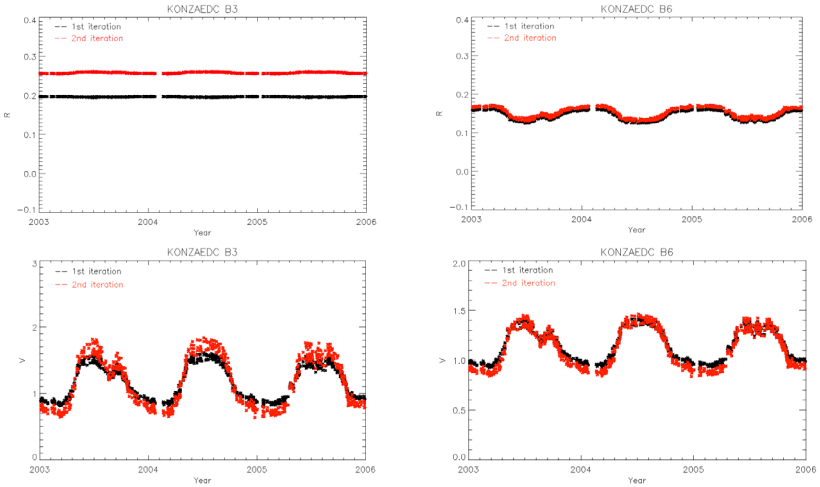


Figura 2: Evolución temporal de los parámetros R y V en las bandas 3 y 6 de MODIS.

Aunque el estudio se ha realizado sobre todas las bandas en el visible y próximo infrarrojo sólo se incluyen los resultados correspondientes a las bandas 3 (en torno a 470 nm) y 6 (en torno a 1640 nm) de MODIS, considerando cada una de ellas representativas de cada región. En esta figura la primera iteración (negro) se refiere a la estimación de V y R a partir de ρ_1 (los parámetros de $BRDF_1$) y la segunda iteración (rojo) a partir de ρ_2 ($BRDF_2$).

Se comprueba asimismo que la diferencia entre considerar ρ_1 y ρ_2 en la estimación de la BRDF es mayor en la banda 3 que en la banda 6. Además, se observa que esta es más notable en la estimación del parámetro R que en V. A pesar de que en esta figura se ha representado sólo el caso de KONZAEDC, del análisis de las demás zonas se infieren las mismas conclusiones.

RMS (%)			AOT>0.3	*Forward Scattering*	*Backward Scattering*
Howland	**B3**	ρ_2	12.03	10.67	5.46
		ρ_3	16.76	16.15	6.61
	B6	ρ_2	1.63	0.53	0.54
		ρ_3	1.69	0.56	0.56
KONZA EDC	**B3**	ρ_2	10.51	7.83	4.69
		ρ_3	14.42	11.23	6.13
	B6	ρ_2	1.19	0.39	0.45
		ρ_3	1.22	0.39	0.48
GSFC	**B3**	ρ_2	9.17	7.17	5.56
		ρ_3	13.21	11.35	6.97
	B6	ρ_2	1.67	0.56	0.87
		ρ_3	1.78	0.59	0.92
Walker Branch	**B3**	ρ_2	10.24	5.25	7.31
		ρ_3	13.02	6.96	9.02
	B6	ρ_2	1.73	0.52	0.93
		ρ_3	1.82	0.54	0.97

Tabla 1: RMS relativo al considerar la superficie lambertiana (ρ_1) respecto a ρ_2 y ρ_3.

Por otra parte, en la Tabla 1 se puede observar el error (*Root Mean Square*, RMS) relativo (ecuación 2) cometido entre considerar la reflectividad a partir de la asunción lambertiana (ρ_1) y la reflectividad derivada de las sucesivas correcciones considerando la BRDF (ρ_2 y ρ_3).

$$RMS(\%) = \left[\frac{\sum_n \left(\frac{\rho_1 - \rho_{2,3}}{\rho_1} \right)^2}{n} \right]^{1/2} \qquad (2)$$

El análisis de los datos se ha dividido en tres casos particulares: alto contenido de aerosoles (AOT>0.3), *forward scattering* (dispersión hacia delante) y *backward scattering* (retrodispersión). Como primera observación, se comprueba que el error cometido con la aproximación lambertiana es mayor en la banda 3 (entre el 5% y el 16%) que en la 6 (entre 0.5% y 2%) lo que concuerda con los resultados de la Figura 2. De hecho, en la banda 6 la diferencia entre el error de ρ_2 y ρ_3 es prácticamente despreciable. Sin embargo, en la banda 3 la diferencia es, en todos los casos, mayor en ρ_3. Los mayores errores corresponden a alto contenido en aerosoles. Comparando las dos direcciones de dispersión, *forward scattering* tiene un mayor error en la banda 3 en todas las zonas excepto Walker Branch.

Para mostrar el efecto de la corrección atmosférica, en la Figura 3 se representa, para cada una de las zonas consideradas y en función del ángulo de observación, el RMS relativo entre ρ_3 (considerando este valor como el más próximo a la realidad) y (a) la reflectividad en el techo de la atmósfera (*Top Of Atmosphere*, TOA), (b) la reflectividad con la asunción lambertiana y (c) la reflectividad estimada a partir de $BRDF_1$ (ρ_2).

Se puede observar que los efectos atmosféricos son mucho más notables en la banda 3 que en la banda 6. Esto es debido a que la dispersión atmosférica disminuye conforme aumenta la longitud de onda y además afecta en mayor medida a los pequeños valores de reflectividad de la vegetación en el visible respecto a los altos valores en el próximo infrarrojo. Centrándonos en la banda 3, se comprueba que se obtienen mayores errores en el *forward scattering* (ángulos de observación negativos). Estos resultados muestran que los efectos atmosféricos deben ser eliminados de los datos adquiridos mediante teledetección en los que se pretenden estimar valores absolutos.

Finalmente, en la Tabla 2, se ha estimado el error entre estimar el albedo superficial a partir de asumir superficie lambertiana ($albedo_1$) respecto a su estimación considerando los efectos direccionales ($albedo_2$).

RMS (%)	Howland	KONZA EDC	GSFC	Walker Branch
Albedo	1.04	1.42	1.70	0.97

Tabla 2: RMS relativo en la estimación del albedo superficial.

En esta tabla se observa que el error cometido en la estimación del albedo superficial apenas llega en ninguno de los casos al 2%.

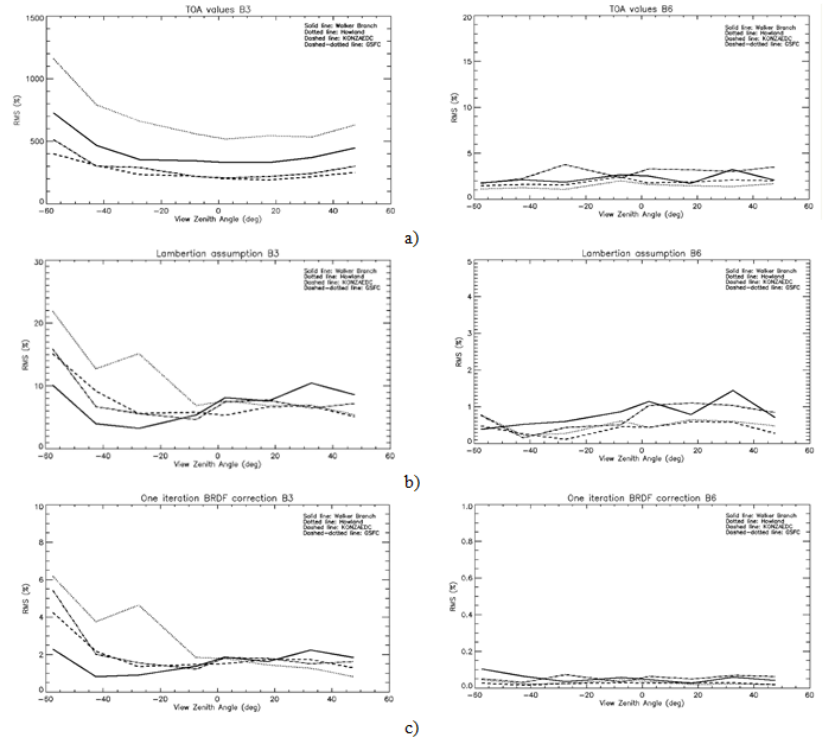


Figura 3: RMS relativo (%) entre ρ_3 y (a) la reflectividad en TOA, (b) ρ_1 y (c) ρ_2 en las bandas 3 y 6, para cada una de las zonas consideradas y en función del ángulo de observación.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia de considerar los efectos direccionales a través de la BRDF en la corrección atmosférica. El análisis de los resultados muestra que estos afectan mayoritariamente a la región espectral del visible. Los errores cometidos al considerar la superficie lambertiana en el caso de la reflectividad superficial se encuentran entre el 5-16% y en el caso de la estimación del albedo superficial no superan el 2%.

BIBLIOGRAFÍA

BREON F. M., MAIGNAN F., LEROY M., and GRANT I., 2002. *Analysis of hot spot directional signatures measured from space*, J. Geophys. Res., 107, no. D16, p. 4282

SCHAEPMAN-STRUB G., SCHAEPMAN M., PAINTER T., DANGEL S. and MARTONCHIK J., 2006. *Reflectance quantities in optical remote sensing — Definitions and case studies,* Remote Sensing of Environment **103**, pp. 27–42.

VERMOTE E. F., TANRE D., DEUZE J. L., HERMAN M., MORCRETTE J. J., KOTCHENOVA S. Y. and MIURA T., 2006. *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*, 6S User Guide Version 3 (November, 2006), http://www.6s.ltdri.org

VERMOTE E., JUSTICE C.O. and BRÉON F.M., 2009. *Towards a Generalized Approach for Correction of the BRDF Effect in MODIS Directional Reflectances*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47, 898-908.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo en este trabajo por una parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología (EODIX, proyecto AYA2008-0595-C04-01) y por otra parte de la Unión Europea (CEOP-AEGIS, proyecto FP7-ENV-2007-1 proposal No. 212921; WATCH, proyecto 036946).

Anisotropía de la emisividad térmica en suelos inorgánicos

V. García-Santos, E. Valor, M.A. Burgos, V. Caselles y C. Coll

Grupo de Teledetección Térmica. Depto. Física de la Tierra y Termodinámica. Universitat de Valencia. C/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia, España). Correo electrónico: vicente.garcia-santos@uv.es

RESUMEN

En el dominio espectral conocido como infrarrojo térmico (IRT) la emisividad (ε) de los suelos desnudos inorgánicos (SDI) puede sufrir variaciones debido a tres factores principales: el intervalo espectral de medida, la composición (macroscópica y microscópica) de la superficie y la geometría de observación de ésta. Dadas las escasas publicaciones existentes en lo referente a la medida experimental de la anisotropía de la ε en SDI, en el presente estudio se llevó a cabo una campaña de medida de la variación angular de la ε de siete SDI, clasificados según su composición granulométrica en el triangulo textural definido por el *United States Department of Agriculture*. Para ello se diseñó un dispositivo goniométrico capaz de medir la radiancia angular de un SDI mediante el uso de un radiómetro multiespectral operando en seis canales del IRT situados entre 8 y 14 μm. Los resultados más relevantes muestran un descenso cenital de la ε respecto su valor en el nadir de hasta 0,14, para el caso de una muestra arenosa siendo la muestra menos variante la arcillosa. El error cometido en las medidas de ε es del 0,01.

Palabras clave: emisividad angular, infrarrojo térmico, temperatura, edafología.

ABSTRACT

On the spectral domain known as thermal infrared (TIR), emissivity (ε) of inorganic bare soils (IBS) can suffer variations due three factors: spectral range of measurements, surface composition (both macroscopic and microscopic) and viewing geometry of the surface. Given the few publications of experimental measurements concerning anisotropy in ε of IBS, a field campaign was carried out with aim of measuring the angular variation of ε in seven IBS, classified according to grain size in the textural triangle defined by the United States Department of Agriculture. A goniometric device was designed capable of measuring the angular radiance of an IBS by means of using a multispectral radiometer working on six TIR channels located between 8 and 14 μm. The most relevant results show a zenithal decrease of ε on their value from nadir up to 0,14 in the case of a sandy sample being the clay the least variant, an error about 0,01 was committed on the measurements.

Keywords: *angular emissivity, thermal infrared, temperature, Edaphology.*

INTRODUCCIÓN

En Teledetección térmica se persiguen objetivos tales como conocer el intercambio de energía entre superficie y atmósfera, necesidades hídricas de suelos agrícolas o la prevención y control de incendios entre otros, todos ellos gobernados por un factor común, la obtención de la temperatura de la superficie terrestre (TST) a partir de medidas radiativas llevadas a cabo en el infrarrojo térmico (IRT), 8-14 μm, procedentes de una superficie. La correcta obtención de TST desde satélite pasa por someter dichas medidas a dos tipos de corrección; la primera debido al efecto de la atmósfera existente entre suelo y satélite, y la segunda debido al efecto de la emisividad superficial (ε). Centrando la atención en la ecuación de transferencia radiativa (ETR) para un sensor situado cerca de la superficie, sin tener una contribución directa de la atmósfera existente entre ambos, Norman y Becker (1995) ofrecen la siguiente expresión de la ETR para una superficie opaca en equilibrio térmico, suponiendo isotrópica la radiancia atmosférica descendente

$$L(T[\theta,\varphi]) = \varepsilon(\theta,\varphi)B(TST) + [1-\varepsilon(\theta,\varphi)]L_{atm}^{\downarrow} \quad (1)$$

donde L es la radiancia medida por un sensor procedente de una superficie, T es la temperatura radiométrica que se obtendría al invertir la función de Planck sobre dicha radiancia, B es la función de Planck de cuerpo negro, $L^{\downarrow}_{atm}$ es la radiancia atmosférica descendente reflejada por la superficie hacia el sensor y (θ, φ) son los ángulos cenital y acimutal de observación, respectivamente.

Pocos han sido los trabajos que se han interesado en la medida experimental en el IRT de ε (θ, φ) en suelos desnudos inorgánicos (SDI), Labed y Stoll (1991) ofrecen valores relativos de la ε (θ, φ) para suelos arenosos en el intervalo espectral 10-12 μm. Cuenca y Sobrino (2004) ampliaron un poco más el abanico de medidas incluyendo valores de ε (θ, φ) de SDI arcillosos y limosos, utilizando esta vez un radiómetro multiespectral operando en un canal ancho 8-14 μm y otros tres estrechos distribuidos a lo largo del ancho. McAtee et al. (2003) validaron los resultados de Labed y Stoll (1991) para una superficie arenosa mediante la aplicación de un modelo basado en la teoría de dispersión de Mie.

Dada la importancia que tiene conocer la posible anisotropía de la emisividad térmica de SDI y la poca profusión en publicaciones que dicho campo ofrece, se decidió llevar a cabo una campaña específica de la medida de ε (θ, φ) para diferentes SDI distribuidos, en función de su composición granulométrica, en diferentes denominaciones dentro del triangulo textural definido por el *United States Department of Agriculture (USDA)*. Debido a la dificultad de medir la TST en (1) para así despejar ε (θ, φ), se decidió realizar medidas simultáneas de la radiancia procedente de un SDI a 0° y a un ángulo cenital θ. La finalidad era obtener una medida directa del valor relativo de la emisividad, ε_r (θ, φ) respecto su valor a nadir, el cual puede ser obtenido mediante técnicas ampliamente conocidas en teledetección térmica. La expresión de ε_r (θ, φ) que se obtiene mediante el cociente de (1) para θ = 0° y θ > 0° es

$$\varepsilon_r(\theta,\varphi) = \frac{L(T[\theta,\varphi]) - L^{\downarrow}_{atm}}{L(T[0°,\varphi]) - L^{\downarrow}_{atm}} \quad (2)$$

La validez de (2) está sometida a una condición, que la TST y $L^{\downarrow}_{atm}$ permanezcan invariantes durante el tiempo de medida de las radiancias a 0° y a θ. Dado que las medidas se realizan simultáneamente dicha condición se cumple sin ningún tipo de problema.

INSTRUMENTACIÓN

Radiómetro Térmico Multiespectral

El sensor térmico utilizado durante la campaña de medidas es el CLIMAT 312-xB de la casa Cimel Electronique, http://www.cimel.fr. Se trata de un radiómetro que mide la radiancia en seis canales espectrales térmicos distintos (C1; 8-14 μm, C2; 10,8-12 μm, C3; 10-11 μm, C4; 8,9-9,5 μm, C5; 8,3-9,2 μm y C6; 8,2-8,9 μm). La precisión de este radiómetro en términos de temperatura radiométrica está en torno ± 0,02 K en todos sus canales.

Panel de reflectividad difusa

En el estudio se empleó para determinar $L^{\downarrow}_{atm}$, el panel de reflectividad difusa en el IRT *Infragold Reflectance Target, IRT-94-100* de la casa Labsphere, http://www.labsphere.com. Cuya superficie de oro rugoso, de dimensiones 25,4x 25,4 cm, viene caracterizada por un alto valor de reflectividad en el IRT, en torno al 94%. Se eligió este método frente a otros por las ventajas que presentaba; rápida adquisición de medidas y consideración de la contribución radiativa de elementos circundantes a la superficie ajenos a la atmósfera (García-Santos et al., 2009).

Ensamblaje Goniométrico

Para llevar a cabo las medidas angulares de la radiancia procedente de la SDI, se hizo uso de un goniómetro constituido por un semi-arco de radio 2 m y un soporte de 0,7x4 m de superficie y 0,15m de altura (Figura 1).

MUESTRAS DE SDI

En la tabla 1 se pueden observar las características texturales (según USDA) de cada una de las siete muestras utilizadas en el estudio experimental.

Denominación USDA	Notación	CG (%) A, L, a
Arenosa	A	99, 1, 0
Areno-Francosa	AF	77, 18, 5
Franco-Arenosa	FA	67, 20, 13
Franco-arcillosa	Fa	20, 43, 37
Franco-arcillo-Limosa	FaL	14, 50, 35
arcillosa	a	40, 6, 54
Franco-limosa	FL	29, 54, 17

Tabla 1: Valores texturales de 7 muestras distintas en función de su composición granulométrica (CG, en %) de arena (A), limo (L) y arcilla (a)

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La medida simultánea de la radiancia, mediante la utilización de dos radiómetros térmicos, a θ = 0° y θ > 0° se llevó a cabo en un doble barrido angular, esto es, el primero correspondiente a un barrido cenital, fijado un φ. Dicho barrido consta de medidas simultáneas de radian-

cia a 0° y a θ = 10° hasta 70°, en incrementos de 10°. Al principio y final de cada barrido, y entre 40° y 50°, se realizan medidas de $L^{\downarrow}_{atm}$ mediante el panel. Las medidas a θ = 50°, 60° y 70°, se repitieron dos veces en un barrido para evitar errores en la proyección del FOV del radiómetro. A su vez el barrido cenital se repetía dos veces para un φ dado. Comentar que para cada variación de θ, el radiómetro encargado de medir dicha radiancia era acercado correspondientemente a la muestra por tal que, tanto él como el radiómetro fijo a nadir, estuvieran midiendo la misma área de SDI.

Una vez realizados los dos barridos cenitales a un φ dado, se cambiaba la orientación de éste repitiendo el proceso de medidas del primer barrido comentado anteriormente. En total mediamos la muestra de θ = 10° hasta 70° para cuatro φ distintos, orientados en el plano perpendicular al Sol para evitar efectos de sombreado del goniómetro sobre la muestra. Así pues por la mañana se realizaba un barrido acimutal en la orientación NE-SO, midiendo en dos φ opuestos y complementarios (0°-180°) y por la tarde se medía en la orientación NO-SE los otros dos φ (90°-270°). En total se obtuvieron ocho medidas de la emisividad relativa para θ desde 10° a 40° y dieciséis para θ desde 50° a 70°.



Figura 1: Fotografía del montaje experimental.

En la Figura 1 se puede apreciar una fotografía del montaje experimental. Comentar, por último, que las muestras, una vez depositadas en el soporte de madera de la Figura 1, eran alisadas para evitar efectos angulares no deseados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se puede apreciar la representación gráfica, para las siete muestras seleccionadas y en los canales espectrales del radiómetro, de la emisividad relativa medida en función del ángulo cenital de observación. Al tratar los datos se observó que las muestras presentaban un comportamiento casi isótropo al ser medidas, para un mismo θ, desde diferentes φ por tanto desde ahora nos referiremos a la emisividad angular como ε(θ). Por tanto se estudia la variación de ε(θ) considerándose como su valor en cada θ, el promedio de todos los valores medidos en todos los φ y el error asociado a dicha ε(θ) la desviación estándar de éstos. Dichos errores quedan comprendidos entre ±0,005 y ±0,009.

Volviendo a la Figura 2, en líneas generales se puede apreciar que la ε(θ) de SDI disminuye con el aumento de θ, conclusión registrada en trabajos previos referenciados en la introducción. También se aprecia que la ε(θ) disminuye más en suelos arenosos, siendo la ε(θ) de los arcillosos la que menor variación presenta. Entrando en más detalle sobre el comportamiento menguante de la ε(θ) para los siete SDI en cada intervalo espectral de medida, siempre y cuando se fije como límite permisible en el decaimiento de la ε(θ) un orden de magnitud de su error (~0,01), se puede llegar a las siguientes apreciaciones.

8-14 μm

Hasta θ=50° se pueden ignorar los efectos de la ε(θ) en cualquier SDI, independientemente de su textura. No obstante a partir de θ ≥ 50° se deben considerar el descenso de ε(θ), especialmente en suelos con un contenido arenoso superior al 60% y limoso o arcilloso de hasta el 20%, de lo contrario las medidas que se realicen están expuestas a cometer una imprecisión en la determinación de la emisividad en (1) de hasta 0,055. Para una temperatura media de la atmósfera de -54°C y una TST de 27°C, ambos valores registrados durante la campaña de medida, cometer dicha imprecisión en la emisividad supone infravalorar la T (Ec. 1) unos 2,5 ± 0,5 K.

10-12 μm

La variación de la ε(θ) es muy poco significativa para cualquier SDI, tan solo debería considerarse una posible influencia de ε(θ) a θ=70°, siendo su máxima diferencia respecto θ=0° en torno a 0,027 (error en T de 1,4 ± 0,5 K).

8-10 μm

En este intervalo espectral es donde aparecen las variaciones más grandes de la ε(θ). Entre 8,2-9,2 μm (C4), 8,7-9,7 μm (C5) y 8-9 μm (C6), el descenso de la ε(θ) comienza a ser notable pronto, a partir de θ ≥ 30°. La máxima variación de la ε(θ) se produce en suelos arenosos, en torno al 60%, llegando a diferencias de la ε(θ) respecto a su valor a nadir de hasta 0,139, equivalente a una infravaloración de la T de 5,1 ± 0,6 K.

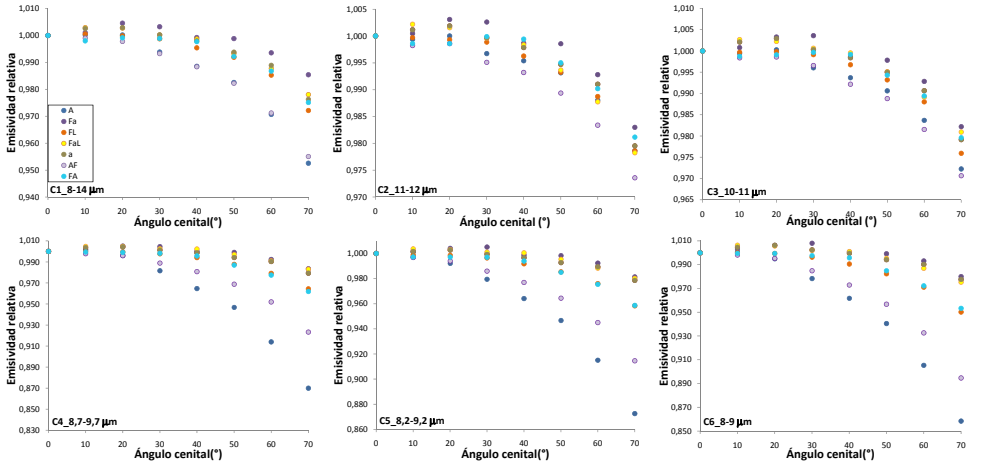


Figura 2: Variación angular cenital de la emisividad relativa de los siete SDI en los seis canales espectrales del radiómetro.

CONCLUSIONES

La emisividad de SDI presenta anisotropía tanto en su variación cenital como en la acimutal, no obstante con el acimut es tan pequeña que se pueden considerar a los SDI anisótropos para cualquier orientación acimutal. Respecto a la anisotropía cenital, la $\varepsilon(\theta)$ no es despreciable y disminuye a medida que aumenta θ.

En general los SDI pueden considerarse anisótropos hasta ángulos $\theta \geq 30°$, a partir de este θ cuanto más contenido en arena presente el SDI más decrece la $\varepsilon(\theta)$, siendo indispensable su corrección a partir de contenidos de arena del 60% o superiores y limosos o arcillosos del 40% o inferiores. En cualquier caso a partir de ángulos cenitales del $\theta \geq 60°$, en cualquier tipo de SDI, son importantes los efectos de la variación de la $\varepsilon(\theta)$.

La variación de la $\varepsilon(\theta)$ en SDI es notable en todo el intervalo espectral 8-14 µm, aunque dicha variación es mucho más acentuada en el intervalo 8-10 µm, siendo necesaria su corrección en medidas realizadas a $\theta \geq 30°$ o cabe la posibilidad de infravalorar la temperatura radiométrica medida de un SDI hasta unos 5,1 ± 0,6 K.

BIBLIOGRAFÍA

CUENCA, J. and SOBRINO, J.A., 2004. *Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity*. Applied Optics, 43, 4598-4602.

GARCÍA-SANTOS, V., MIRA, M., COLL, C., VALOR, E. y CASELLES, V., 2009. *Determinación de la irradiancia atmosférica descendente mediante un panel de reflectividad difusa*. Teledetección: Agua y Desarrollo Sostenible, XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud, Zaragoza (España), 23-26 de septiembre, 381-384.

LABED, J. and STOLL M., 1991. *Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: laboratory investigations on bare soils*. International Journal of Remote Sensing, 12, 2299–2310.

MCATEE, B. K., PRATA A. J. and LYNCH M. J., 2003, *The Angular Behavior of Emitted Thermal Infrared Radiation (8–12 µm) at a Semiarid Site.* Journal of Applied Meteorology, 42, 1060–1071.

NORMAN, J.M. and BECKER F., 1995. *Terminology in thermal infrared remote sensing of nature surfaces.* Agricultural and Forest Meteorology, 77, 153-166.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida por el MICINN, proyectos: CGL2007-64666/CLI, CGL2007-29819-E/CLI y CGL2010-17577/CLI y por la Conselleria d'Educació de la Generalitat Valencia, enmarcada dentro del proyecto PROMETEO/2009/086.

INTERPOLA. Herramienta para la generación de imágenes sintéticas y sustitución de valores reales con presencia de nubes-sombras por valores interpolados

Jesús Garrido[1], Isidro Campos[1], Guillermo Villa[2], Nuria Plaza[2] y Alfonso Calera[1]

[1] IDR. Instituto de Desarrollo Regional. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus de Albacete. c/ Campus Universitario s/n. 02071. Albacete (España). jgarridorubio@gmail.com

[2] IGN. Instituto Geográfico Nacional. Unidad de Observación del Territorio. c/ General Ibáñez de Íbero, 3. 28003. Madrid (España).

RESUMEN

En este trabajo se presenta la generación de imágenes satelitales interpoladas o sintéticas a partir de dos o más imágenes reales, que permite generar series temporales de imágenes libres de nubes en las fechas deseadas. El método propuesto, no requiere del empleo de otros sensores complementarios ni la asunción de correlación entre píxeles adyacentes para la sustitución de los píxeles inoperativos, completando así las series temporales. Las magnitudes físicas derivadas de imágenes de satélite que permiten describir más claramente las superficies naturales son índices de vegetación y reflectividad de la superficie, por lo que amplias series temporales de estas magnitudes, libres de nubes y con una resolución temporal adecuada, son una herramienta muy útil en el seguimiento de estas cubiertas.

Palabras clave: Teledetección, interpolación, series temporales, nubes, cubiertas vegetales.

ABSTRACT

This work aims to communicate the generation of interpolated images from two or more real images that allow users to generate image temporal series cloud free on the desire dates. The proposed methodology neither requires help from complementary satellites nor the adjacent pixels correlation to substitute inoperative pixels, providing new inputs in temporal series to complement those. Physics' magnitudes obtained from satellite data which easily allows to describe natural coverage are vegetation index and surface reflectivity. According to that a wide temporal series, cloud free and in an optimal resolution from satellite images, are a powerful tool in order to follow those surface coverage.

Keywords: *Remote Sensing, Interpolation, Temporal Series, clouds and surface coverage.*

INTRODUCCIÓN

La monitorización del estado y evolución de coberturas vegetales mediante series temporales de imágenes satelitales, es una poderosa herramienta para la toma de decisiones en el control y la gestión en espacios naturales y áreas agrícolas.

La presencia de nubes-sombras inutiliza la información de los píxeles afectados, disminuyendo la calidad de la imagen y limitando así la resolución temporal de las series. Por ello, diferentes autores proponen soluciones como incrementar la resolución temporal de las imágenes basadas en las constelaciones virtuales multisensor (Martinez-Beltran et al., 2009; Steven et al., 2003), o como la estimación del valor del píxel inutilizado mediante el empleo de la información de píxeles adyacentes mediante herramientas geoestadísticas (Chen et al., 2011; Pringle et al., 2009).

Este trabajo propone un método de estimación y sustitución de píxeles no válidos, y generación de imágenes sintéticas. Se basa en la estabilidad de la evolución temporal de las cubiertas naturales, descrita a partir de sus principales características observables desde teledetección, reflectividad e índices de vegetación (IV). Así, se analiza la capacidad de un proceso de interpolación de IV utilizando imágenes consecutivas para describir la evolución de las cubiertas naturales.

El proceso de interpolación se realiza mediante la herramienta informática INTERPOLA,

que permite la obtención de imágenes sintéticas en las fechas deseadas. El procedimiento se evalúa mediante comparación con imágenes reales sobre diversas cubiertas vegetales y suelo desnudo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Información de partida

La serie temporal de imágenes empleadas se presentan en la Tabla 1. Estas fueron tomadas por el sensor Temathic Mapper (TM) a bordo del satélite Landsat 5 durante el año 2004.

Escenas y Fechas Landsat 5 TM (2004).			
Escena 199-033		Escena 200-033	
20040421	20040608	20040530	20040615
20040624	20040710	20040701	20040717
20040726	20040811	20040802	20040818
20040827	20040912	20040919	20041005
20040928	20041014	20041224	-
20041115	20041217	-	-

Tabla 1: Imágenes Landsat 5TM empleadas para el estudio (año-mes-día; aaaammdd).

El procesamiento de las imágenes incluye la corrección geométrica de las bandas TM. La corrección atmosférica se basa en la estimación de las condiciones atmosféricas a partir de las propiedades de la imagen (Guanter et al., 2007). El procesado incluye la calibración radiométrica de las bandas utilizadas, empleando los coeficientes propuestos en la literatura (Chander et al., 2007). En aquellas imágenes reales con presencia de nubes-sombras se creó una máscara adjudicándole a la imagen real el valor nulo deseado en esas áreas. La zona de estudio se corresponde a la zona de solape entre las imágenes citadas, (Figura. 1).

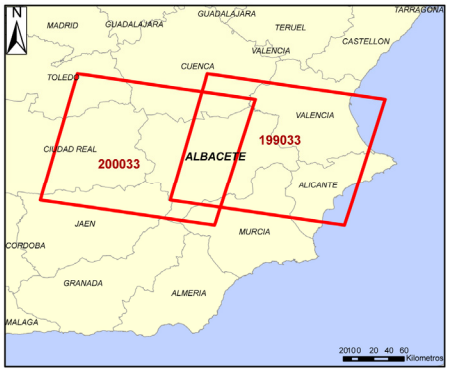


Figura 1: Escenas Landsat 199-033 y 200-033.

Como base para la evaluación e interpretación de los resultados, se ha contado con la clasificación de usos del suelo de la zona de estudio del año 2004, elaborada en el marco del proyecto ERMOT 2004 (Calera et al., 2004).

El programa INTERPOLA

El programa INTERPOLA ha sido desarrollado por el IDR, Universidad de Castilla-La Mancha. El algoritmo incluido en la primera versión, de interpolación lineal, es (1):

$$y = y_0 + \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)}(x - x_0) \qquad (1)$$

Donde:

- y: valor de píxel sintético o interpolado
- y_0: valor de píxel en la fecha de la primera imagen real
- y_1: valor de píxel en la fecha de la segunda imagen real
- x: dia juliano de la imagen interpolada
- x_0: dia juliano de la primera imagen real
- x_1: dia juliano de la segunda imagen real

Introduciendo en INTERPOLA las imágenes reales y sus respectivas fechas es posible obtener imágenes sintéticas en las fechas deseadas. Además, INTERPOLA permite sustituir aquellos valores reales inutilizados por nuevos valores interpolados, obteniendo así una imagen que combina ambos valores. Esto es posible gracias a la útil característica del Valor Nulo (introducido en las imágenes reales mediante la máscara previamente comentada). Esta opción habilita la posibilidad de omitir valores de pixeles no deseados en las imágenes de entrada, de forma que INTERPOLA recurre a imágenes adyacentes en el tiempo y con valores válidos para realizar la interpolación y posterior sustitución.

Proceso de evaluación de los resultados

Las imágenes sintéticas obtenidas fueron evaluadas mediante comparación con imágenes reales de la misma fecha. Para un análisis de los resultados las imágenes escogidas para la interpolación son de las fechas de 24-06-04 y 10-07-04, ambas de la escena 199-033 e interpoladas en el día 01-07-04. Esta fecha de interpolación coincide con una imagen real pero de la escena 200-033, haciendo así posible la validación de los resultados en la zona de solape de ambas escenas (Figura 2).

Las comparación de valores reales e interpolados se realiza para recintos de 100x100 m (≈ 3x3 píxel) considerados homogéneos (misma clasificación de uso de suelo). El valor promedio

de IV de los recintos estudiados se calcula como media ponderada de los valores de IV dentro de cada recinto.

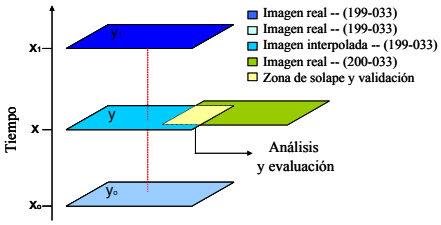


Figura 2: Metodología de interpolación, análisis y evaluación de los resultados.

La metodología de interpolación se aplica además, a una serie temporal obteniendo imágenes sintéticas de frecuencia semanal. A diferencia de el análisis y validación intensivo realizado para 2004, en este caso, las evoluciones temporales corresponden al año 2009, (entre el 14 de Febrero al 20 de Noviembre), llevando a cabo el análisis y validación, de forma extensiva. La no presencia de nubes sólo fue considerada para la primera y última imagen de la serie temporal disponiendo así de valores reales en los extremos máximos de la interpolación.

Todas las imágenes están disponibles en el Visor WebGIS SPIDER-Interpolación (http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis y evaluación que a continuación se expone ha sido detallado en función de las actividades de usos barbecho, matorral, regadío de verano y alfalfa. Esta discriminación, además de conformar diferentes dinámicas evolutivas en las cubiertas vegetales, ha permitido un estudio más intensivo de los valores interpolados.

En las gráficas presentadas a continuación (ver Figura 3) se observa la comparación entre los valores reales y los obtenidos tras la interpolación. Así mismo, es posible consultar en la Tabla 2. los valores estadísticos calculados. Las gráficas comparativas, Figura 3, señalan un ajuste considerable a la recta 1:1 salvo en el uso alfalfa, en la que el corte cada 28 días introduce discontinuidades que el interpolador lineal no es capaz de reflejar, obviamente.

En cuanto a la sustitución en imágenes reales de los píxeles ocupados por nubes-sombras por píxeles interpolados, se observa que la fiabilidad de los resultados depende nuevamente de la dinámica evolutiva de la cobertura que presenten los píxeles sustituidos, tal y como se ha explicado anteriormente. Es destacable que, los resultados obtenidos cuando interpolamos píxeles con las imágenes inmediatamente adyacentes se ajustan en mayor y mejor medida, que cuando las imágenes empleadas para llevar a cabo la interpolación no resultan ser las inmediatamente adyacentes.

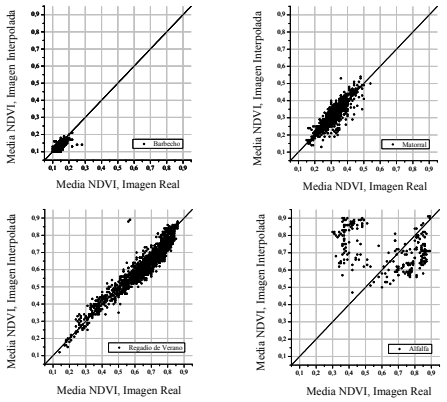


Figura 3: Gráficas comparativas entre la imagen real y sintética empleando el parámetro estadístico de la Media. De izquierda a derecha y de arriba abajo: a) Barbecho, b) Matorral, c) Regadío de verano y d) Alfalfa. Imágenes interpoladas sobre imágenes separadas 16 días

Análisis del parámetro estadístico de la Media NDVI entre la imagen real e interpolada.			
Uso del Suelo	**r^2**	**σ**	**RMSE (%)**
Barbecho	0,52	0,01	2,27
Matorral	0,80	0,02	1,77
Regadío de Verano	0,90	0,04	0,34
Alfalfa	0,12	0,10	43,47

Tabla 2: Análisis Estadístico de la comparativa entre la imagen real e interpolada (01-07-2004).

Por último, se completó una serie temporal interpolada a una semana de periodicidad. Observando los valores obtenidos tanto en la serie temporal NDVI real como en la interpolada, (Figura 4), para el uso de regadío de verano, la similitud en ambas curvas es patente. Destaca sin embargo, el valor NDVI real 0,41 para el doy 164, con respecto al valor NDVI sintético de 0,56 y con mismo doy, Esta marcada diferencia es debida a la presencia de una nube-sombra en el píxel considerado. Al realizar la interpolación se aprecia cómo el valor de NDVI interpolado se ajusta en mayor medida a la evolución temporal. Esto es así, por que INTERPOLA ha detectado la máscara de valor nulo aplicada, tomando entonces valores reales de la imagen adyacente en el tiempo.

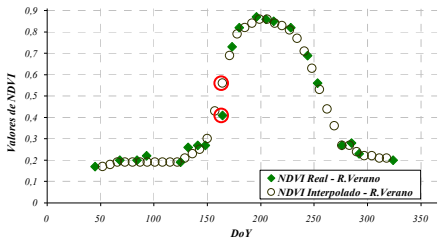


Figura 4: Comparativa de la evolución temporal del NDVI (serie temporal real e interpolada), con una semana de periodicidad.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que, en general, una imagen caracteriza bien las cubiertas vegetales, en el intervalo temporal de una semana centrada en la fecha de la imagen. Esta caracterización se extiende tanto a las reflectividades e IV, como a la Combinación Color (RGB). Así pues, la interpolación entre imágenes separadas una semana para obtener imágenes diarias es de alta fiabilidad, aun teniendo en cuenta fenómenos que introduzcan fuertes discontinuidades.

Para el caso de imágenes cada 16 días, (imágenes Landsat), nuestros resultados indican que la interpolación lineal conduce a resultados satisfactorios en la mayoría de las cubiertas analizadas: suelo desnudo, matorral, forestal, y para la mayor parte de los cultivos como herbáceos, cebollas o leñosos (viña y olivo). Los casos más extremos en los cuales la interpolación produce resultados erróneos, son aquellos con abruptas discontinuidades; esta situación se presenta en ciclos como el de la alfalfa, donde se aplican siegas cada 28 días; cada siega, o corte, es seguida de un rápido rebrote, de forma que en un par de semanas vuelve a presentar el estado de vegetación densa, y por tanto la interpolación puede no recoger la caída.

Si el intervalo temporal entre las imágenes se amplía a 1 mes, las cubiertas como el suelo desnudo y la vegetación natural son todavía bastante bien descritas por la función lineal. Para el caso de los cultivos, aparecen incertidumbres que dependen tanto de los instantes en que las imágenes se adquieren, como del propio ciclo vegetativo del cultivo. Es preciso analizar en cada caso el acople de la serie temporal de imágenes de la que se disponga y del ciclo del cultivo, lo que es más pertinente cuanto más se separen en el tiempo las imágenes.

En los casos indicados en que es fiable la interpolación, el software INTERPOLA presenta una útil aplicación para sustituir píxeles nubosos por valores interpolados permitiendo la generación de imágenes sintéticas, tanto en reflectividades, IV o RGB libres de nubes.

BIBLIOGRAFÍA

CALERA, A., QUINTANILLA, A., CASTAÑO, S., DE LA CRUZ, F., 2004. *Evolución de superficies en regadío mediante teledetección en el ámbito del acuífero Mancha Oriental*.

CHANDER, G., MARKHAM, B.L. AND BARSI, J.A., 2007. *Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration.* IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 4: 490-494.

CHEN, J., ZHU, X., VOGELMANN, J.E., GAO, F. AND JIN, S., 2011. *A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images*. Remote Sensing of Environment, 115: 1053-1064.

GUANTER, L., ESTELLÉS, V. AND MORENO, J., 2007. *Spectral calibration and atmospheric correction of ultra-fine spectral and spatial resolution remote sensing data. Application to CASI-1500 data.* Remote Sensing of Environment, 109: 54-65.

MARTINEZ-BELTRAN, C., JOCHUM, M.A.O., CALERA, A. AND MELIA, J., 2009. *Multisensor comparison of NDVI for a semi-arid environment in Spain.* International Journal of Remote Sensing, 30: 1355-1384.

PRINGLE, M.J., SCHMIDT, M. AND MUIR, J.S., 2009. *Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM+ images.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64: 654-664.

STEVEN, M.D., MALTHUS, T.J., BARET, F., XU, H. AND CHOPPING, M.J., 2003. *Intercalibration of vegetation indices from different sensors system*. Remote Sensing of Environment, 88: 412-422.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos “Interpolación normalizada de imágenes procedentes de múltiples sensores” (UCTR080252) y EBHE, “Evapotranspiración, Balance Hídrico y Estrés” de la cubierta mediante la secuencia multitemporal de imágenes satélite y su agregación espacial y temporal en grandes áreas heterogéneas” (CGL2008-04047).

Caracterización Multiescala De Objetos Como Herramienta Para La Clasificación De Imágenes

C. Gonzalo[1] y M. Lillo-Saavedra[2]

[1] Dpto. de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, Campus de Montegancedo, Boadilla del Monte, 28660 Madrid consuelo.gonzalo@upm.es

[2] Dpto. de Mecanización y Energía, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, CHILE

RESUMEN

Una vez admitidas las ventajas de la clasificación basada en objetos, frente a la clasificación basada en píxeles, surge la necesidad de metodologías sencillas y asequibles que permitan definir y caracterizar los objetos a clasificar, integrando por un lado la mayor cantidad posible de informacion y eliminando, por otro, la información redundante. En este trabajo se presenta una nueva metodología para la definición y caracterización de objetos a diferentes escalas, mediante la integración de la información espectral aportada por la imagen multiespectral, objeto de la clasificación, con la información morfológica y textural aportada por su correspondiente imagen pancromática. De esta forma, se han definido un conjunto de objetos que proporcionan una representación conjunta y simplificada de la información contenida en las dos imágenes fuente y que facilita, tanto desde un punto de vista conceptual como computacional, el procesado de dicha información. Para mostrar las capacidades de la metodología propuesta, se han llevado a cabo algunos ejemplos de clasificación 1-D, utilizando diferentes subconjuntos de atributos.

Palabras clave: Atributos de objetos, clasificación basada en objetos, coeficientes Wavelet, segmentación.

ABSTRACT

Once admitted, the advantages of object-based classification compared to pixel-based classification; the need of simple and affordable methods to define and characterize the objects to be classified, appears. This paper presents a new methodology for the identification and characterization of objects at different scales, through the integration of spectral information provided by the multispectral image, and morphological and textural information from the corresponding panchromatic image. In this way, it has defined a set of objects which provide a simplified representation of the information contained in the two source images. These objects can be characterized by different attributes that allow discriminating between different spectral&textural patterns. This methodology facilitates information processing, from a conceptual and a computational point of view. Preliminary 1-D classification results have been presented to show the capabilities of the proposed methodology.

Keywords: *Object attributes, object-based classification, Wavelet coefficients, segmentation.*

INTRODUCCIÓN

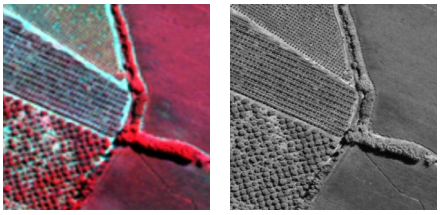
El procesado de imágenes digitales basado en objetos, tiene sus orígenes en el hecho de que la interpretación de imágenes que realiza el sistema visual humano se lleva a cabo a partir del reconocimiento de objetos caracterizados por diferentes atributos (tamaño, forma, texturas, color, …) y no por la percepción de puntos individuales (píxeles), caracterizados exclusiva-mente a partir de los valores digitales asociados a dichos puntos. Esta última estrategia de interpre-tación, es el origen de la mayoría de las debilida-des detectadas en los métodos de procesado de imágenes digitales basados en píxeles, especial-mente cuando estos se aplican a imágenes de alta y muy alta resolución espacial y baja resolución espectral (Blaschke & Strobl, 2001). Así, se ha constatado que la clasificación basada en objetos, utilizando diferentes tipos de atributos, minimiza la alta variabilidad de los diferentes tipos de cubiertas presentes en este tipo de imágenes, mejorando considerablemente la precisión de los resultados (Bruce, 2008).

Un paso crítico en este tipo de procesado es la identificación y caracterización de los objetos, mediante la agrupación de píxeles vecinos con

atributos comunes, en áreas homogéneas y significativas desde el punto de vista del usuario final. Es decir, este proceso de agrupación, conocido como segmentación, se debe adaptar a la resolución y a la escala de los objetos que se pretenden identificar y clasificar en cada problema particular. Desde este punto de vista, se ha mostrado que las segmentaciones que tienen como condición inicial un píxel, y van generando objetos a una escala superior mediante la agregación de n sub-objetos de la escala inferior (*bottom-up*), no proporcionan resultados de segmentación adecuados para todos los tipos de cubierta. A partir de lo anteriormente expuesto, en este trabajo se propone llevar a cabo la identificación de los objetos con una aproximación *top-down*. Para ello, se utilizará información tanto de la imagen multiespectral objeto de la clasificación, como de la correspondiente imagen pancromática. A partir de esta ultima se definirán objetos con características texturales homogéneas, mientras que a partir de la imagen multiespectral objetos espectralmente homogé-neos. La integración de estos dos conjuntos de objetos que puedan ser caracterizados por dife-rentes atributos, permitiendo la discriminación de diferentes patrones espaciales y espectrales.

MÉTODOS Y DATOS

En la Figura 1a), se muestra una composición color de la escena multiespectral que se ha utilizado para aplicar la metodología propuesta en este trabajo y en la 1b), la correspondiente imagen pancromática. Esta escena corresponde a una imagen Quickbird, registrada el dia 18 de febrero de 2005, en la región del Maule, Valle de Peumo, Chile (34º18'6''S; 71º19'11''O). El área registrada es de 9.43 hectareas, correspondiente a 512x512 píxeles en la imagen pancromática.



a) b)

Figura 1: a) Composición NGB de la imagen multiespectral. b) Imagen pancromática.

Con objeto de asegurar un correcto ajuste espacial entre la imagen pancromática y la imagen multiespectral, se ha llevado a cabo la georeferenciación entre las dos imágenes. La metodología propuesta no requiere aplicar otro tipo de correcciones.

La Figura 2 incluye un esquema completo de la metodología de definición y caracterización de objetos propuesta. A continuación se detallan las diferentes etapas del proceso completo.

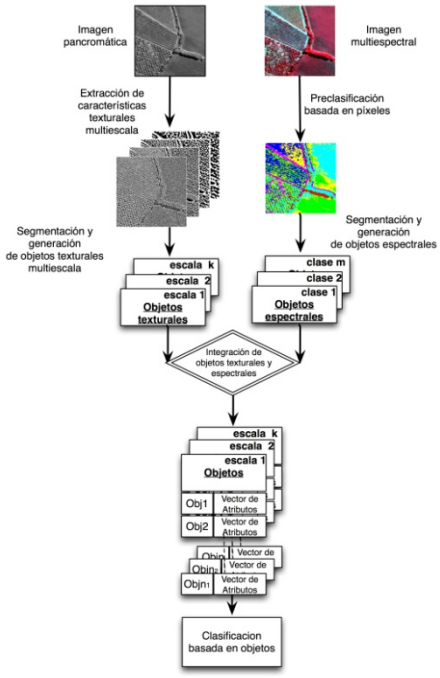


Figura 2: Esquema de la metodología propuesta para la definición y caracterización de los objetos.

Generación de los objetos multiescala

La mayor resolución espacial de la imagen pancromática frente a la multiespectral, justifica la definición de los objetos, desde el punto de vista morfológico y textural a partir de la información proporcionada por esta imagen. Sin embargo, y con objeto de eliminar la información espectral de la imagen pancromática en el proceso de definición de los objetos, se propone realizar esta definición, no sobre la imagen directamente, sino sobre los coeficientes obtenidos mediante la transformada multi-resolución Wavelet *à trous* (Dutilleux, 1987). Ello permite además definir los objetos a diferentes escalas. La escala o nivel de resolución a utilizar, dependerá de la imagen particular con la que se este trabajando, asi como el objetivo de la aplicación final.

Por otro lado y con objeto de disminuir la alta variabilidad espectral de imágenes de alta y muy alta resolución espacial, se propone determinar los objetos espectralmente homogéneos a partir de una imagen multiespectral pre-clasificada.

Ambos tipos de objetos, texturales y espectrales, se han obtenido mediante el algoritmo de segmentación basado en el método de Otzu (1979). Mediante este método es posible elegir un umbral óptimo, maximizando la varianza entre clases mediante una búsqueda exhaustiva en toda la imagen. La intersección entre estos dos tipos de objetos permite obtener objetos con un patrón de comportamiento espectral y textural diferenciador de otros objetos. Como resultado de este proceso, se obtiene n_k (k= número de niveles de coeficientes Wavelet utilizados) objetos para cada escala o nivel.

Caracterización de los objetos

Una vez determinados los objetos, su caracterización se lleva a cabo asociándole los atributos texturales y espectrales que se consideren mas adecuados para la escena objeto de estudio. De esta forma, cada objeto identificado, en cada una de las escalas, pasa a estar representado por las posiciones de los pixeles que lo integran, y un vector de atributos cuyo tamaño viene determinado por el número de atributos asocia-dos, proporcionando una representación conjunta y simplificada de la información contenida en las dos imágenes fuente.

RESULTADOS

La metodología descrita en la sección anterior e ilustrada en la Figura 2, se ha aplicado a las imágenes mostradas en la Figura 1. Se han generado los coeficientes Wavelet (*à-trous*) de la imagen pancromática para los tres primeros niveles. La imagen multispectral se ha clasificado mediante el método *k-means*, conteniendo 7 clases espectrales diferentes. La intersección entre los objetos texturales y espectrales ha dado lugar a un total de 2782, 350 y 260 objetos para cada uno de los niveles. A partir de estos objetos, se han llevado a cabo diferentes experimentos, caracterizándolos con distintos sub-conjuntos de atributos. Esta forma de representación de la información ha permitido reducir el número de datos a procesar de 1.310.720 (512x512x5) a 33.920, considerando los tres niveles y un número de atributos de 10.

La clasificación de estos objetos, se ha realizado utilizando un clasificador 1-D jerárquico ascendente mediante el método de Ward, considerando la norma euclidia como criterio de distancia.

En la Figura 3, se muestra el resultado de la clasificación (1-D) spectral y textural, para los tres niveles considerados, cuando los objetos se han caracterizado por el valor medio del nivel de gris del objeto, en cada una de las bandas de la imagen multiespectral; y el valor medio y la desviación estándar de los valores de los coeficientes Wavelet correspondientes a cada objeto en cada escala. Para una primera aproxi-mación, en esta clasificación, se le ha obligado al clasificador 1-D a identificar las 7 clases, sin embargo, como se puede observar en la Figura 3, es preciso hacer notar que al pasar a niveles superiores (menos detalle), el tamaño de los objetos va aumentando, representando patrones de comportamiento diferentes y por tanto representados por diferentes colores. Este efecto queda mejor ilustrado en la Figura 4, donde se han incluido ampliaciones de dos areas de la escena, para la imagen pancromática y cada uno de los niveles de los coeficientes Wavelet. En esta figura, se puede apreciar con detalle, como la metodología propuesta permite en el nivel mas bajo, la identificación de los objetos individuales (árboles), los cuales se van agrupando en el segundo nivel, hasta que el tercer nivel, proporciona una discriminación en clases espectrales mas generales, en este caso básicamente entre vegetación y suelo.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo permite la definición y caracterización de objetos asociados a una escena, de la que se disponga tanto de una imagen multespectral, como de la correspondiente imagen pancromática, de una forma sencilla y asequible.

El conjunto de los objetos definidos suponen una representación conjunta y simplificada de la información contenida en las dos imágenes fuente utilizadas. Esta representación facilita, tanto desde un punto de vista conceptual como computacional, el procesado de dicha información.

Los resultados preliminares de clasificación incluidos, tiene como objeto mostrar la potencialidad de la metodología propuesta, la cual debe ser depurada e investigada con mayor detalle en todas sus etapas.

BIBLIOGRAFÍA

BLASCHKE, T.& J. STROBL, 2001, *What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS*. GIS, 6, 12-17.

BRUCE, B. A., 2008, *Object oriented classification: case studies using different image types with different spatial resolutions*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (http://arrow.unisa.edu.au:8081/1959.8/64668)

DUTILLEUX, P., 1987, *An implementation of the algorithm à' trous to compute the wavelet transform.* In Compt-rendus du congre`s ondelettes et méthodes temps-fréquence et espace des phases, J. Combes, A. Grossman and Ph. Tehanitchian (Eds), 298–304 (Marseille: Springer-Verlag).

LANG, S., Y BLASCHKE, T., 2006, *Bridging remote sensing and GIS – what are the main supportive pillars?* En S. Lang, T. Blaschke y E. Schöpfer (Eds.), OBIA. 4-5 Julio, Salzburg, Austria.

OTSU, N., 1979, *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, 62-66.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen el soporte financiero de la Universidad Politécnica de Madrid (AL11-PI+D-27) y del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF-D09I1069).

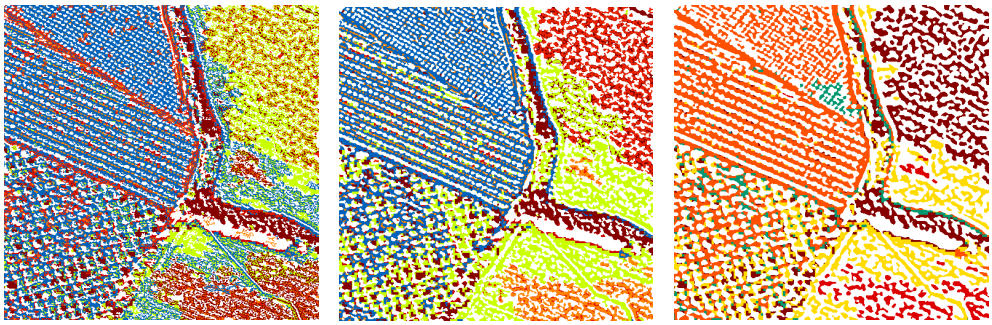


Figura 3: Imagen clasificada espectral y texturalmente para tres escalas diferentes y 6 atributos.

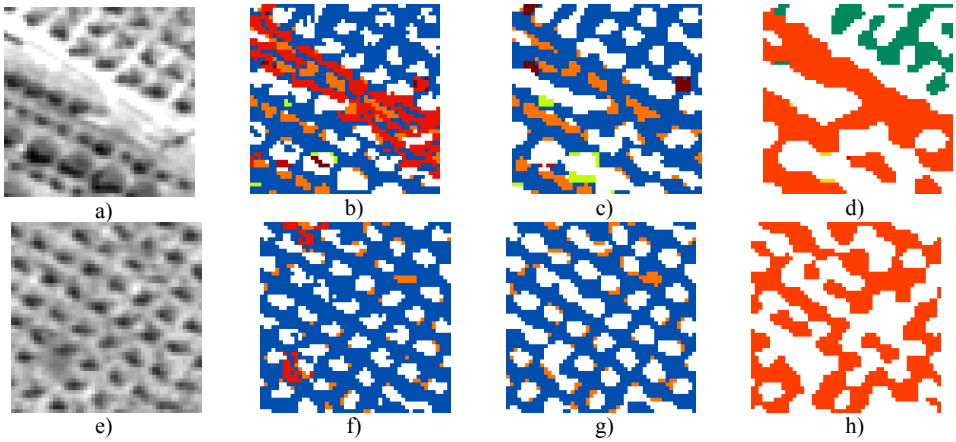


Figura 4: Zoom para dos localizaciones diferentes de la escena, para la imagen pancromática (1ª columna) y cada uno de los niveles de los coeficientes Wavelet (b) y f) 1er nivel, c) y g) 2º nivel y d) y h) 3er nivel)

Aplicabilidad del uso de un panel de PTFE (politetrafluroetileno) como blanco de referencia

M. Guillén[1], R. Montorio[2], F. Pérez-Cabello[2] y M. A. Casterad[1]

[1] Unidad de Suelos y Riegos (asociada a EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Avda Montañana 930, 50059 Zaragoza. E-mail: acasterad@aragon.es

[2] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. E-mail: montorio@unizar.es

RESUMEN

El teflón (politetrafluoroetileno. PTFE) es un material inerte, impermeable y flexible que no se altera por la acción de la luz. Su utilidad como panel de referencia ya se ha demostrado. Sus características y precio hacen que sea una alternativa cuando se necesitan paneles de referencia de ciertas dimensiones. En este trabajo se presentan ventajas e inconvenientes de usar un panel de teflón de 3 mm de grosor como panel de referencia. A partir de medidas de reflectividad realizadas con un espectro-radiómetro Ocean Optics 2000, en un rango de 400-900 nm, se determina el comportamiento espectral y la sensibilidad del panel de teflón en tres escenarios diferentes, sobre superficie blanca, lisa y homogénea (*Escenario 1),* superficie negra, lisa y homogénea *(Escenario 2)*; y superficie blanca, rugosa y heterogénea *(Escenario 3)*. Se constata que el espesor del mismo es insuficiente confiriéndole propiedades translúcidas y una flexibilidad que supone una pérdida de homogeneidad cuando la superficie base no es lisa. Pese a ello, el panel es una buena alternativa siempre y cuando se utilice en condiciones óptimas en términos de geometría de iluminación y observación. Los resultados obtenidos indican que la reflectividad del panel de teflón sobre fondo blanco es aproximadamente entre un 10% y 18% menor que la del Spectralon, dándose las mayores diferencias en el infrarrojo cercano.

Palabras clave: PTFE, panel de referencia, radiometría.

ABSTRACT

PTFE is an inert, impermeable and flexible material, not altered by the sunlight. Its usefullness as reference panel has already been tested. Due to its properties and low cost it is a good alternative when a large size panel is needed. This research shows the advantages and disadvantages of using PTFE as reference panel. R*eflectance measures have been taken using an Ocean Optics 2000 spectroradiometer in the 400-900 nm range. Three different scenes (1: white, smooth and homogenous surface; 2: black, smooth and homogenous surface; and 3: white, rough and heterogeneous surface) have been used for proving the spectral behaviour and the sensitivity of the PTFE panel. It has been shown that the thickness (3 mm) is not enough and the flexibility causes a loss of homogeneity when the surface is not plain. However, the PTFE is a good option when used under optimal illumination and observation geometric conditions. The results show that reflectance of the PTFE on a white surface is around 10-18% lower than the Spectralon, especially in the near infrared region.*

Keywords: *PTFE, reference panel, radiometry.*

INTRODUCCIÓN

En ocasiones para calibraciones radiométricas en campo y/o de sensores aeroportados se precisan paneles de referencia de grandes dimensiones (> 0.5 m^2). El precio de dichos paneles, si son estándar y están constituidos según las especificaciones del NIST (National Institute of Standards and Technology) es elevado por lo que se siguen buscando otras alternativas. Los paneles de teflón (politetrafluoroetileno, PTFE) son una de ellas (Camacho de Coca y col., 1999).

El objetivo de este trabajo es mostrar las ventajas e inconvenientes de usar un panel de teflón de 3 mm de grosor como panel de referencia. Para ello, se analiza su comportamiento espectral bajo distintos escenarios.

PROCEDIMIENTO

Con un espectro-radiómetro Ocean Optics HR2000 se han realizado medidas de reflectividad en campo sobre un panel cuadrado de teflón de 60 cm de lado y 3 mm de grosor. Se eligió un panel de estas características por su fácil manejabilidad en campo (peso y dimensiones adecuadas) y por su económico precio. Además, presenta la ventaja de poder limpiarse fácilmente al ser de un material lavable.

Aunque el rango de medida del espectro-radiómetro va de 200 nm a 1100 nm, se han seleccionado las longitudes de onda entre 400-900 nm por ser en las que se tiene seguridad de obtener medidas libres de ruido. Como panel de referencia se ha utilizado el estándar de referencia *Spectralon SRM-99 (Labsphere*, North Sutton, NH, USA).

Las medidas se realizaron próximas al mediodía solar el 14 y 25 de febrero de 2011. Para minimizar efectos ligados a la geometría de iluminación y observación, las medidas se tomaron con un campo de visión (FOV) de 25º desde el nadir y a una distancia de 5 cm. Los dos días fueron soleados y la radiación solar en el momento de medida, según datos semihorarios de la Estación Montañana (Zaragoza) de la red 'SIAR' próxima del área de estudio, era de 2.07 y 2.14 MJ m^{-2} h^{-1}. Esto supone respectivamente un 98.7% y un 94.6% de la radiación solar teórica.

Se establecieron tres escenarios diferentes para la evaluación del comportamiento del panel de teflón: *Escenario 1* superficie blanca, lisa y homogénea (conglomerado chapado con melamina blanca); *Escenario 2* superficie negra, lisa y homogénea (plástico negro grueso de alta densidad sobre Escenario 1); *Escenario 3* superficie blanca, rugosa y heterogénea (papel blanco sobre suelo irregular de tierra seca marrón). Las medidas radiométricas del teflón se tomaron colocando el mismo sobre cada uno de los escenarios descritos. Los espectros que presentan los distintos escenarios se muestran en la Figura 1.

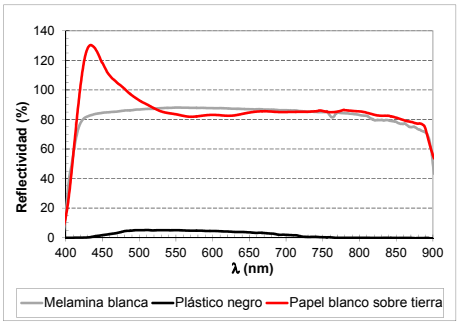


Figura 1: Espectros de los diferentes escenarios sobre los que se ha colocado el panel de teflón.

Sobre el *Escenario 1* se realizaron medidas en distintos puntos del teflón (Figura 2) para comprobar su homogeneidad a lo largo de su superficie.

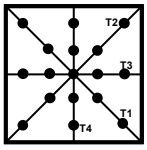


Figura 2: Esquema de los transectos (T) y puntos de medida (•) tomados en el panel de teflón.

RESULTADOS

En la franja horaria en la que se tomaron las medidas, la radiación solar del día 25 fue en torno a un 5% mayor que la del día 14. Sin embargo, con el ajuste de los parámetros de medición se obtuvieron configuraciones similares, tal como se muestra en las Figuras 3a y 3b que presentan las curvas de intensidad del Spectralon y del panel de teflón. Estos ajustes consisten en la sustracción de la corriente oscura, la configuración del tiempo de integración en función de las condiciones de iluminación y la realización de un promedio de espectros por cada medida, todo ello dirigido a obtener la mayor ratio señal/ruido posible.

Como puede apreciarse el comportamiento del teflón respecto al Spectralon es similar en ambos días, con diferencias de intensidad máximas del 8-10%.

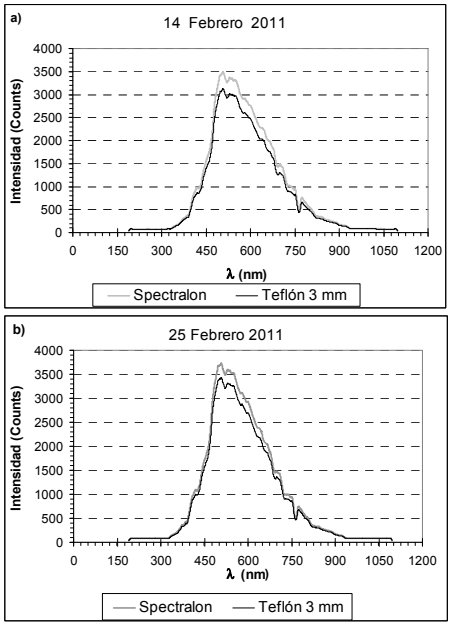


Figura 3: Curvas de intensidad.

En términos de reflectividad, los datos disponibles muestran que el panel de teflón (*Escenario 1*) es aproximadamente entre un 10-18% menor que la del Spectralon. Estas diferencias varían en función de la longitud de onda, siendo más acusadas en el infrarrojo cercano (Figura 4).

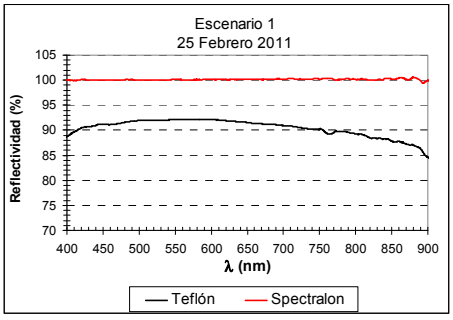


Figura 4: Reflectividad del panel de teflón obtenida con el estándar de referencia Spectralon. Comparación con el comportamiento perfectamente reflectivo del panel Spectralon.

Sobre el *Escenario 1* se realizaron tres medidas de reflectividad del panel de teflón en diferentes horas comprendidas en el periodo del máximo solar (11h, 12h y 13h), siendo las diferencias siempre menores al 3 %.

En la Figura 5a se muestran las variaciones en la reflectividad que se producen entre los *Escenarios 1* y *2*. La única diferencia entre ambos escenarios es el color del fondo, blanco y negro respectivamente. Se considera que la superficie registrada, de 2.2 cm de diámetro, no se ve afectada por la reflectividad difusa procedente de las superficies de cada escenario, debido a su reducida dimensión y su posición central en el panel de teflón (panel cuadrado de 60 cm de lado).

La curva de reflectividad presenta valores más bajos cuando el fondo es negro lo que indica que el panel de teflón es translúcido. Con el aumento de la longitud de onda se agudizan las diferencias en los valores de reflectividad, siendo éstas especialmente acusadas en el infrarrojo cercano.

Las curvas de reflectividad de los puntos del transecto 2 obtenidas en el *Escenario 1* (Figura 5b) son muy similares en su forma y valores de reflectividad. La mayor diferencia entre ellas no supera para ninguna longitud de onda el 10%, estando generalmente entre 3% y 6%.

Dado que todas las medidas se han tomado manteniendo la geometría de observación e iluminación los resultados obtenidos apuntan a que bajo estas condiciones el panel de teflón presenta un comportamiento uniforme en toda su superficie.

Sin embargo, cuando se sigue el mismo patrón de muestreo considerando el *Escenario 3* (Figura 5c) se observa heterogeneidad en el comportamiento del panel. Si bien las curvas de reflectividad son similares en cuanto a su forma, los valores registrados por los mismos puntos fluctúan en un orden de magnitud entre el 8 y 19%.

Estas diferencias se deben a las diferentes características de los *Escenarios 1* y *3* (lisa y rugosa, respectivamente).

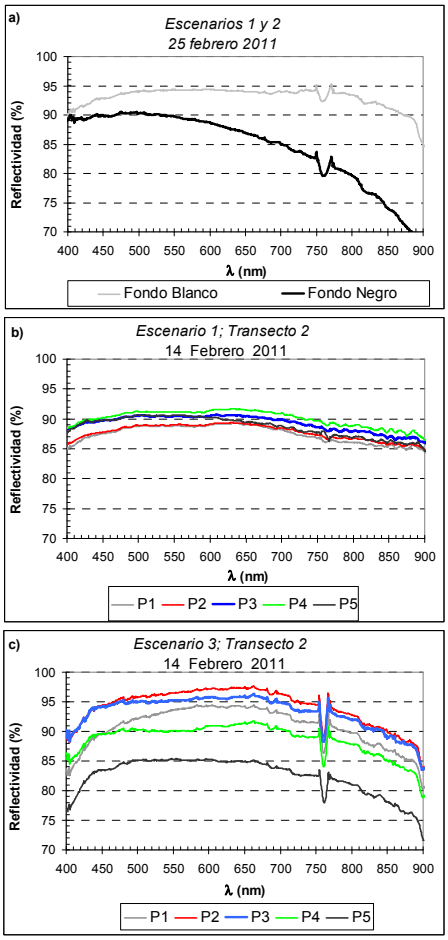


Figura 5: Reflectividad del teflón en *Escenario 1,* superficie blanca, lisa y homogénea; *Escenario 2,* superficie negra, lisa y homogénea; y *Escenario 3,* superficie blanca, rugosa y heterogénea**. a)** Comparación entre los escenarios 1 y 2; **b)** Reflectividad de los 5 puntos del transecto 2 en el escenario 1; y **c)** Reflectividad de los 5 puntos del transecto 2 en el escenario 3.

CONCLUSIONES

Se constata que los 3 mm de espesor del panel de teflón son insuficientes, confiriéndole propiedades translúcidas y una flexibilidad que implica una pérdida de homogeneidad cuando la superficie base no es lisa.

Pese a ello, el panel de teflón, dadas sus propiedades reflectivas, su bajo coste y su disponibilidad de tamaños, constituye una buena alternativa como panel de referencia siempre y cuando se disponga sobre una base lisa y se mida en condiciones óptimas en términos de geometría de iluminación y visión.

BIBLIOGRAFÍA

CAMACHO DE COCA, F., GILABERT M.A. y MELIÄ, J., 1999. U*tilidad del PTFE como panel de referencia en mediadas de radiometría*. En: Castaño y Quintanilla, (Ed.). Teledetección. Avances y Aplicaciones. pp 355-358. Asociación Española de Teledetección. I.D.R. Sección de Teledetección y S.I.G. Universidad de Castilla-La Mancha. Diputación de Albacete. 462 pp.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de actividades desarrolladas en los proyectos RTA08-083-C02-02 y AGL2009-12891-C02-02.

Recursos para trabajar las competencias genéricas en teledetección

J. Jorge

EPSEM. Departamento de Física Aplicada. Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Bases de Manresa, 61-73. 08242 Manresa (Barcelona, España). Correo electrónico: joan.jorge@upc.edu

RESUMEN

La investigación es estudio y, por ello, para ser investigador/a es necesaria una formación que te prepare para ello. En teledetección, como en el resto de campos científicos y tecnológicos, se debe aprovechar el nuevo paradigma docente que ha supuesto la llegada a las aulas universitarias del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), y detallar mejor los objetivos que se persiguen con cada una de las actividades docentes que se plantean a los estudiantes, delimitar el grado de profundidad que se requiere en cada una de ellas, así como identificar las capacidades que se trabajan y las pautas de evaluación que se van a aplicar. En esta comunicación se presentan algunos ejemplos de recursos docentes, en forma de listado de actividades, empleados por el autor en sus clases sobre teledetección a distintos niveles universitarios, y las competencias genéricas que pretende mejorar de sus alumnos.

Palabras clave: docencia, teledetección, competencias genéricas, EEES.

ABSTRACT

Researching is learning and, thus, an appropriate training is needed. In the remote sensing field, as in any other scientific and technological areas, we must take advantage of the new paradigm associated with the arrival of the European Higher Education Area (EHEA) to our university classrooms. We have to better detail the objectives to be attained by each of the educational activities proposed to the students; define the degree of depth required in each of those; and identify the capabilities that are trained and the assessment guidelines to be applied. In this communication some examples of educational resources are introduced in the form of list of activities used by the author in his lectures on remote sensing at different university levels, and the corresponding generic skills to be assimilated by the students.

Keywords: *teaching, remote sensing, generic skills, EHEA.*

INTRODUCCIÓN

Con la declaración conjunta de los ministros europeos de educación reunidos en Bolonia el 19 de junio de 1999 se daba inicio a todo un proceso de armonización del conocimiento en Europa. Dicho proceso, la construcción del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), no ha sido muy bien comprendido por parte de los principales actores, es decir, profesores y estudiantes. Si se comparten experiencias docentes en la línea propuesta, como trata esta comunicación, será más fácil que se comprenda.

El EEES supone un reto muy importante para la universidad, porque implica la implementación de un nuevo paradigma. En el nuevo modelo de aprendizaje, el estudiante es el centro del proceso y las titulaciones se diseñan en función de las competencias que debe asimilar. En este marco, los estudiantes brillantes no sólo serán los que obtengan buenas calificaciones, sino que además deberán destacar para tener habilidades como son la capacidad de autoaprendizaje, de liderazgo o de constancia en el trabajo.

Dado que la investigación también es estudio, para ser investigador se necesita adquirir una formación que prepare para ello, y dicha preparación debe seguir los mismos pasos que la destinada a capacitarnos para cualquiera otra profesión. Un investigador deberá adquirir, en consecuencia, unas competencias genéricas que en paralelo con las competencias específicas del área de estudio, le permitan tener éxito en su trabajo individual y en el colectivo. Este razonamiento ampara que se presente una ponencia dedicada a la formación en un congreso de teledetección, donde la presentación de trabajos de investigación es la dominante.

Se parte de la hipótesis de que todo individuo tiene unas capacidades básicas, o potencialidades inherentes a la persona, que se desarrollan de

forma progresiva y forman parte del proceso de aprendizaje, pudiendo ser de mayor o menor complejidad y que se evidencian en la ejecución de diversas tareas (habilidades); así se argumenta en los decretos referidos a dichas competencias genéricas en educación secundaria (BOE, 2007).

A continuación se presenta el concepto de competencia genérica, y cuáles de ellas cabe potenciar en la universidad, y en la investigación.

COMPETENCIAS GENÉRICAS

Fomentar las *competencias* es uno de los objetos de los programas educativos actualmente, es decir, promocionar la *combinación dinámica de conocimiento, comprensión, capacidades y habilidades*. Las competencias se forman en varias unidades del curso y son evaluadas en diferentes etapas. Los programas formativos tienen que trabajar tanto las competencias específicas -relacionadas con un campo de conocimiento y una actividad profesional concreta-, como las genéricas, que tienen carácter transversal porqué son aplicables a diversos campos de conocimiento y son necesarias para cualquier acción profesional (GLOSUPC).

Las competencias genéricas son apropiadas para la mayoría de las profesiones y están relacionadas con el desarrollo personal y la formación orientada a la comunidad. En Tuning Project (2006), proyecto de la UE creado con el objetivo de contribuir significativamente a la creación del EEES, se proponen las que figuran en la tabla 1. En la primera columna se muestra la notación utilizada más tarde en el listado de recursos docentes que se presentan, y con fondo resaltado aparecen las competencias elegidas en la UPC para ser tratadas con especial dedicación.

METODOLOGÍA Y RECURSOS

En la docencia de teledetección que el autor ha impartido en la UPC, a todos los niveles, con asignaturas obligatorias, optativas y de libre elección, ha utilizado diferentes "recursos" docentes (didácticos sería el calificativo más apropiado), unos extraídos de la bibliografía al uso, otros como adaptaciones propias según la titulación de los estudiantes, y muchos otros ideados específicamente, que le han permitido trabajar con los estudiantes esas competencias genéricas de manera inconsciente y que ahora deben ser concretadas (ver Tabla 2).

COMPETENCIAS INSTRUMENTALES	
I1	Capacidad de análisis y de síntesis
I2	Capacidad de organizar y planificar
I3	Conocimientos generales básicos
I4	Conocimientos básicos de la profesión
I5	Comunicación oral y escrita en la lengua propia
I6	Conocimiento de una segunda lengua
I7	Habilidades básicas en el manejo del ordenador
I8	Habilidades de gestión de la información
I9	Resolución de problemas
I10	Toma de decisiones
COMPETENCIAS INTERPERSONALES	
P1	Capacidad crítica y autocrítica
P2	Trabajo en equipo
P3	Habilidades interpersonales
P4	Capacidad para trabajar en un equipo interdisciplinar
P5	Capacidad para comunicarse con personas de otras áreas
P6	Apreciación de la diversidad y multiculturalidad
P7	Habilidad para trabajar en un contexto internacional
P8	Compromiso ético
COMPETENCIAS SISTÉMICAS	
S1	Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica
S2	Habilidades de investigación
S3	Capacidad para aprender
S4	Capacidad para adaptarse a nuevas situaciones
S5	Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad)
S6	Liderazgo
S7	Conocimiento de culturas y costumbres de otros países
S8	Habilidad para trabajar de forma autónoma
S9	Diseño y gestión de proyectos
S10	Iniciativa y espíritu emprendedor
S11	Preocupación por la calidad
S12	Motivación de logro

Tabla 1: Competencias genéricas
(Fuente: Informe del proyecto Tuning, 2006)

Actividad	Objetivo: que el estudiante sea capaz de…	Materiales	Competencia (ver tabla 1)
INTRODUCCIÓN			
Evaluación inicial	identificar su interés inicial por la TD	Test 0: preguntas para confeccionar un itinerario curricular del estudiante en TD	I3, I10, S10
Historia	descubrir el dinamismo de la TD	Preguntas: ¿último satélite de OT en órbita? ¿un astronauta distingue la Gran Muralla china?	I1, I5, I8, S2
ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN: FUNDAMENTOS FÍSICOS, PLATAFORMAS Y SENSORES			
Conceptos	definir, identificar y relacionar conceptos	Diccionario/glosario Test relacional	I1, I3, I5, I6, S3
Leyes de la radiación	reconocer las leyes físicas base de la TD	Ejercicios numéricos (representaciones gráficas) Calibrado de sensores	I3, I9, S1
Firma espectral	reconocer diferencias de comportamiento espectral de materiales	Elaboración de gráficos a partir de librerías espectrales, medidas de laboratorio, medidas en el campo y simulaciones	I3, S2
Interacción rad-atm	caracterizar el medio entre emisor y receptor	Videos Trabajo de laboratorio (montaje instrumental)	I9, S1
Órbitas	entender las leyes de Kepler y diferenciar las órbitas para la OT	Pregunta: ¿por qué flotan los astronautas? Ejercicios numéricos y de simulación Videos	I1, I9, S1
TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN (SOFTWARE, IMÁGENES)			
Nivel de gris	entender la conversión A/D y los histogramas	Ejercicio manual (adaptado de CCRS) Formatos BSQ, BIL, BIP. Histograma	I3, S1, S8
Bit-bit-bit	entender el lenguaje básico de los PC	Ejercicio numérico: de cambio de base (resolución radiométrica)	I3, I9, S4
Interpretación visual	reconocer texturas, sombras, patrones,…, en una imagen	PC: puzzle; imágenes anaglifo (3D) + gafas Fotos impresas en papel (proyecto EarthKam) Fotografías aéreas + estereoscopio de bolsillo	I6, I10, P2
Luz de colores	aprenda a combinar colores y distinga color real de falso color	Ejercicios gráficos: dibuja la bandera de tu país con los colores oficiales; reproduce la leyenda de colores de las clases del proyecto CORINE Ejercicio numérico: cálculo del OIF	I8, I9, S7
Georeferenciación	identificar la escala de trabajo	Software Imágenes de diferente resolución espacial Cartografía y trabajo de campo	I7, I9, P2, S1
Transectos	descubrir la utilidad de trazar transectos	Software Mapa de elevaciones / térmico / radiación solar	I7, P2
Precisión de clasificación	evaluar una clasificación cuantitativamente	Ejercicio numérico: matriz de confusión	I7, I9, S1
El software	manipular con soltura un software libre y básico	Tutorial de software libre (Bilko, LeoWorks,…)	I6, I7, S8
Detección de cambios	aplicar los conocimientos teóricos	Software Imágenes de satélite y cartografía	I3, I7, I9, P2, S1, S3
La estación receptora	identificar los elementos de una estación receptora	Estación receptora (sounders & imagers)	I6, P2, S5
APLICACIONES (ESPECÍFICAS DE LA TITULACIÓN Y OTRAS)			
Costes	valorar el compromiso entre costes y objetivos	Cálculo de costes: ha/€	P2, S10
Las noticias	consultar la prensa diaria	Noticias de la prensa	I8, S7, S8
Geografía	identificar lugares geográficos	Concurso en clase Autoevaluación: web interactiva	I1, P2, S7
Termografía IR	identificar aplicaciones basadas del IRt	Videos Laboratorio: mando TV, tel. móvil, cámara IR	I3, P2
Proyectos de clase	identificar el nivel del proyecto que se le solicita	Identificar la estructura de trabajos de otros estudiantes	P2, S5, S11
Tema preferido	elegir una aplicación a profundizar	Búsqueda bibliográfica (y de webs) en revistas, la biblioteca e Internet (web AET)	I8, I,10, S2
Revistas	identificar las principales revistas de teledetección	Acceso a las bases de datos de la biblioteca (revistas indexadas)	I8, S8

EVALUACIÓN (TEORIA, PRÁCTICA, PROYECTO)			
Autoevaluar	identificar su progreso	Test	P1, S3
Lo más importante	reconocer cuáles son los conocimientos mínimos	Preguntas y ejercicios numéricos: teoría Preguntas y ejercicios informáticos: práctica	I3, I4, I7
Proyecto de aplicación	aplicar los conocimientos a un caso real	Revistas , biblioteca Bases de datos e imágenes	I2, I3, I5, I7, I8, S9, S10
Repaso	reconocer si aprende	Pregunta al acabar la clase	P1, S12

Tabla 2: Listado de actividades sobre teledetección y competencias genéricas que se trabajan en ellas.

Como puede verse en la tabla anterior las actividades se agrupan bajo cinco apartados: introducción; adquisición de la información; tratamiento de la información; aplicaciones y evaluación. No se ha explicitado en la tabla otros detalles docentes que también son contemplados, y concretados por el profesor, tales como si el formato es presencial o no; si la actividad se realiza individualmente o en equipo; el nivel docente al que va dirigida la actividad (casi siempre para todos los niveles); ni la forma de evaluación del progreso del estudiante.

De los aspectos complementarios acabados de referir merece hacer una atención adicional mínima al tema de cómo se hace la evaluación. La calificación se realiza habitualmente mediante la matriz de valoración de la tabla 3 o mediante otras rúbricas específicas creadas mediante pautas convencionales (RubiStar).

C	Descripción
5	Demuestra total comprensión del problema. Todos los requerimientos de la tarea están incluidos en la respuesta.
4	Demuestra considerable comprensión del problema. Todos los requerimientos de la tarea están incluidos en la respuesta.
3	Demuestra comprensión parcial del problema. La mayor cantidad de requerimientos de la tarea están comprendidos en la respuesta.
2	Demuestra poca comprensión del problema. Muchos de los requerimientos de la tarea faltan en la respuesta.
1	No comprende el problema.
0	No responde. No intentó hacer la tarea.

Tabla 3: Matriz de evaluación comprehensiva.

Todos las actividades listadas no se hacen cada curso; piénsese que un recurso puede ser una "oportuna" pregunta del día a día (cada día las noticias son diferentes), una filmación (la calidad, formato y disponibilidad de las mismas también varía), la aplicación de software libre (cada día más completos),… Con esta no repetitividad se favorece que el estudiante diseñe su itinerario personal de la asignatura; que profundice más en los aspectos teóricos que en los prácticos, o que decida sacarle mejor partido a las fotos que capta el fin de semana.

CONCLUSIONES

En docencia de la teledetección hay muchas posibles actividades a realizar, y bien catalogadas permiten elegir la competencia genérica que queramos potenciar en los estudiantes.

BIBLIOGRAFÍA

BOE núm. 5, 2007. R.D. 1631/2006 por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la Educación Secundaria Obligatoria.

BOE núm. 226, 2007. R.D. 1467/2007 por el que se establece la estructura del bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas.

GLOSUPC Glossari de l'espai europeu d'educació superior. UPC http://www.upc.edu/slt/glosEEES/ (consultada 16.05.2011)

RubiStar. http://rubistar.4teachers.org/ (consultada 16.05.2011)

Tuning Project, 2006. Tuning Educational Structures in Europe II. La contribución de las universidades al proceso de Bolonia. Julia González (ed.). Universidad de Deusto, Bilbao.

AGRADECIMIENTOS

A todos los estudiantes que han sido objeto de mis experimentaciones docentes.

Calibración en vuelo del sensor a bordo del satélite DEIMOS-1

F.J. Lozano, C. Moclán y J. Gil

DEIMOS Imaging SL. Parque Tecnológico Boecillo, Edif. Galileo, Módulo Gris, Oficina 103, 47151 Boecillo (Valladolid), España. Correo electrónico: info@deimos-imaging.com

RESUMEN

Las actividades de calibración y validación, también conocidas como actividades cal/val, son elementos clave para asegurar la utilidad de los datos obtenidos por instrumentos a bordo de satélites. El Sistema de Observación de la Tierra DEIMOS-1 cuenta con un instrumento óptico multiespectral caracterizado por una arquitectura de dos bancos. Los sensores a bordo del DEIMOS-1 son objeto de análisis periódicos que buscan garantizar la calidad y fiabilidad de los datos obtenidos. Estos análisis comprenden la calibración relativa, absoluta y la inter-calibración con otros sensores, así como la validación. Los resultados obtenidos muestran niveles de error muy bajos en los tres casos.

Palabras clave: calibración relativa, calibración absoluta, inter-calibración de sensores, validación

ABSTRACT

Calibration and validation efforts, also referred to as cal/val efforts, are key elements when ensuring the utility of the observations collected by instruments on-board satellites. DEIMOS-1 Earth Observation System relies on an optical multispectral instrument, characterized by a double-bank architecture. On-board sensors are subject of periodic analysis that aims to guarantee the quality and reliability of the acquired datasets. These analyses comprise relative and absolute calibration as well as cross-calibration with other sensors and validation analyses. Obtained results show very low error rates in all the cases.

Keywords: *relative calibration, absolute calibration, sensor cross-calibration, validation*

INTRODUCCIÓN

Las actividades de calibración y validación, también conocidas como actividades cal/val, son elementos clave para asegurar la utilidad de los datos obtenidos por instrumentos a bordo de satélites. Esto es debido a la necesidad de poder transformar los niveles digitales de la imagen original en valores absolutos de una determinada magnitud física. Esta capacidad, a su vez, permite asegurar la comparabilidad de las observaciones en el espacio (dentro de una misma imagen), en el tiempo (para dos o más imágenes adquiridas en distintas fechas), e incluso entre observaciones obtenidas por diferentes sensores. Por ello, las actividades calibración y validación son una pieza central del sistema de control de la calidad de los productos de un sistema de observación de la tierra.

El proceso que permite realizar estas labores es conceptualmente simple: definir de manera numérica la respuesta del instrumento ante una señal de entrada conocida y perfectamente caracterizada, de tal modo que sea posible establecer estándares de referencia que permitan convertir la señal original captada en valores de una magnitud física. Los procesos de calibración y validación de sensores se pueden clasifican conforme a: (i) cuándo se realizan los análisis, (ii) cual es su finalidad específica y (iii) en qué datos se basan. Así, se habla de calibración anterior (o en tierra) o posterior (o en vuelo) al lanzamiento del satélite. Con respecto a la finalidad específica, se distinguen entre calibración relativa, que busca generar una respuesta uniforme y coherente de todos los detectores del sensor, y calibración absoluta, que es la que permite convertir las observaciones en radiancias. Por último, la calibración puede utilizar datos medidos en campo o bien imágenes de otros sensores.

Este artículo detalla el proceso metodológico definido e implementado para la calibración en vuelo del instrumento a bordo del DEIMOS-1. Antes de describir dicho proceso se presenta una breve descripción del sistema DEIMOS-1 para una mejor comprensión del contexto de las actividades.

SISTEMA DEIMOS-1

En Octubre de 2006, DEIMOS Imaging SL (DMI) y Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), compañía inglesa especializada en el diseño y fabricación de plataformas satelitales, firmaron un contrato para el desarrollo de un satélite de observación de la Tierra, DEIMOS–1.

El satélite fue lanzado en 2009, formando parte de la ya existente y operacional constelación DMC (Disaster Monitoring Constellation). La constelación DMC es una colaboración internacional, única hasta el momento, formada por Argelia, China, Nigeria, Turquía, Reino Unido y España tras el lanzamiento del DEIMOS-1. DEIMOS Imaging SL es el único propietario del satélite DEIMOS-1. Además opera y expltoa comercialmente de manera autónoma el satélite DEIMOS-1.

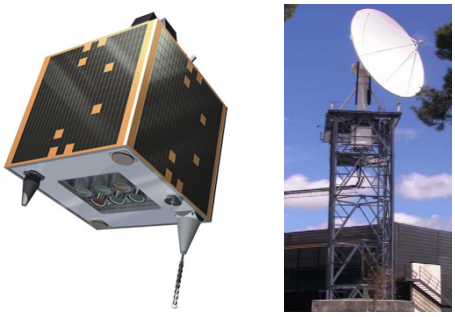


Figura 1: Elementos significativos del Sistema de Observación de la Tierra DEIMOS-1. *De izquierda a derecha:* **a)** Satélite DEIMOS-1; **b)** Antena del sistema terreno localizada en las instalaciones de Boecillo.

El DEIMOS-1 incorpora numerosas mejoras en referencia a la primera generación de satélites de la constelación DMC, surgidas de usar una nueva plataforma, la SSTL-100. También incluye cambios de diseño que incluyen:

1) Downlink en banda X a 40Mbit/s. Anteriormente la velocidad era de 8Mbit/s.

2) Mayor capacidad, mayor profundidad de descarga, densidad de energía más alta, y vida más larga al cambiar la batería de NiCd por una de Li-ion

3) Mejora en el GSD en nadir: 22m. Anteriormente el GSD era de 32m.

4) Mejora en la lente utilizada.

5) Mejora en la cuantificación, parametrizable entre 8 y 10 bit. Anteriormente únicamente se contemplaba 8 bits.

6) Se mantiene la masa, el tamaño y el consumo eléctrico de la primera generación

La carga útil de DEIMOS-1 está compuesta del sensor SLIM6 (Surrey Linear Imager Multispectral 6 channels) y está diseñado para proveer imágenes de alta resolución de la superficie de la Tierra con dos bancos de tres bandas espectrales: NIR, Red y GREEN. La arquitectura del instrumento se basa en dos bancos con sus respectivas cámaras.

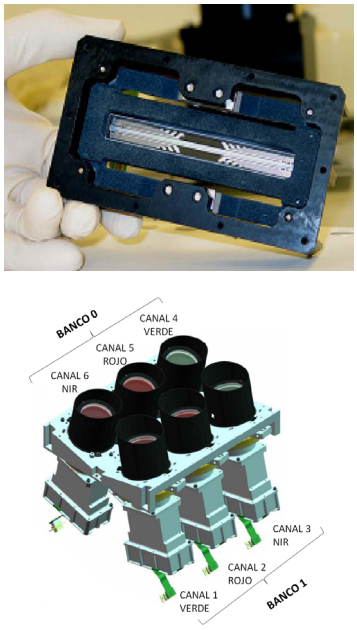


Figura 2: carga útil de DEIMOS-1. *De arriba a abajo:* **a)** array de detectores CCD; **b)** la arquitectura del instrumento (SLIM6) se basa en dos bancos con sus respectivas cámaras.

METODOLOGÍA DE CALIBRIACIÓN

Calibración relativa

Con el fin de ecualizar la respuesta de los 14,406 detectores que conforman cada bancada del sensor, se utilizan observaciones sobre blancos homogéneos espacialmente. La ecualización se basa en la identificación de una función lineal que caracterice el rango dinámico de valores espectrales incluidos en las imágenes. Por tanto, se utilizan dos blancos de calibración relativa: uno con valores muy bajos y otro con

valores muy altos. De esta manera se construye la llamada recta del rango dinámico.

Con respecto al blanco con valores bajos, se tomaron imágenes sobre el Pacífico en eclipse, es decir sin iluminación directa del sol. Los valores obtenidos permitieron la determinación de los niveles de respuesta de los sensores en ausencia de señal y la estimación el valor de "bias" o error. Esta medida permitió estimar el ruido intrínseco del sensor tras el lanzamiento en 2009.

Para la caracterización de la respuesta ante valores altos se utilizó Dome-C, una localización de la Antártida (Figura 3). Dada la anisotropía con respecto a la luz de la nieve y con el fin de compensar este efecto, se procedió a girar la plataforma en "yaw" de manera que el array de sensores quedara paralelo al plano principal solar y todos los elementos del array recibieran señal del suelo iluminado bajo el mismo ángulo solar. Esta estrategia permite aislar las causas de error debidas al instrumento en sí. Este ejercicio se repite anualmente en fechas cercanas al solsticio de invierno con el fin de monitorizar el comportamiento relativo de los detectores.

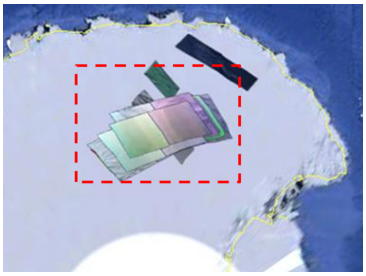


Figura 3: Dome-C en la Antártida. Se muestran los quicklooks de algunas de las imágenes DEIMOS-1 tomadas sobre la zona

Calibración absoluta

La calibración absoluta se basa en realizar medidas de radiancia in situ en lugares con características concretas de homogeneidad y de respuesta de la cubierta terrestre (CEOS, 2011). De este modo es posible calcular los parámetros de calibración que permiten la transformación de niveles digitales en valores de radiancia.

En el caso de DEIMOS-1, se optó por utilizar el lago salado de Tuz Gölü, en Turquía, que es uno de los lugares oficiales designados por el comité Cal/Val de CEOS (CEOS, 2011). Las actividades incluyen la caracterización de las propiedades espectrales del propio lago y de las condiciones atmosféricas, con el fin de estimar la radiancia TOA en el momento de captura de las imágenes de calibración sobre los blancos citados. Este tipo de campañas se realizan anualmente. Hasta ahora se han llevado a cabo en Agosto de 2009, en colaboración con otros miembros de la DMC, y en Agosto de 2010 a través de la CEOS Land Comparison 2010, que incluyó además de a DMC a otras siete Instituciones Espaciales (CMA, CNES, ESA, JAXA, KARI, NASA, USGS). Puesto que la calibración absoluta inicial ya permite convertir de manera fiable las observaciones en valores de radiancia, las campañas posteriores (eg. 2010), pueden considerarse como actividades de validación, útiles para monitorizar en el tiempo la fiabilidad de los valores registrados.



Figura 4: Imagen del satélite DEIMOS-1 sobre el lago salado Tuz Gölü en Turquía, blanco utilizado para la calibración absoluta.

Inter-calibración con otros sensores

La inter-calibración con otros sensores tiene un objetivo doble: seguimiento de la tendencia de degradación del sensor y asegurar la comparabilidad con otras fuentes de datos para así habilitar servicios de información multiplataforma, es decir, que hacen uso de imágenes obtenidas por varios instrumentos.

La metodología se basa en la adquisición de datos sobre un banco pseudo-invariante localizado en el desierto libio (Figura 5). Esta zona, conocida como "Libya4" es, al igual que el lago salado Tuz Gölü, un blanco designado por CEOS. La adquisición se coordina con otras misiones de observación de la tierra, básicamente DMC y Landsat, y se lleva a cabo con una frecuencia de 15 días. Posteriormente se comparan las reflectancias corregidas atmosféricamente. De esto modo es posible evaluar de manera numérica y fiable una posible deriva del sensor, así como la inter-comparabilidad con otras fuentes de datos similares.

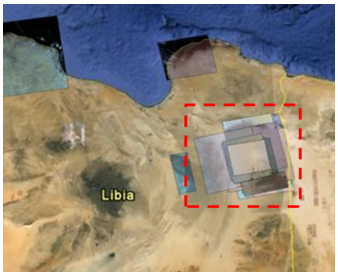


Figura 5: Libia 4, lugar pseudo-invariante definido por la iniciativa CEOS.

RESULTADOS

La calibración relativa consiguió ecualizar la respuesta de los detectores del sensor, homogeneizando así su respuesta. La situación anterior a la calibración estaba caracterizada por un comportamiento disimilar tanto en la zona del Pacífico como en la Antártida (Figura 6). Los análisis posteriores no muestran desviaciones significativas. En cuanto a la calibración absoluta, las campañas realizadas en 2009 y 2010 han concluido que el error en la estimación del valor de la radiancia se sitúa por debajo del 5% para todas las bandas.

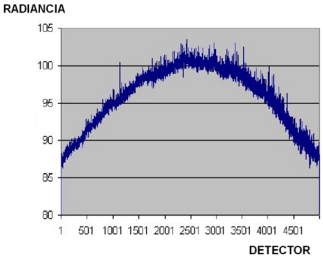


Figura 6: Valores de radiancia medidos por cada detector antes de la calibración relativa en la Antártida.

Por último, la inter-calibración con otros sensores obtuvo valores de error por debajo del 2%. En el caso de Landsat, el error relativo es muy poco variable y se sitúa en todos los casos entre el 1% y 2%. Esto facilita la utilización conjunta de diferentes fuentes de datos, tal y como concluyen estudios específicos realizados (Figuras 7 y 8).

CONCLUISONES

La calibración relativa inicial consiguió ecualizar la respuesta de los detectores que componen el sensor, mientras que análisis posteriores no muestran desviaciones significativas. La calibración absoluta obtuvo errores muy bajos para todas las bandas (<5%), lo que garantiza la utilidad de los datos para métodos y modelos numéricos. En el caso de la inter-calibración con otros sensores los resultados son muy positivos, siendo la diferencia con las estimaciones derivadas de Landsat de tal solo 1 a 2%. Otros estudios comparativos con SPOT-5 también obtuvieron altos grados de similitud. Estos resultados refuerzan la posibilidad de llevar a cabo aproximaciones multi-plataforma para la provisión de servicios de geo-información. En esta línea, hay que destacar el actual desarrollo y futuro lanzamiento de DEIMOS-2, un satélite de muy alta resolución, que abre un atractivo abanico de posibilidades para la provisión de servicios de información basados en imágenes de satélite.

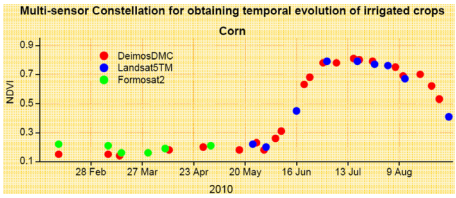


Figura 7: Comparación de los valores del índice NDVI obtenidos para un mismo punto en diferentes fechas por tres misiones diferentes. (Fuente: www.idr-ab.uclm.es).

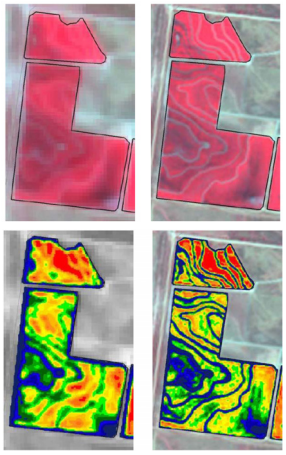


Figura 8: Comparativa gráfica de los valores de reflectancia (*arriba*) y NDVI (*abajo*) obtenidos por DEIMOS-1 (*izquierda*) y SPOT-5 (*derecha*). (Fuente: Astrium Geo-Services).

BIBLIOGRAFÍA

CEOS Cal/Val Site, 2011: http://calvalportal.ceos.org/cvp/web/guest

Identificación y análisis de técnicas de fusión en imágenes de satélites de muy alta resolución

J. Marcello[1], A. Medina[1], D. Rodríguez[1] y F. Eugenio[1]

[1] Departamento de Señales y Comunicaciones. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Campus de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria (Las Palmas, España). Correo electrónico: fmarcello@dsc.ulpgc.es

RESUMEN

El estudio y desarrollo de una herramienta que implementa diferentes algoritmos de fusión de imágenes ha permitido generar imágenes multiespectrales con el nivel de detalle espacial de una imagen pancromática. Estas técnicas han mejorado considerablemente la precisión y robustez de los resultados obtenidos utilizando dichas imágenes en diferentes aplicaciones de teledetección. Asimismo, se ha requerido aplicar previamente una serie de técnicas de preprocesado como son: registrado, ajustes de histograma, interpolación, etc. Finalmente, se han implementado una serie de índices que nos permiten medir de forma cuantitativa la calidad de los resultados.

Palabras clave: fusión, *pansharpening*, alta resolución, GeoEye-1, Ikonos, Quickbird.

ABSTRACT

The study and development of a tool that implements several image fusion algorithms has allowed the generation of multispectral images with spatial resolution accuracy as the panchromatic. These techniques have considerably improved the results accuracy and robustness obtained allowing the use of such images in different remote sensing applications. Also, pre-processing techniques such as registration, histogram adjust and interpolation have been applied as prior requirement. Finally, a set of indexes that allows quantitative measurements of results have been implemented.

Keywords: *fusion, pansharpening, high resolution, GeoEye-1, Ikonos, Quickbird*.

INTRODUCCIÓN

La aparición y el continuo perfeccionamiento de los sensores de alta resolución se traducen en un mayor nivel de detalle y de información en las imágenes captadas, lo que ha generado un incremento en su utilización en muchas áreas de aplicación (agricultura, urbanismo, mapas topográficos, etc.). Las imágenes se toman en varias bandas del espectro electromagnético, y en varias resoluciones espaciales, temporales y radiométricas.

La mayoría de sensores de alta resolución proporcionan una imagen pancromática de alta resolución espacial con una sola banda ancha, y una imagen multiespectral generalmente formada por 4 bandas de baja resolución espacial y de banda más estrecha. Con el objeto de mejorar la precisión de los datos recibidos han aparecido un conjunto de metodologías de fusión de la imagen pancromática con las imágenes multiespectrales.

El objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de una herramienta de fusión de imágenes, que aunque orientada a fines formativos también ha sido aplicada en estudios de investigación. Se han implementado diferentes técnicas de preprocesado y algoritmos de fusión con los que se ha conseguido obtener imágenes multiespectrales de alta calidad espacial. Además, en la herramienta se han incluido diversos índices de calidad para evaluar las prestaciones de cada técnica de fusión.

ALGORTIMOS DE FUSIÓN

La fusión de imágenes se puede realizar a tres niveles de procesado diferentes (Zhang, 2010): a nivel de píxel, a nivel de objeto y a nivel de decisión. Las técnicas de fusión implementadas y evaluadas en este trabajo son las realizadas a nivel de píxel.

En la actualidad se dispone de un gran número de metodologías y algoritmos para este tipo de fusión (Mitchel, 2010; Stathaki, 2008), siendo las más populares las basadas en operaciones aritméticas como la transformada Brovey, *Synthetic Variable Ratio* o *Ratio Enhancement* y las basadas en la transformada Análisis de Componentes Principales (PCA) o en la transformada Intensidad-Brillo-Saturación (IHS) y variantes. El uso de estos algoritmos está muy extendido, dada la baja complejidad computacional que presentan. Sin embargo, proporcionan imágenes fusionadas con baja calidad espectral lo que impide su uso eficiente en aplicaciones basadas en la clasificación de imágenes o en la detección de cambios. Para solventar estas limitaciones han surgido métodos basados en técnicas de Análisis Multiresolución (Amolins *et al*. 2007), que utilizan fundamentalmente la Transformada Wavelet Discreta (TWD). Además, otras transformadas como Curvelets, Ridgelets, Contourlets, se han propuesto como alternativas más eficientes desde el punto de vista de la representación de la información que la TWD. El inconveniente que presentan estos métodos es que son computacionalmente muy complejos. Cada uno de los algoritmos expuestos tienen sus limitaciones y ventajas, así la estrategia seguida ha sido combinar diferentes esquemas de fusión que puedan lograr una mejor calidad de los resultados. Por ejemplo, algunos investigadores han combinado con éxito la transformada IHS y la transformada wavelet para intentar conseguir mejores resultados espaciales y espectrales (Hong y Zhang, 2008). Por otro lado se han desarrollado algoritmos basados en técnicas que permiten controlar el compromiso entre la calidad espacial y la espectral (Lillo-Saavedra y Gonzalo, 2010) en las imágenes fusionadas, a partir de la medida de una serie de índices de calidad (como medidas estadísticas, error cuadrático medio, relación señal a ruido, etc.). También se han definido algoritmos de fusión basados en las respuestas espectrales de los sensores (González-Audicana *et al.* 2006), sin embargo estos dependen considerablemente del grado de solapamiento entre los anchos de bandas de las diferentes bandas espectrales del sensor.

Dada la amplia variedad de técnicas de fusión existentes, lo adecuado es utilizar aquella que favorezca las propiedades de la imagen que queramos mejorar, teniendo en cuenta la aplicación concreta a la que va a ser destinada la imagen fusionada y el coste computacional de su implementación.

ÍNDICES DE CALIDAD

La evaluación de la calidad de la imagen fusionada ha sido un tema muy discutido entre los investigadores y los usuarios de los productos fusionados. Generalmente, en las publicaciones científicas, los criterios que se utilizan para medir la calidad se dividen en dos categorías diferentes:

(i) Medidas Cualitativas, que implican la comparación visual del color entre la imagen multiespectral y la fusionada y del detalle espacial entre la imagen pancromática y la fusionada.

(ii) Medidas Cuantitativas, que implican un conjunto de índices de calidad definidos para medir la similitud espectral y espacial entre las imágenes originales y la fusionada.

Para obtener medidas cuantitativas de la calidad se han definidos diversos métodos pero aun no se ha llegado a un consenso para definir un método de evaluación común aceptable en todas las situaciones. Básicamente los métodos de evaluación cuantitativa pueden ser agrupados en base al aspecto que se pretende medir. Así se distinguen índices para medir la calidad espectral, la calidad espacial, o la evaluación de la calidad espacial y espectral simultáneamente.

A continuación, se enumeran los índices de calidad cuantitativos más usuales para evaluar la calidad de las imágenes fusionadas (Lillo-Saavedra *et al*., 2011): coeficiente de correlación espectral, índice de Zhou, *Root Mean Square Error* (RMSE), *Relative Average Spectral Error* (RASE), *Relative Dimensionless Global Error* (ERGAS), *Universal Image Quality Index* (Q), *Structural Similarity Index* (SSIM) y Spectral Angle Mapper (SAM).

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La herramienta, llamada *IFusión*, se ha desarrollado en C++ usando un Entorno de Programación Integrado llamado *Code:Block*, que permite la utilización del compilador GNU GCC. Para la implementación del entorno gráfico se ha utilizado la librería gráfica *wxWidgets* que proporciona funcionalidades gráficas mediante la utilización de *OpenGL*. Se ha usado la librería de programación paralela *OpenMP* para agilizar los procesos de cálculo de los algoritmos de fusión e índices de calidad. La herramienta es modular, robusta, intuitiva y se han implementado diferentes técnicas de procesado previas al proceso de fusión.

De los posibles algoritmos de fusión se han incluido en la herramienta los siguientes: Brovey, transformadas IHS, eIHS, transformada PCA, transformada wavelet Discreta diezmada (TWD), transformada wavelet ATROUS aditiva (ATROUS AW) y sus combinaciones con las IHS (ATROUS AWI) y PCA (ATROUS AWPC). Finalmente, para evaluar la calidad se han añadido los índices: coeficiente de correlación espectral y espacial (Zhou), ERGAS espectral y espacial y el índice de calidad global (Q).

Para el análisis comparativo de la calidad proporcionada por las distintas técnicas de fusión se ha creado una base de datos con imágenes representativas de diversos tipos de coberturas (áreas de bosque, urbanas, rurales, etc.). Las imágenes utilizadas pertenecen a la isla de Gran Canaria y han sido obtenidas por los satélites Ikonos, QuickBird y GeoEye-1.

RESULTADOS

Se aplicaron los algoritmos implementados sobre cada imagen de la base de datos y se analizó la calidad de las imágenes fusionadas resultantes usando los índices descritos. A modo de ejemplo, la figura 1 incluye los resultados cualitativos para una imagen del sensor IKONOS y las figuras 2 y 3 los resultados cuantitativos para una imagen GeoEye-1 y Quickbird, respectivamente.

Tras el análisis de los datos se puede concluir que las fusiones basadas en la transformada ATROUS, concretamente la combinada con la transformada PCA, son las que obtienen mejores resultados, superando al resto de fusiones, que aunque presentan buena calidad espacial, su calidad espectral es deficiente. En cuanto al ajuste de histograma, la utilización de la transformación lineal igualando medias y desviaciones, en general, mejora levemente los índices de calidad comparativamente con la transformación igualando frecuencias acumuladas. Finalmente, decir que la interpolación lineal mejora los resultados de los índices de calidad respecto a la bicúbica.

Una vez analizada la calidad de las imágenes fusionadas, se procede a evaluar las mismas para realizar el inventario de cubiertas vegetales, comparando la detección de zonas verdes de los canales multiespectrales originales con las zonas verdes obtenidas por las imágenes fusionadas. Tras el cálculo del NDVI sobre las imágenes multiespectrales originales y sobre las fusionadas se puede concluir que se obtiene una leve mejora a la hora de percibir con mayor detalle los límites y formas de las áreas de vegetación (figura 4).

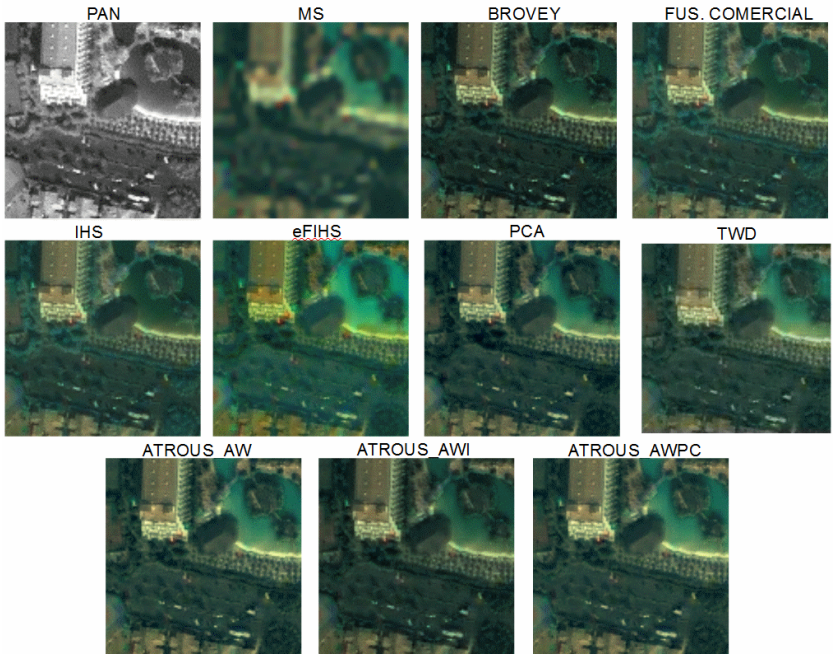


Figura 1: Resultado de la aplicación de las diferentes técnicas de fusión sobre una imagen IKONOS.

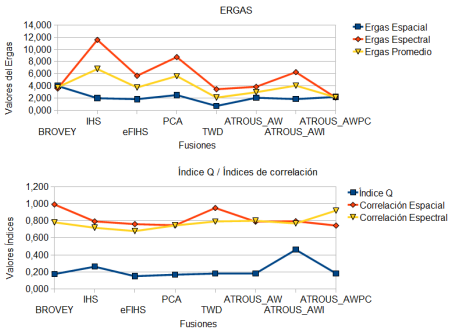


Figura 2: Resultados cuantitativos para una imagen GeoEye-1 de la cumbre de Gran Canaria.

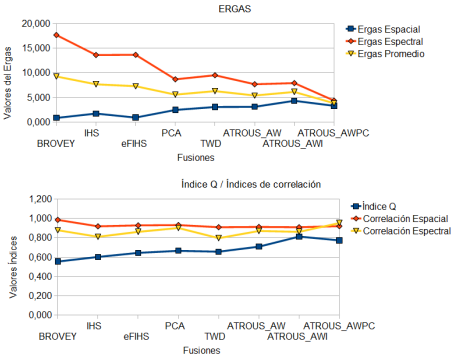


Figura 3: Resultados cuantitativos para una imagen Quickbird de Las Palmas de G.C.

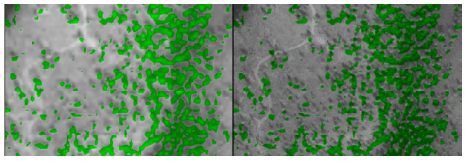


Figura 4: Máscara de vegetación a partir del NDVI sobre la imagen original y la fusionada.

CONCLUSIONES

Se ha diseñado e implementado una herramienta de fusión de imágenes de satélites de muy alta resolución *IFusion,* que permite el cálculo de los algoritmos de fusión a nivel de píxel más utilizados por la comunidad. Además, se han implementado la mayoría de los índices de calidad utilizados para evaluar los algoritmos de fusión. La herramienta también incorpora una serie de técnicas de preprocesado preliminares como son la registración o las variaciones del histograma sobre las imágenes PAN y MS necesarias para obtener mejores resultados en el proceso de fusión, reduciendo al máximo las distorsiones. Se ha completado un análisis comparativo de diferentes algoritmos de fusión. Es importante destacar que existen multitud de algoritmos y únicamente se han evaluado los más usuales. En general, los resultados obtenidos han sido buenos, refrendados con los índices de calidad calculados para las imágenes utilizadas y la calidad visual de las imágenes resultantes. El método de fusión con mejores resultados es el ATROUS aditivo combinado con el PCA con interpolación lineal y transformación lineal del histograma igualando medias y desviaciones. En cuanto al uso de imágenes fusionadas en aplicaciones de análisis de cubiertas vegetales se ha conseguido mejorar notablemente la percepción visual de las zonas verdes pero únicamente se obtuvieron leves mejoras al aplicar el NDVI a las imágenes fusionadas.

BIBLIOGRAFÍA

AMOLINS, K., ZHANG, Y. and Dare, P., 2007. *Wavelet based image fusion techniques – An introduction, review and comparison*. ISPRS Journal Photogram. and Remote Sensing, 62, 4, 249-263.

GONZÁLEZ-AUDICANA, M., OTAZU, X. FORS, O. AND ALVAREZ-MOZOS, J. 2006. *A Low Computational-Cost Method to Fuse IKONOS Images Using the Spectral Response Function of Its Sensors*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, 6, 1683-1691.

HONG, G. and ZHANG, Y., 2008. *Comparison and improvement of wavelet-based image fusion*, International Journal of Remote Sensing, 29, 3, 673-691

LILLO-SAAVEDRA, M. Y GONZALO, C. 2010. *Satellite imagery fusion with an equalized trade-off between spectral and spatial quality*. Revista de Teledetección, 33, 107-116.

LILLO-SAAVEDRA, M., GONZALO, C. AND LAGOS, O., 2011. *Toward reduction of artifacts in fused images* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13, 3, 368-375.

MITCHELL, H.B., 2010. *Image Fusion: Theories, Techniques and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

STATHAKI, T., 2008. *Image Fusion. Algorithms and Applications*. London: Elsevier Ltd.

ZHANG, J. 2010. *Multi-source remote sensing data fusion: status and trends.* International Journal of Image and Data Fusion, 1, 1, 5-24.

Segmentación automática de imágenes mediante ISEG

E. Martínez, J. Sánchez y A. Arquero

DATSI. Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid. Campus de Montegancedo s/n Boadilla del Monte 28660 Madrid (España). Correo electrónico: emartinez@fi.upm.es

RESUMEN

El análisis de imagen basado en objetos es una de las estrategias más comunes para el procesado de imágenes de alta resolución espacial. Un prerrequisito para en este análisis es la segmentación de las imágenes, o subdivisión de una imagen en regiones separadas. En este estudio se presenta la evaluación de una nueva y no supervisada metodología de segmentación de imágenes, basada en un algoritmo autocalibrado de crecimiento de regiones. Este está desarrollado en ISEG (Image Segmentation), un software de segmentación de imágenes, que lleva incorporada la posibilidad de autocalibración en el establecimiento de los parámetros iniciales del proceso. Los buenos resultados obtenidos en la evaluación, muestran la optimización de la calidad de la segmentación conjuntamente con la eficiencia computacional.

Palabras clave: segmentación, autocalibración, evaluación inter e intrasegmento.

ABSTRACT

The object-based image analysis is one of the most commonly used strategies for processing high spatial resolution images. A prerequisite to object-based image analysis is image segmentation, which is normally defined as the subdivision of an image into separated regions. In this study, we present the evaluation of a new unsupervised image segmentation methodology based on a self-calibrating region growing approach. This is implemented in ISEG (Image Segmentation), our image segmentation software with its self-calibration framework for getting initial parameters. In the evaluation, the obtained good results show the optimization of the segmentation quality jointly with the computational efficiency.

Keywords: *segmentation, self-calibration, inter and intrasegment evaluation.*

INTRODUCCIÓN

Las imágenes que presentan una alta resolución espacial, tienen como ventaja poder obtener información más detallada del terreno, siendo este un objetivo prioritario en Teledetección. Sin embargo, su utilización puede presentar algunos inconvenientes, como es el hecho de que la precisión de la clasificación temática de dichas imágenes, puede no ser adecuada cuando se utilizan metodologías basadas en pixel. Cheng *et al.*, (2006) justifican este hecho, indicando que un aumento de la variabilidad dentro de una clase, es inherente a la alta resolución espacial de una imagen. En este sentido y desde hace algún tiempo, un elevado número de trabajos publicados (Blashke, 2010) muestran excelentes resultados cuando se utilizan estrategias basadas en objetos, que demuestran ser muy eficaces para procesar dichas imágenes.

Un requisito para el análisis de imágenes basado en objetos, es la segmentación, que se define de manera sencilla, como la subdivisión de una imagen en regiones independientes (*Li et al.*, 2007). Tradicionalmente, los métodos de segmentación pueden ser agrupados en: los basados en pixel, en bordes o en regiones. En el primer caso, la segmentación se basa en valores umbrales que son seleccionados manual o automáticamente a través del histograma de la imagen. En el segundo caso, primero se detectan bordes dentro de la imagen y luego en una serie de etapas, se generan curvas cerradas limitantes para completar los segmentos. En el caso de los métodos basados en regiones se consideran procesos de crecimiento, división y mezclado, o sus combinaciones, para conectar espacialmente pixeles dentro de segmentos o regiones más o menos homogéneos (Pekkarinen, 2002). Numerosos algoritmos han sido desarrollados, siendo el ejemplo más conocido el de Definiens Developper, software de análisis de imágenes basado en objetos, en el que un método de segmentación multirresolución (Baatz *et al*., 2010) es la clave de una tecnología patentada. Sin embargo, cualquiera que sea el método seleccionado, una tarea crítica es la selección de los

parámetros óptimos de segmentación, que en la mayoría de los casos deben ser seleccionados a base de prueba y error. Esto es por lo que se hace necesario establecer metodologías que automaticen en lo posible estas tareas.

Esta investigación analiza los resultados obtenidos con diversas imágenes, de una nueva metodología automática no supervisada de segmentación basada en un optimizado algoritmo autocalibrado (Sánchez *et al.*, 2010a), volcado en un sistema informático (en su primera versión) denominado ISEG (Image Segmentation), implementado en lenguaje JAVA. ISEG permite además, clasificar los segmentos obtenidos y almacenarlos en formato compatible para su exportación. Para diferentes imágenes, se presentan los resultados de una evaluación objetiva de la calidad de la segmentación, así como de la memoria y tiempo de cómputo empleado en cada caso.

DATOS DE PARTIDA

Han sido elegidas para este estudio, tres escenas correspondientes a: una imagen aérea y dos imágenes SPOT5 y QuickBird (QB). Las dimensiones son 1023x1023 píxeles, 412x336 píxeles y 513x513 píxeles, respectivamente.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta está basada en un proceso de crecimiento de regiones. Considera tanto la información de las regiones como la de sus bordes, debido a que ha sido comprobado que la integración de ambas fuentes de información da buenos resultados (Sánchez *et al.*, 2010b). En una primera etapa se genera un mapa de bordes de calibración, que se usará durante el proceso de segmentación para obtener el mejor mapa de regiones, de entre los obtenidos variándose automáticamente los parámetros de la segmentación. El resultado óptimo se obtendrá mediante evaluación de una función de similaridad, comparando los mapas de distancias (Euclídea) asociados a los de bordes, entre el mapa de calibración y los obtenidos con diferentes parámetros de segmentación. En la etapa de segmentación el crecimiento de regiones se produce a partir de unos píxeles iniciales denominados "semillas". Esos píxeles son aleatoria y automáticamente seleccionados mediante un escaneado por filas de la imagen. Las regiones crecen a partir de las semillas por incorporación de sus vecinos según un criterio de similaridad espectral basado en la distancia Euclídea. Una vez obtenidas las regiones, se inicia un proceso de mezclado para eliminar regiones consideradas de dimensiones despreciables (Sanchez *et al.*, 2010b).

La calidad de la segmentación es evaluada objetivamente (Spindola *et al.*, 2006) mediante el cálculo de la varianza intrasegmento (v) y el índice de autocorrelación I de Moran (1948) para la heterogeneidad intersegmento, según se indica en las Ecuaciones 1 y 2:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i v_i}{\sum_{i}^{n} a_i} \quad (1)$$

donde:
v_i*=varianza.*
a_i*=área de la región i.*

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(y_i - \tilde{y})}{(\sum_{i=1}^{n}(y_i - \tilde{y})^2)(\sum_{i\neq j}\sum w_{ij})} \quad (2)$$

donde:
n*=número total de regiones.*
w_{ij}*=medida de la proximidad espacial. Es una medida de la adyacencia espacial de las regiones* R_i *y* R_j*.*
y_i *= nivel de gris medio de la región* R_i*.*
$\tilde{y}$*= nivel de gris medio de la imagen.*

El índice I de Moran está acotado entre -1 y 1 indicando los valores más pequeños, que los segmentos adyacentes son diferentes entre sí; mientras que la varianza está acotada entre 0 y infinito donde igualmente los valores más pequeños indican que cada segmento es homogéneo.

La metodología descrita se lleva a cabo íntegramente mediante ISEG (Image Segmentation) (Figura 1a) software de procesado de imágenes implementado de lenguaje JAVA. ISEG permite realizar el proceso tanto de manera supervisada como no supervisada, tanto en la selección de píxeles semillas como en la elección de parámetros de segmentación. Para las pruebas se ha utilizado un pC con un procesador de 2,1 Ghz y 640 MB de RAM.

RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan los resultados de las imágenes segmentadas. Una evaluación subjetiva de los segmentos obtenidos, basada en una inspección visual y supervision de campo, indica que no se produce sobre-segmentación en

ninguno de los casos. En la evaluación objetiva, los parámetros de calidad inter e intra-segmento se representan en la Tabla 1. Los valores consensuados obtenidos para el índice de Moran y la varianza indican que los resultados son buenos obteniéndose segmentos diferentes entre sí y homogéneos.

Imagen	Índice de Moran	Varianza
Aérea	0.42	91.19
QuickBird	0.59	54.5
Spot5	0.31	72

Tabla 1: Parámetros de evaluación de calidad inter e intrasegmento.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos respecto a la evaluación del coste computacional del proceso de segmentación no supervisado (autocalibrado) para las imágenes seleccionadas para las pruebas.

Imagen	Tiempo de ejecución (s)	Memoria (MB)
Aérea	74.391	256
QuickBird	4.359	43
Spot	15.922	72

Tabla 2: Parámetros de coste computacional (procesador de 2,1 Ghz y 640 MB de RAM).

Según se observa (Tabla 2) el mayor tiempo de ejecución es el dedicado a la imagen más grande, sin embargo cabe destacar que el caso de la imagen SPOT5 (tres bandas) el tiempo es superior a lo que cabria esperar comparada en sus dimensiones con la QB (cuatro bandas), lo que lleva a pensar que lo que está influyendo es la heterogeneidad espectral de las coberturas presentes en dicha imagen. En cualquier caso los tiempos de ejecución son excelentes en todos los casos (Tabla 2). Se puede considerar de igual modo, que por los valores obtenidos en la memoria utilizada, los procedimientos están muy optimizados.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta da buenos resultados de segmentación según los resultados mostrados en las evaluaciones. No obstante, para futuras investigaciones, se propone optimizar el proceso en la fase de selección de semillas.

El proceso implementado en ISEG, software propio, muestra una alta eficiencia computacional. En trabajos posteriores, se aplicarán estrategias de paralelización de procedimientos, para poder procesar imágenes de mayores dimensiones con adecuados tiempos de ejecución.

BIBLIOGRAFÍA

BLASHKE, T., 2010. *Object based image analysis for remote sensing*. ISPRS Journal of Photog. and Remote Sensing, 65 (1), 2-16.

BAATZ, M. and SCHAPE, A., 2010. *Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. http://www.ecognition.com/.

CHENG, Z., ZHAO, Z. GONG, P. and ZENG, B., 2006. *A new process for the segmentation of high resolution remote sensing Imagery*. Int. Journal of Remote Sensing, 27 (22), 4991-5001.

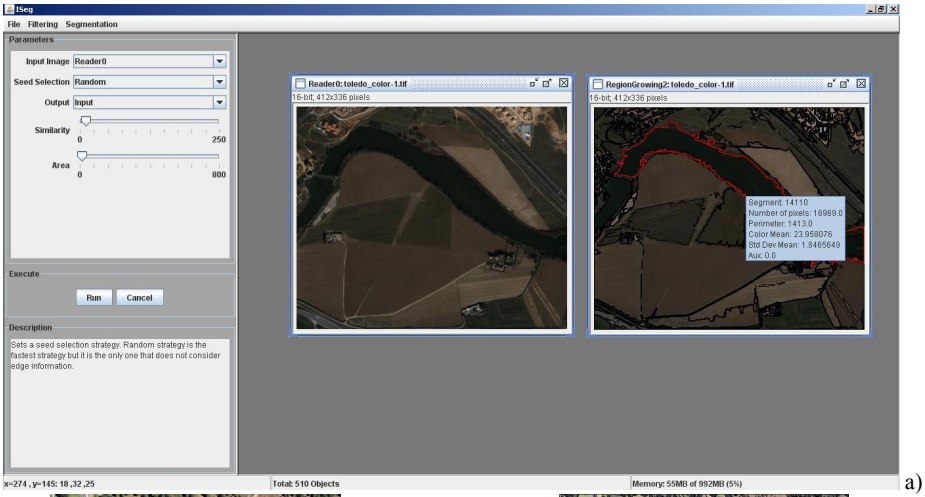
LI, P. and XIAO, X., 2007. *Multispectral image segmentation by a multi channel watershed-based approach*. International Journal of Remote Sensing, 28 (19), 4429-4452.

PEKKARINEN, A., 2002. *A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes*. International Journal of Remote Sensing, 23 (14), 2817-2836.

SANCHEZ, J., MARTINEZ, E., ARQUERO, A. and RENZA, D., 2010a: *Automatic Image Segmentation Optimized by Bilateral Filtering*. LNCS, Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. 649/2010. Ed.: Springer-Verlag. Pag. 311-318.

SANCHEZ, J., MARTINEZ, E., ARQUERO, A. and RENZA, D., 2010b: *Land cover mapping by an optimized object-oriented approach. Case of study: Mediterranean landscapes.* EARSEL Proceedings. Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage Ed.: IOS Press. Pag. 765-374.

SPINDOLA, G. M., CAMARA, G., REIS, I. A., BINS, L. S. and MONTEIRO, A. M., 2006, *Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation*. International Journal of Remote Sensing 27(14), 3035-3040.

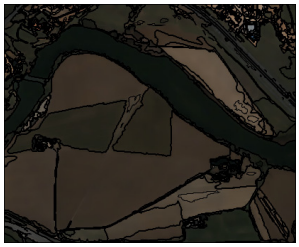


a)


b)


c)


d)


e)


f)

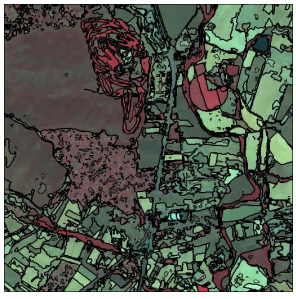

g)

Figura 1: Resultados de las segmentaciones realizadas. *De arriba a abajo y de izquierda a derecha:* **a)** Detalle del menú principal de ISEG y visualización del resultado obtenido con la imagen QuickBird; RGB=321; **b)** imagen aérea original; RGB=321; **c)** imagen aérea segmentada; RGB=321; **d)** imagen QB original; RGB=321; **e)** imagen QB segmentada; RGB=321; **f)** imagen SPOT5 original; NGB=321; y **g)** imagen SPOT5 segmentada; NGB=321.

Análisis del fenómeno Hughes en teledetección

Alex Martinez de Agirre y José A. Malpica

Universidad de Alcalá de Henares. Escuela Politécnica, Campus universitario externo. 28871 Alcalá de Henares (Madrid, España). Correo electrónico: alejandro.martineza@uah.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de los clasificadores de Mahalanobis y SVM cuando aumenta el número de dimensiones. Para ello se ha realizado un análisis empírico combinando diferentes tamaños de muestras de entrenamiento y número de dimensiones, tanto para datos sintéticos como para imágenes hiperespectrales. En concreto, se ha estudiado la relación del tamaño de la muestra de entrenamiento y la dimensionalidad de los datos con respecto a la exactitud de la clasificación. Estos análisis demuestran que el efecto Hughes, también llamado enigma de la dimensionalidad, se manifiesta en Mahalanobis alrededor de las diez dimensiones mientras que dicho fenómeno no parece afectar a SVM.

Palabras clave: fenómeno Hughes, enigma de la dimensionalidad, alta dimensionalidad, datos hiperespectrales, clasificación supervisada, Mahalanobis, Support Vector Machine (SVM).

ABSTRACT

This paper's aim is to evaluate the behavior of two classifiers, Mahalanobis and SVM, as the number of dimensions increase. It is done a heuristic analysis combining different number of training and dimensions on both, synthetic and real hyperspectral data. It is shown the relationship between the training and the dimensionality. Several graphs are presented to show the superiority of SVM over Mahalanobis classifiers based on both synthetic and real hyperspectral data. These findings demonstrate that the Hughes phenomenon, also called curse of dimensionality, occurs for as few as ten dimensions for Mahalanobis; however this phenomenon has not effect on the SVM.

Keywords: *Hughes phenomenon, curse of dimensionality, high dimensionality, hyperspectral data, supervised classification, Mahalanobis, Support Vector Machine (SVM).*

INTRODUCCIÓN

Una imagen de percepción remota puede ser modelada con un espacio euclídeo, donde el número de bandas es la dimensión del espacio y los píxeles de la imagen se representan como puntos en dicho espacio. En la clasificación supervisada, cada píxel de la imagen se etiqueta como la representación de una cobertura del suelo o como una clase, obteniendo la información de las muestras de entrenamiento. Dicho entrenamiento se puede hacer utilizando mapas, visitas al lugar, o fotografías aéreas. De esta manera, los parámetros de los algoritmos de clasificación, se calculan a partir de estas muestras de entrenamiento.

En los últimos años, han aumentado de forma considerable tanto la resolución espacial como la resolución espectral de las imágenes adquiridas por sensores remotos. Al aumentar el número de bandas espectrales o dimensiones, también aumenta la separabilidad de las clases, pero también lo hace el número de parámetros estadísticos que definen las clases. Dado que sólo hay un número fijo de muestras de entrenamiento para extraer los parámetros estadísticos, en algún momento la precisión de la estimación puede comenzar a disminuir, a este efecto se le conoce como fenómeno Hughes (Hughes, 1968). En este trabajo se muestra como existe, para cualquier circunstancia práctica, un valor óptimo de dimensiones y de tamaño de muestras de entrenamiento, y que una mayor dimensionalidad no implica necesariamente mejores resultados.

El objetivo del presente estudio es evaluar la robustez de los dos clasificadores, distancia de Mahalanobis y Support Vector Machine (SVM), utilizando los datos obtenidos por sensores remotos con la doble condición de alta dimensionalidad y mínimo entrenamiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los diferentes clasificadores se han ejecutado con dos imágenes sintéticas de 14 bandas, de dimensión 250x250 píxeles, y se han construido mediante la generación aleatoria gaussiana de dos clases con diferentes medias y matrices de covarianza, y sin ningún tipo de correlación entre las distintas bandas.

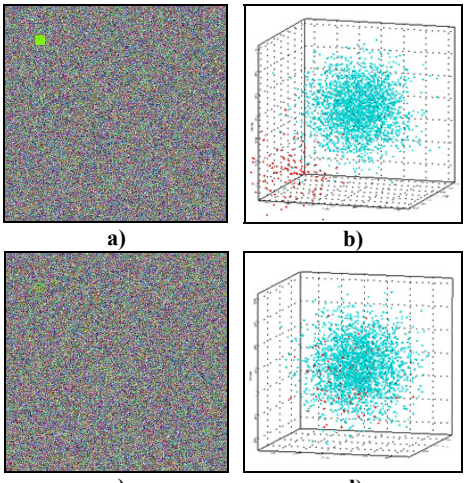


Figura 1: a) imagen sintética con separabilidad de Bhattacharyya de 2.0; **b)** representación de la distribución en tres de las bandas de la imagen a; **c)** imagen sintética con separabilidad de Bhattacharyya de 1.9248; **d)** distribución en tres de las bandas de la imagen c.

Los clasificadores también han sido probados utilizando una imagen hiperespectral del sensor AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) adquirido por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA. La imagen es del tipo whiskbroom, cuenta con 80 bandas en el espectro electromagnético a una resolución de aproximadamente 3.5 metros, y fue tomada en Abril de 2004. El experimento se ha realizado con los datos de radiación original y no se ha realizado ninguna corrección. De las 80 bandas, 20 se han eliminado debido a su gran ruido, y de las 60 restantes fueron seleccionadas 14 de manera equidistante, para poder hacer la comparación con el experimento de las imágenes sintéticas, que también se ha realizado con 14 bandas. La imagen de la figura 2 está generada con las bandas 7, 27, y 72 para los colores rojo, verde y azul, respectivamente, y su tamaño es de 512x512 píxeles.

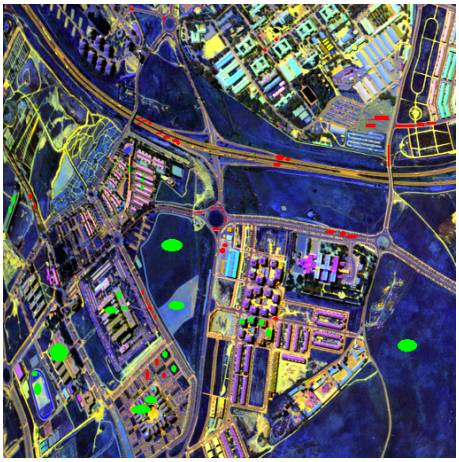


Figura 2: Imagen AHS del campus de Alcalá de Henares con las regiones de entrenamiento.

Dado que no existe un único método de clasificación que claramente supere a todos los otros métodos en todas las situaciones, se han seleccionado dos clasificadores: uno basado en la distancia de Mahalanobis (como clasificador paramétrico), y el otro SVM (como clasificador no paramétrico). Los clasificadores paramétricos se basan en la hipótesis de distribución de datos, y su rendimiento depende en gran medida de lo bien que coincidan los datos con los modelos predefinidos y de la precisión de la estimación de los parámetros del modelo. Este tipo de clasificadores son los que sufren el fenómeno Hughes, y por lo tanto puede que sea dificultosa la toma de un elevado número de píxeles de entrenamiento.

SVM es un método de clasificación supervisada (Burges, 1998) basado en la minimización del riesgo estructural. La idea clave de esta técnica consiste en estimar una frontera o superficie de separación entre las clases espectrales. Esta superficie, que maximiza el margen entre las clases, utiliza un número limitado de píxeles de contorno (vectores de soporte) para crear la superficie de decisión. Esta técnica ha sido aplicada en diferentes contextos de clasificación de datos (Antonio Gualtieri y Cromp, 1998). La idea de SVM inicialmente apareció en un artículo de Boser et al. (1992), y ha sido comparado con otros métodos de clasificación como redes neuronales, vecino más cercano, máxima verosimilitud, y árboles de decisión, y los ha superado a todos en cuanto a robustez y exactitud (Melgani y Buzzone, 2004), lo que nos ha llevado a utilizar SVM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Imagen sintética

En los experimentos realizados con las imágenes sintéticas se ha utilizado un ROI (Region of Interest) de 200 píxeles, 100 para cada una de las dos clases, para la comprobación de las diferentes clasificaciones. Se han generado aleatoriamente diferentes muestras de entrenamiento a partir del ROI, tomando un 15% (30 píxeles), un 11% (22 píxeles), y un 7% (14 píxeles). Para el cálculo de la exactitud media de las clasificaciones, se han utilizado los métodos de Mahalanobis y SVM, y se han estudiado todas las posibles combinaciones de las 14 bandas de dos en dos, de tres en tres, y así hasta las 14 bandas.

Para la imagen sintética de la Figura 1a, con separabilidad entre las clases de 2.0 según la distancia de Bhattacharyya. Se han estudiado las clasificaciones con las diferentes muestras de entrenamiento y en las diferentes combinaciones de bandas. Aunque no se muestren en el presente trabajo, los resultados han mostrado que no se produce el fenómeno Hughes para ninguna de las muestras de entrenamiento ni en ninguno de los dos métodos, debido a la máxima separabilidad de las clases.

Para la imagen sintética de la Figura 1c, con separabilidad entre las clases de 1.9248, podemos ver en la Tabla 1 la exactitud media con el clasificador de Mahalanobis de todas las combinaciones posibles de las 14 bandas con diferentes números de píxeles de entrenamiento.

# BANDS	15% ROI (30p)	11% ROI (22p)	7% ROI (14p)
2	68.9670	68.0879	68.0220
3	73.8915	72.3997	71.4753
4	77.6044	75.6119	74.4241
5	80.3064	78.0262	76.8427
6	82.2056	79.7829	78.5491
7	83.5061	81.0256	79.3632
8	84.4478	81.8205	79.2244
9	85.1054	82.2268	77.8724
10	85.5325	82.3092	75.2468
11	85.8063	82.0632	71.1909
12	85.9725	81.3571	65.1978
13	86.1071	80.4643	58.5714
14	86.5000	77.5000	53.5000

Tabla 1: Exactitud del método de clasificación de Mahalanobis en la imagen sintética Figura 1c para diferentes muestras de entrenamiento.

Es interesante observar cómo, para el clasificador de Mahalanobis, el fenómeno Hughes se produce con las muestras pequeñas de entrenamiento. En realidad, se ha empezado a observar con 22 píxeles de entrenamiento, 11 para cada clase, y sobre la décima dimensión (Tabla 1). Aunque en el presente trabajo no se muestren los resultados, debemos destacar que el fenómeno Hughes no se produce para el clasificador SVM con ninguna de las muestras de entrenamiento.

Imagen real

En los experimentos realizados con la imagen hiperespectral real del sensor AHS, se ha utilizado un ROI de 2904 píxeles, 1038 para la clase de carreteras y 1866 para la otra clase que engloba el resto de coberturas (Figura 2). También se han generado diferentes muestras de entrenamiento a partir del ROI, tomando aleatoriamente un 10% (291 píxeles), un 0.7% (20 píxeles), y un 0.5% (14 píxeles).

Para el análisis de la exactitud del clasificador de Mahalanobis, al igual que con las imágenes sintéticas, se han estudiado las exactitudes medias de todas las combinaciones posibles de las 14 bandas y para las diferentes muestras de entrenamiento. En la Tabla 2 se puede observar, como el fenómeno Hughes aparece cuando el entrenamiento es de 20 píxeles, 7 para la clase de carreteras y 13 para la otra clase.

# BANDS	10% ROI (291p)	0.7% ROI (20p)	0.5% ROI (14p)
2	62.8966	61.5831	58.6149
3	67.0529	65.7142	62.9457
4	70.1527	68.4741	65.3898
5	72.4677	70.1777	67.3315
6	74.3291	71.2893	68.7405
7	75.9313	72.1502	69.6001
8	77.3496	72.7726	69.9629
9	78.6372	73.0453	69.9329
10	79.8390	72.9912	69.5655
11	80.9881	72.7184	68.5455
12	82.0925	72.4628	66.3098
13	83.1193	72.2772	61.7449
14	84.3320	72.2107	39.2906

Tabla 2: Exactitud del método de clasificación de Mahalanobis en la imagen AHS real para diferentes muestras de entrenamiento.

Para el cálculo de la exactitud del clasificador SVM en la imagen hiperespectral real se ha seguido un procedimiento parecido. Se ha calculado la exactitud media para diferentes muestras

de entrenamiento de hasta 100 combinaciones aleatorias para cada conjunto de las 14 bandas, 100 de dos en dos, 100 de tres en tres, y así sucesivamente. En la Tabla 3 se pueden ver los resultados de las diferentes muestras de entrenamiento.

# BANDS	10% ROI (291p)	0.7% ROI (20p)	0.5% ROI (14p)
3	73.6357	63.8502	64.3264
4	76.9170	64.1105	64.6019
5	80.2218	64.4797	64.1570
6	81.9890	64.9132	64.9298
7	82.9277	67.4366	65.6780
8	84.3244	68.7307	65.8543
9	85.5275	70.9632	66.1546
10	85.8957	73.3877	67.0351
11	86.6236	75.9136	68.0795
12	87.2238	77.5478	69.7897
13	87.7755	79.0388	71.7016
14	88.2920	80.0620	74.0014

Tabla 3: Exactitud del método de clasificación SVM en la imagen AHS real para diferentes muestras de entrenamiento.

Se observa como el fenómeno Hughes no se manifiesta en SVM para el número de dimensiones tratadas. Este experimento, aunque no se muestre en el presente trabajo, también se ha realizado con muestras de entrenamiento alternativas y los resultados fueron similares. También ha sido estudiado, aunque no se muestren los resultados, un espacio de hasta 30 dimensiones de la imagen AHS repartidas de forma equidistante, pero el fenómeno Hughes tampoco aparece con muestras de entrenamiento de 14 y 8 píxeles.

CONCLUSIONES

En general, el rendimiento relativo de los clasificadores siempre está influenciado por las propiedades de los datos utilizados. Por lo tanto, es crucial contar con simples criterios prácticos que garanticen las posibles ventajas de la utilización de métodos paramétricos o no paramétricos (Mahalanobis o SVM), para un determinado conjunto de datos. Los resultados empíricos obtenidos en este trabajo, utilizando conjuntos de datos reales de satélite y sintéticos, ilustran la utilidad de ambos enfoques. El efecto de los diferentes tamaños de las muestras de los datos ha sido evaluado en ambos métodos y para los datos sintéticos y reales.

De nuestro trabajo se deduce que cuando se utiliza el clasificador de Mahalanobis, tomando pocos píxeles para el entrenamiento, es necesario reducir el número de dimensiones con el fin de reducir el efecto del fenómeno Hughes. Sin embargo, el clasificador SVM no se ve afectado por la dimensionalidad o por el fenómeno Hughes, y también la solidez de SVM es superior a la de Mahalanobis. Además, SVM es un clasificador no paramétrico y por lo tanto no exige ningún supuesto sobre la distribución estadística de los píxeles.

BIBLIOGRAFÍA

ANTHONY GUALTIERI, AND J. R. F. CROMP, 1998. *Support Vector Machines for Hyperspectral Remote Sensing Classification.* 27th AIPR Workshop, Advances in Computer Assisted Recognition Oct. 1416, 1998, Washington, D.C. Proceedings of the SPIE, Vo1.3584.

BOSER, B.E., I. GUYON, AND V.N. VAPNIK, 1992. *A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers.* En: Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory Vol. 5 pp. 144-152, Pittsburgh. ACM Press, San Mateo, CA.

BURGES, C. J. A., 1998. *Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition, in Data mining and knowledge discovery.* U. Fayyad, Ed. Kluwer Academic, pp. 1-43.

HUGHES, G. F., 1968. *On the Mean Accuracy of Statistical Pattern Recognizers.* IEEE Transactions on Information Theory, IT-14:55-63.

MELGANI, F., AND L. BRUZZONE, 2004. *Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images With Support Vector Machines.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(8), 1778 – 1790.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) por los datos proporcionados, y al MICINN por el apoyo financiero, Proyecto nº. CGL2010-15357.

Modelado de la respuesta espectral relativa de sensores hacia espacios ortogonales

F.J. Mesas-Carrascosa[1], I.L. Castillejo-González, M. Sánchez de la Orden y A. García-Ferrer Porras

[1]Dpto. de Ingeniería Gráfica y Geomática. Universidad de Córdoba. Edificio Gregor Mendel, 2ªplanta. Campus Universitario de Rabanales, Ctra. N-IVa km 396. CP 14071 (Córdoba, España). Tlf: 957218537. E-mail: ig2mecaf@uco.es

RESUMEN

El análisis de las curvas de respuesta espectral relativa de un sensor muestra como las bandas espectrales aparecen solapadas. Esto tiene como consecuencia una redundancia de información. El trabajo realizado modela desde un punto de vista geométrico este hecho. La finalidad es llevar la información espectral a un espacio ortogonal. Para ello, modelando la curva de respuesta espectral se obtiene una matriz de transformación propia del sensor, independiente de la escena.

Palabras clave: respuesta espectral relativa, solapamiento espectral.

ABSTRACT

The analyses of the relative spectral response curves of a sensor shown as the spectral bands are overlapped. This leads in a redundancy of information. This research presents a model from a geometric point of view to treat this aspect. The objective is to bring the spectral information to an orthogonal space. For this, the spectral response curve is modeled to obtain a transformation matrix of the sensor itself, independent of the scene.

Keywords: *relative spectral response, spectral overlapping.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos se han puesto en órbita un conjunto de satélites cuyo factor común es el de ofrecer una mayor resolución espectral y/o una mejora de la resolución espacial. Todos ellos comparten el mismo modelo conceptual según el cual a partir de la información registrada por un sensor y usando el reconocimiento de patrones y la estadística se obtiene la clasificación de la imagen (Kerekes y Langrebe, 1991). Junto a las plataformas espaciales, notable es la aparición de las cámaras métricas digitales, ofreciendo la posibilidad de nuevas formas de explotación de la información.

Independientemente del tipo de sensor, cada una de las bandas espectrales que lo conforman aparece definida mediante una longitud de onda central y un ancho de banda (Pagnutti, 2003).

Dos son los motivos de redundancia de información desde un punto de vista espectral. El primero se debe al sobremuestreo de la escena al registrar en ocasiones un número elevado de bandas. Por otro lado, analizando la curva de respuesta espectral relativa (en adelante RSR) de cada una de las bandas de un sensor se verifica como estas aparecen solapadas. Esto provoca que una misma región del espectro electromagnético aparezca representada por más de una banda presentándose así redundancia de información. Este solapamiento implica que la información no se encuentra en un espacio vectorial ortogonal. Este aspecto tiene como consecuencia que al emplear operadores de clasificación basados en estadística de primer orden como puede ser mínima distancia euclídea, SAM o ISODATA la información debería ser procesada para trasladarla a un espacio ortogonal y poder así hacer un uso efectivo de ellos.

En el presente estudio primero se muestran tres sensores de características y arquitecturas diferentes para detectar la presencia de solapamiento entre bandas. En segundo lugar se presenta una metodología basada en un enfoque puramente geométrico del tratamiento de las

curvas RSR con el objetivo de mitigar los efectos del solape entre bandas. Por último se muestran los resultados sobre un fragmento de una escena Ikonos y un fotograma de la cámara DMC.

DATOS DE PARTIDA

Viendo las curvas RSR de sensores empleados en teledetección sus bandas con frecuencia presentan un cierto solape espectral. Tal efecto es independiente de la naturaleza, características y prestaciones del sensor. En la Figura 1 se muestra la curva RSR de los sensores ASTER (Fig 1.a), Ikonos (1.b) y la cámara DMC (1.c).

En el caso del sensor Aster (Abrams y Hook, 2001), formado por tres subsistemas de distinta resolución espacial operando cada uno en diferentes regiones del espectro, la Figura 1.a representa las curvas RSR de cada una de las bandas que componen el subsistema SWIR (infrarrojo próximo) el cual presenta una resolución espacial de 30 metros y 6 bandas. Por otro lado la Figura 1.b recoge la RSR del sensor Ikonos (Grodecki y Dial, 2001) con una resolución espectral igual a cuatro. Para finalizar la Figura 1.c muestra la RSR de la cámara fotogramétrica DMC (Madani et al, 2004) la cual presenta cuatro bandas de resolución espectral.

Como se puede comprobar las curvas RSR de cada uno de los sensores presentan solapadas sus bandas en diferentes grados advirtiendo que cuando mayor es la resolución espacial del sensor más acusado es el solape.

METODOLOGÍA USADA Y SU VALIDACIÓN

La mayoría de los sensores operan sobre el principio de medir energía sobre una región determinada del espectro electromagnético. La salida generada por el sensor será función de la radiancia espectral de la escena (L_λ) así como de la respuesta del sensor (R_λ):

$$X = F(L_\lambda, R_\lambda) \qquad (1)$$

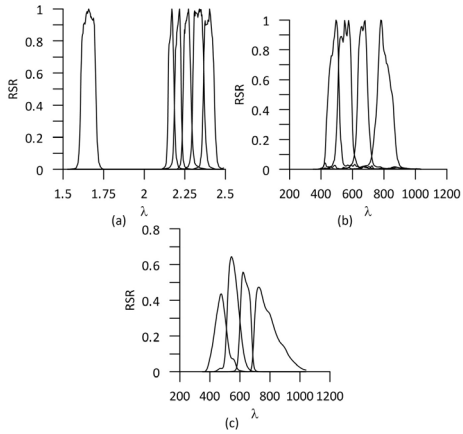


Figura 1: Gráfico de la respuesta espectral relativa de los sensores (a) Aster, (b) Ikonos y (c) DMC.

Se asume que la radiancia es espacialmente uniforme y que el objeto y el sensor son independientes del tiempo, por tanto de forma matricial se puede escribir como (Wiersma y Landgrebe, 1980):

$$X = k\sum_{i=1}^{n} r_i^t E_i + O \qquad (2)$$

donde:

k=pico de respuesta.
n= número de intervalos de onda en que aparece definida la curva RSR de cada banda.
r_i= respuesta espectral relativa del sensor en una determinada longitud de onda i.
E_i = Energía en la longitud de onda i que incide en el sensor.
O = Offset del sensor.

De forma matricial la ecuación 2 queda escrita como:

$$X = R^T \cdot E \qquad (3)$$

donde:

R=matriz de respuesta espectral del sensor

La salida generada para un píxel en una escena será un vector X con dimensión igual al número de bandas. En un proceso de clasificación el objetivo será asignar cada pixel a una categoría. Existen diferentes tipos de operadores de clasificación con estrategias y fundamentos diferentes. Empleando operadores de clasificación basados en estadística de primer orden como son minima distancia euclidea o ISODATA un pixel será asignado a una clase si la distancia

euclidea a esta es mínima dentro de un conjunto. En tal caso el espacio vectorial generado por las bandas del sensor es considerado como ortogonal. Tal aspecto no es del todo válido debido al solapamiento espectral que aparece entre bandas.

El planteamiento matemático propuesto tiene por objetivo transformar el espacio espectral del sensor a un espacio ortogonal, reduciendo por tanto los efectos del solapamiento entre bandas. El proceso se realizará en dos fases, en primer lugar se reconstruirá el valor de la energía incidente en el sensor y posteriormente se trasladará esta a un espacio ortogonal.

Si la matriz de respuesta espectral del sensor fuera ortogonal a partir de la ecuación 3 se podría calcular el valor de la energía que incide en el sensor. Dado que esto no se cumple existirá una diferencia fruto del comportamiento del sensor. Denominando $\hat{E}$ como la energía reconstruida por el sensor, y E como la energía real, el objetivo del procesamiento a desarrollar será hacer mínimo la diferencia $\|E - \hat{E}\|$. Para ello aplicando la teoría de mínimos cuadrados se obtiene como valor de $\hat{E}$:

$$\hat{E} = R\left(R^T R\right)^{-1} X \tag{4}$$

En la siguiente etapa el objetivo es trasladar la información a un espacio ortogonal. Para ello, haciendo uso del método de descomposición de matrices de valores singulares puede establecerse que dado una matriz de respuesta del sensor existen dos matriz ortogonales U y V tal que

$$U^T R V = D \tag{5}$$

Operando se obtiene que:

$$R\left(R^T R\right)^{-1} = UDV^T\left(V^T D^2 V\right)^{-1} = UD^{-1}V^T \tag{6}$$

Trasladando el resultado (6) a la ecuación (4) se obtendrá que el valor de la energía $\hat{E}$ es igual a:

$$\hat{E} = U\left(D^{-1}V^T X\right) = U\tilde{X} \tag{7}$$

Dado que la matriz U es una matriz ortogonal podemos considerar que esta es una transformación isométrica y por tanto podemos definir el operador $D^{-1}V^T$ como aquel operador que reconstruye de la mejor manera posible los valores registrados por el sensor, minimizando los errores y trasladándolos a un espacio ortogonal.

SIMULACION

Se han simulado dos sensores con y sin solape espectral como los que aparecen en la Figura 2. Para ello se ha supuesto que en dos instantes de tiempo diferente ha alcanzado al sensor dos fuentes de energía. En el primero de los casos la energía incidente sigue una distribución a modo de recta, Figura 3.a, y en el segundo de los casos una distribución parabólica, Figura 3.b. Tal y como se ha expuesto en la metodología se ha procedido a determinar la respuesta de cada uno de los sensores y posteriormente se ha reconstruido el valor de la energía de cada respuesta. En el caso del sensor sin solape espectral la reconstrucción es perfecta. En el caso del segundo sensor el valor reconstruido no se ajusta al valor original en ninguno de los casos como puede observarse en la Figura 4. En el caso de emplear una reconstrucción directa de la energía empleando como base la ecuación 3 la desviación respecto del valor original es bastante amplia en ambos casos. Sin embargo utilizando la ecuación 7 el ajuste es mas adecuado tal y como reflejan ambas gráficas.

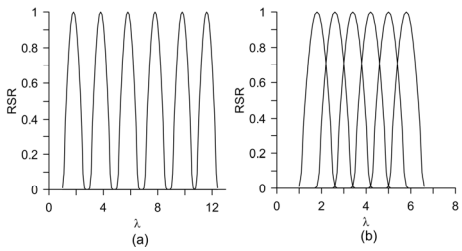


Figura 2: Respuesta espectral relativa simulada: (a) sin solape entre bandas y (b) con solape.

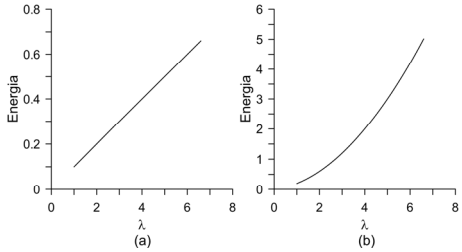


Figura 3: Energía incidente en el sensor: (a) distribución recta (b) distribución parabólica.

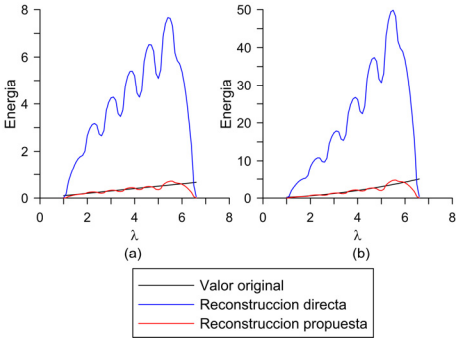


Figura 4: Comparativa energía reconstruida: (a) distribución recta (b) distribución parabólica.

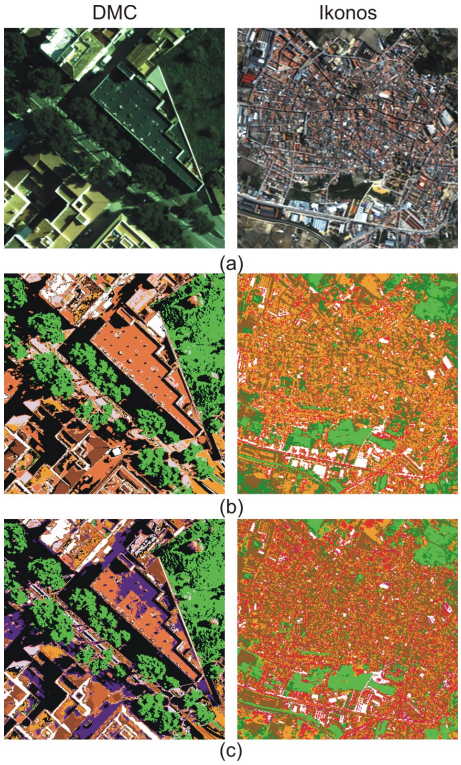


Figura 5: Comparativa resultados clasificación. (a) Imagen empleada, (b) según modelo propuesto, (c) sin procesamiento.

RESULTADOS

La metodología propuesta se ha aplicado sobre dos fragmentos de imágenes correspondientes a una escena del sensor Ikonos y un fotograma obtenido por la cámara DMC. En primer lugar para cada sensor se calculó el operador $D^{-1}V^{T}$ a partir de la información de la curva RSR. De cada imagen se obtuvo por tanto una nueva versión aplicando la metodología propuesta. Sobre cada una de ellas se realizó una clasificación no supervisada empleando el operador ISODATA. En la Figura 5.a se muestra un fragmento de las imágenes empleadas de cada sensor. En ambos casos las clasificaciones obtenidas permiten una interpretación y definición de los fenómenos presentes en la imagen más clara en el caso de aplicar la metodología propuesta (Figura 5.b) que si se opera directamente (Figura 5.c).

CONCLUSIONES

En el presente estudio se expone un método basado en operadores geométricos apropiado para imágenes registradas por todos aquellos sensores cuyas bandas presentan solape espectral. Todo el enfoque se basa en la teoría de mínimos cuadrados y en la factorización de matrices. El objetivo final es reconstruir los valores de energía de la manera más fiel posible reduciendo la correlación entre bandas. Tal metodología es validad para operadores basados en estadística de primer orden. La metodología propuesta se ha aplicado sobre imágenes donde se ha empleado el operador ISODATA siendo los resultados más favorables en las imágenes donde se aplica el tratamiento propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

ABRAMS, M., HOOK, S., 2001. *Aster user handbook*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 91109.

GRODECKI, J., DIAL, G., 2001. *.Ikonos geometric accuracy.* Space Imaging.

KEREKES, J.P., LANDGREVE, A., 1991. *An analytical model of earth observational remote sensing systems*. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 21, 125-133.

MADANI, M., HEIPKE, C., DÖRSTEL y JACOBSEN, K., 2004. *DMC practical experience and accuracy assessment.* ISPRS Congress Istanbul, International Archive of the ISPRS.

PAGNUTTI, M., RYAN, M. KELLY, M.M HOLEKAMP, K,M ZANAONI, V., THOME, K, SCHILLER, S., 2003. *Radiometric characterization of Ikonos multispectral imagery*. Remote sensing of Environment, 88, 53-68.

WIERSMA, D., LANDGREBE, D., 1980. *Analytical design of multiespectral sensors.* IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol GE-18 (2), 180-189.

Corrección radiométrica automática de imágenes Landsat TM mediante áreas pseudoinvariantes y modelización MODTRAN

G. Moré[1], X. Pons[2], J. Cristóbal[3], L. Pesquer[1] y O. González[2]

[1] CREAF (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales). Edificio C. Campus de Bellaterra (UAB). 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona, España). Correo electrónico: g.more@creaf.uab.cat

[2] Departament de Geografia. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra (UAB). 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona, España).

[3] Department de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia. Campus de Bellaterra (UAB). 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona, España).

RESUMEN

Este trabajo describe una metodología para la estimación automática de los parámetros atmosféricos necesarios para la aplicación del modelo simplificado de corrección radiométrica (atmosférica y topográfica) de las bandas solares de imágenes de Teledetección. La metodología estima la radiancia recibida por el sensor desde aquellas regiones donde sólo existe contribución atmosférica (L_a) y la profundidad óptica atmosférica usando áreas pseudoinvariantes (API) obtenidas con imágenes MODIS y revisadas con imágenes Landsat de test. Los resultados sobre 18 imágenes Landsat 5 TM muestran que las diferencias entre la reflectancia estimada y la reflectancia de referencia por 3000 API independientes son muy bajas y consistentes, variando entre -2% y 2% en reflectancia.

Palabras clave: teledetección, corrección radiométrica, áreas pseudoinvariantes, series temporales, MODIS, Landsat.

ABSTRACT

This paper describes a novel methodology to automatically estimate the atmospheric parameters needed in simplified radiometric correction model (atmospheric and topographic) of remotely sensed solar bands (Pons & Solé, 1994). The method estimates the radiance received by the sensor from an area where only atmospheric contribution exists (L_a) and the atmospheric optical depth (τ_0), using pseudoinvariant areas (PIA) with known reflectance values. PIA were obtained using MODIS images and were verified with Landsat test imagery. Results for 18 Landsat 5 TM images show that differences between estimated reflectance and the reference value for 3000 test PIA are very low and consistent, varying from -2% to 2% in reflectance.

Keywords: *remote sensing, radiometric correction, pseudoinvariants zones, temporal series, MODIS, Landsat.*

INTRODUCCIÓN

La liberación del archivo de imágenes Landsat del USGS (United States Geological Survey) supone, para la comunidad científica, la oportunidad de usar una gran base de imágenes de los diferentes sensores del archivo histórico de Landsat (MSS, TM y ETM+). En este nuevo contexto es necesario encontrar una metodología de procesamiento que ofrezca unos resultados realistas y consistentes entre diferentes imágenes, fechas y sensores (Gutman y Justice., 2010).

Se han propuesto diversos métodos para la corrección de imágenes de satélite para obtener valores de reflectividad (correcciones atmosférica y del relieve). Algunos de estos métodos requieren la introducción de datos externos para modelizar algunos parámetros, como la composición atmosférica, que pueden ser difíciles de obtener, sino imposibles de conocer, a la hora de paso del satélite por la zona de estudio. La dificultad de aplicar estos métodos crece con el número de imágenes a procesar y principalmente en series históricas.

El uso de modelos simplificados de corrección puede ser una solución válida para obtener imágenes radiométricamente corregidas (Pons y Solé, 1994). Este modelo sólo requiere dos

parámetros externos: la radiancia recibida por el sensor en una área donde solamente exista contribución atmosféricamente (L_a) y la profundidad óptica de la atmósfera (τ_0). Habitualmente estos parámetros los obtiene un operador humano de forma interactiva, pero la presente propuesta describe un protocolo para estimarlos automáticamente a partir del uso de áreas pseudoinvariantes (API).

A diferencia de otros trabajos donde las API se determinan de forma manual (Hadjimitssis et al., 2009; Chander et al., 2010), en el presente trabajo las API se detectan a partir del análisis de las series temporales de MODIS y Landsat. La finalidad de este protocolo es doble: determinar las zonas de menor cambio radiométrico a lo largo del tiempo y establecer un valor de reflectividad de referencia para cada API.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes: a/ Proponer una actualización del método descrito en Pons y Solé (1994) para corregir de forma automática la radiometría (atmósfera y relieve) de imágenes Landsat; b/ Describir un protocolo para obtener API a través de las series MODIS y Landsat; c/ Aplicar el protocolo automático a las series temporales de imágenes Landsat.

ZONA DE ESTUDIO Y MATERIALES

La zona de estudio corresponde a la escena 197-031 de Landsat según WRS-2 (Worldwide Reference System) que cubre la parte oriental de Cataluña.

Un total de 60 imágenes MODIS se usaron para la detección de las API. Dichas imágenes se obtuvieron a partir del servidor WIST (Warehouse Inventory Search Tool) y corresponde al producto *MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m SIN Grid product* (NASA, 2008a). Las imágenes seleccionadas se distribuyen a lo largo de los 12 meses del año, entre el año 2002 y 2008. Solamente se han seleccionado las imágenes sin efecto *bow-tie* (Yang y Di, 2004) y con una baja cobertura de nubes.

Adicionalmente, se han seleccionado 50 imágenes Landsat 5 TM corregidas manualmente para revisar en las API su coherencia con MODIS. En este caso, también se ha usado el criterio de la cobertura de nubes para la selección de imágenes. Es posible que con un número inferior a 50 imágenes también sea posible realizar esta fase, y esto será fruto de estudio en futuros trabajos. En ambos casos, se ha aplicado una máscara sobre las zonas cubiertas por nubes o nieves.

La corrección radiométrica se ha aplicado sobre una serie de 18 imágenes Landsat 5 TM adquiridas a Eurimage (Eurimage, 2008) entre el 2003 y 2009. Estas 18 imágenes cubren todos los meses del año incluyendo fechas en condiciones extremas muy cercanas al solsticio de invierno.

METODOLOGÍA

A continuación se describe el modelo de corección radiométrica simplificado así como el proceso para obtener API con imágenes MODIS y Landsat y la aplicación del algoritmo de corrección automática.

Actualización del modelo de corrección radiométrica

Antecedentes

La metodología para corregir automáticamente (atmosférica y topográficamente) las bandas del espectro solar de Landsat se basa en la siguiente ecuación propuesta en Pons y Solé (1994):

$$\rho = \frac{\pi * [L - L_a] * d^2}{\cos\theta * E_0 * \tau_1 * \tau_2} \quad (1)$$

ρ: Reflectancia a nivel del suelo
E_0: Irradiancia solar exoatmosférica ($W*m^{-2}$).
τ_1 / τ_2: Coeficiente de transmitancia atmosférica del trayecto Sol-Tierra / Tierra-Sensor
L_a: Radiancia recibida por el sensor de una área donde sólo existe contribución atmosférica (por ejemplo, sombras o agua, dependiendo de la región espectral).
L: Radiancia a nivel del sensor.
θ: Ángulo de incidencia entre el zenit solar y el vector normal del terreno.
d: Distancia Sol-Tierra, en Unidades Astronómicas.
$\tau 1$ y $\tau 2$ eran originalmente estimadas usando estas expresiones:

$$\tau_1 = e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos(s)}\right)} \quad (2)$$

$$\tau_2 = e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos(v)}\right)} \quad (3)$$

τ_0: Profundiad óptica atmosférica
s: Ángulo solar zenital
v: Ángulo entre el vector normal del terreno llano y el vector de visión del sensor.

Todos los parámetros de las ecuaciones utilizadas se pueden conocer a partir de la imagen y sus metadatos a excepción de L_a y τ_0. En la metodología previa al presente trabajo, los valores de τ_0 usados en la corrección eran fijos para cada banda y habían sido establecidos a partir de los datos de otros trabajos basados en parámetros de atmósferas estándar. L_a habitualmente se obtenía a partir del mínimo valor del histograma a analizar (Chavez, 1996).

Búsqueda automática de valores L_a y τ_0

En este trabajo los valores de L_a y τ_0 se estiman usando un método iterativo no lineal con el apoyo de los valores de referencia de las API (el método calcula los valores de L_a y τ_0 para que la ecuación 1 tenga solución en una API a partir de su valor de reflectancia).

Se usó MODTRAN para modelizar τ_0 en distintas atmósferas estándar (US Standard 1976, MidLattiude Summer, MidLattitude Winter, SubArtic Summer, SubArticWinter and Tropical), condiciones de altitud (de 0 a 9000 m con intervalos de 250 m) y de ángulo zenital solar (de 0 a 90º con intervalos de 1º). Esta aproximación determina un rango de posibles valores para τ_0 para cada banda solar, evitando de este modo encontrar soluciones matemáticamente válidas para la ecuación pero demasiado alejadas de las condiciones atmosféricas posibles.

Obtención de áreas pseudoinvariantes (API)

Para la identificación de las API se usó una serie de 60 imágenes MODIS sobre la escena completa 197-031, distribuidas a lo largo de los doce meses del año y entre los años 2002 y 2008. Solamente se usaron las bandas de 1, 2, 3, 4, 5 y 7, con una resolución espacial de 500 m, descartando la banda 5 debido a que no tiene correspondencia con ninguna de las bandas de Landsat 5 TM.

Para cada píxel y cada banda se calculó la desviación estándar de todas las imágenes MODIS seleccionadas. Se calculó el valor medio de estas seis nuevas imágenes. Este resultado corresponde al valor medio de la desviación estándar para cada píxel a lo largo de la serie temporal.

Los píxeles con una media en la desviación estándar por debajo de 1.75 se seleccionaron obteniendo así una máscara preliminar de zonas con una variación radiométrica baja a lo largo del período 2002-2008 para MODIS.

La resolución espacial de la máscara obtenida es de 500m, un valor insuficiente para trabajar con imágenes Landsat. Se verificó su coherencia con selección de 50 imágenes Landsat corregidas manualmente y se calculó la desviación estándar de la serie temporal para cada píxel, y también el valor medio de las desviaciones estándar de las seis bandas. Los píxeles con un promedio en la desviación estándar inferior a 2 se seleccionaron como API. Estos píxeles seleccionados coincidían con bosques perennifolios y matorrales. La selección de píxeles resultante se agregó para crear una matriz de polígonos con tamaño igual a 3x3 píxeles y descartando todas las API con un tamaño inferior a éste.

Dado que el número de API obtenidas fue razonablemente elevado, 4423 API se usaron para ajustar el modelo y 3000 API se reservaron para hacer un test independiente de los resultados.

Establecimiento de un valor de reflectancia en la API i aplicación del modelo

Finalmente a cada API detectada se le asignó un valor de referencia igual al valor medio de reflectancia calculado a partir de la selección de 12 imágenes Landsat 5 TM previamente corregidas manualmente (atmosférica y topográficamente) y coherente con las 60 imágenes MODIS.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra la diferencia entre la reflectancia estimada con el modelo y la reflectancia de referencia para los 3000 polígonos de test. El rango de dichas diferencias varía entre el $\pm$2% en reflectancia y sin detectarse patrones temporales en las diferencias. Estos valores de variabilidad son cercanos a los valores de ruido del propio sensor (NASA, 2008b).

La mínima diferencia es 0% y aparece en la banda dos de la imagen adquirida el 07/02/2006. La diferencia máxima es de 2.11% y aparece en la banda 4 del 08/02/2006.

Para este conjunto de 18 imágenes Landsat, el valor de La y τ0 se estimaron tanto de forma automática como de forma interactiva (en el caso de L_a) o con los valores fijos (por τ0). Las diferencias en la estimación de L_a entre los dos modos son muy pequeñas, siendo la media de las diferencias de 0.56 DN y con una desviación estándar de 3.92 DN. Las diferencias en el caso de τ0 son igualmente muy pequeñas y próximas a

0 (0.008) y la desviación estándar es de 0.032 en todas las bandas solares de las 18 imágenes. En este caso, la máxima diferencia es de 0.08 para la banda 1 de la imagen de 21/06/2008.

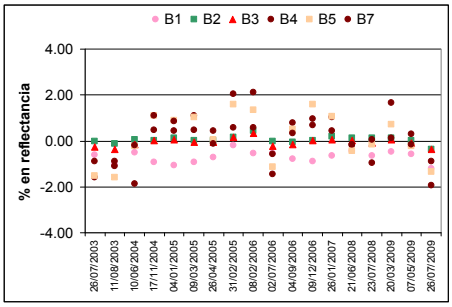


Figura 1: Diferencia absoluta por banda y fecha entre reflectancia estimada y reflectancia de referencia promedio de 3000 API de test.

CONCLUSIONES

El uso de modelos de corrección radiométrica (atmosférica y topográfica) simplificados puede considerarse como una útil y práctica opción para el procesamiento preliminar de las imágenes de Teledetección.

La independencia respecto a datos externos de estos modelos, permite la automatización del proceso de corrección, gracias al apoyo de API con valores de reflectancia conocidos.. De este modo el método se convierte en una solución estable para corregir largas series temporales de imágenes de satéltite tomadas en distintas condiciones atmosféricas y de iluminación. Actualmente se está ampliando el estudio para los sensores ETM+ y MSS y se espera confirmar su viabilidad, dada la similitud entre las diferentes configuraciones espectrales de los sensores Landsat

Los resultados demuestran que el algoritmo es aplicable a cualquier imagen de la serie Landsat TM, independientemente de la fecha y de la presencia de nubes ya que el algoritmo es capaz de detectar presencia de nubes o nieves o cambios en el uso del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

CHANDER, G., XIONG, X., CHOI, T., ANGAL, C. 2010 *Monitoring on-orbit calibration stability of Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites*. Remote Sensing of Environment, Vol. 114, 925-939.

CHANDER, G., XIONG, X., CHOI, T., ANGAL, C. 2010 *Monitoring on-orbit calibration stability of Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites*. Remote Sensing of Environment, 114, 925-939.

CHAVEZ, P. S. 1996 *Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62.9, 1025-1036.

EURIMAGE 2010 *Eurimage*. En internet: www.eurimage.com (accedido el 24/03/2011).

GUTMAN, G. y JUSTICE, C. 2010 *Land Cover and Land-Cover Change Products from Optical Coarse and Moderate Spatial Resolution Global Datasets*. Proc. 2010 ESA Living Planet Symposium. Editores: Lacoste-Francis.

HADJIMITSSIS, D.G, CLAYTON, RETALIS, C.R.I. 2009 *The use of selected pseudo-invariant targets for the application of atmospheric correction in multi-temporal studies using satellite remotely sensed imagery*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, 192-200.

NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION 2008a *MOD09 (Surface Reflectance) User's guide*. En internet: http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_MOD09GA5.html (accedido el 24/03/2011).

NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION 2008b *Landsat hand book*. En Internet: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov (accedido el 24/03/2011).

NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION. 2010 *Landsat Missions*. En Internet: http://landsat.usgs.gov (accedido el 24/03/2011).

PONS, X. y SOLÉ-SUGRAÑES, L. 1994 *A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data*. Remote Sensing of Environment, 48, 191-204.

YANG, W. y DI, L. 2004 *An Accurate and Automated Approach to Georectification of HDF-EOS Swath Data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70-4, 397–404.

Efectos de la hora de paso y de la resolución espacial en el seguimiento del fenómeno de Isla de Calor Urbana, mediante teledetección térmica de alta resolución

R. Oltra-Carrió, J. A. Sobrino y G. Sòria

Unidad de Cambio Global. Laboratorio de Procesado de Imágenes. Universitat de València. C/Catedrático Agustín Escardino, 9. 46980 Paterna (València). Tel: 963544054, Fax: 963543261. Correo electrónico: rosa.oltra@uv.es

RESUMEN

El efecto de Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS) se define como el aumento de la temperatura de superficie en las zonas urbanas, en contraste con la temperatura de superficie de las zonas rurales circundantes. En este trabajo se estudian las características que ha de satisfacer un sensor a bordo de un satélite, en términos de resolución espacial y de hora de paso, para poder hacer un seguimiento adecuado del efecto ICUS. Para ello se han utilizado datos de la campaña Dual-Use European Security IR Experiment 2008 (DESIREX 2008) de la ESA (*European Space Agency*) que tuvo lugar en la ciudad de Madrid. Se han generado mapas de Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) a diferentes resoluciones espaciales, a partir de las imágenes del AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*). Además se han utilizado datos in situ de la temperatura del aire y de la TST. Los resultados muestran que: (1) una resolución espacial de menos de 50 metros es necesaria para estimar correctamente el efecto SUHI a nivel de barrio y (2) la hora de paso del satélite recomendada es de unos minutos antes del amanecer.

Palabras clave: Isla de Calor Urbana Superficial, resolución espacial, hora de paso, AHS.

ABSTRACT

Surface Urban Heat Island (SUHI) effect is defined as the increased surface temperatures in urban areas in contrast to cooler surrounding rural areas. In this paper we study the characteristics that a space borne sensor has to satisfy in terms of spatial resolution and overpass time, in order to properly monitor the SUHI effect. To this end we have used the data acquired in the framework of the Dual-use European Security IR Experiment 2008(DESIREX 2008) ESA (European Space Agency) campaign in Madrid. Land Surface Temperature (LST) maps have been generated at different spatial resolution from the AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) imagery. Moreover, in situ data of air temperature and LST obtained during the campaing have been considered. The results have shown that: (1) spatial resolutions higher than 50 meters are needed to properly estimate the SUHI effect at district level and (2) the satellite overpass time recommended is immediately before sunrise.

Keywords: *Urban Heat Island, spatial resolution, overpass time, AHS.*

INTRODUCCIÓN

En 2009, el 50% de la población mundial vivía en ciudades. El crecimiento de las ciudades implica un cambio en el clima local. La Isla de Calor Urbana (ICU) es un ejemplo de este cambio local. Este efecto está caracterizado por un aumento de la temperatura del aire (TA) de las zonas urbanas en comparación con el de sus alrededores no urbanizados. Cuando el fenómeno es estudiado con datos de teledetección, debemos hablar de Isla de Calor Superficial (ICUS), ya que en este caso se obtiene a partir de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST). Las características de los sensores actuales (hora de visita y resolución espacial y espectral) no son los más adecuadas para el estudio de la ICUS. Así, el objetivo principal de este trabajo es hacer una recomendación de la hora de paso y resolución espacial apropiadas de un sensor para estudiar el fenómeno de la ICUS, a partir del análisis de los datos obtenidos en la campaña DESIREX 2009 (Sobrino et al., 2009).

DATOS

Datos aéreos: el sensor AHS

El sensor AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*) cuenta con 80 bandas espectrales en 4

puertos cubriendo el VNIR (20 bandas), SWIR (1+42 bandas), MIR (7 bandas) and TIR (10 bandas). La configuración de las bandas térmicas, con las que se trabaja en este estudio, se pueden encontrar en Sobrino et al. (2008).

Durante la campaña DESIREX se adquirieron 30 imágenes AHS divididas en dos pasadas (sur-norte y noroeste-sureste), a distintas horas (a las 4 h, 11 h y 21 h UTC) y a diferente resolución espacial (2 m, 4 m y 6 m). La calibración del sensor con datos in situ mostró el buen comportamiento de las bandas térmicas. La comparación entre la temperatura de brillo obtenida del AHS y la simulada a partir de los datos in situ dio un bias de 0.1 K i un RMSE de 1.0 K (Sobrino et al., 2009).

Datos in situ

Durante la campaña se establecieron puntos fijos de medida en distintas zonas de la ciudad. En la Tabla 1 tenemos una descripción de cada uno de los mástiles.

	Densidad de construcción	Superficie	Parámetros medidos
M1	Baja	Césped	TA, TR
M2	Baja	Artificial	TA, TR
M3	Media	Artificial	TA, TR
M4	Alta	Artificial	TA, TR
M5	Media	Artificial	TA, TR

Tabla 1: Descripción de los puntos fijos de medida (TR equivale a temperatura radiométrica)

ESTUDIO DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Con el fin de estudiar el impacto de la resolución espacial en la determinación del fenómeno ICUS, las imágenes AHS se han reescalado. Es decir, a partir de las imágenes de 4 m de resolución espacial se han obtenido imágenes de resolución espacial menor. El proceso de reescalado o agregación de píxeles, se ha aplicado a las imágenes de radiancia a nivel de sensor georreferenciadas. El proceso de agregación se ha hecho sin tener en cuenta la influencia de los píxeles vecinos.

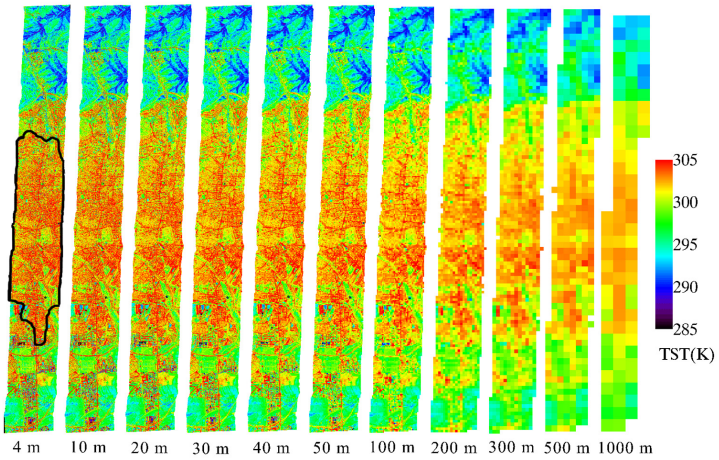


Figura 1: Mapas de TST obtenidos a partir de la imagen AHS de 4 m de resolución espacial del día 28 de Junio de 2008 a las 21:12 UTC, a 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 500 y 1000 m de resolución espacial. El límite de la ciudad considerado está dibujado con una línea negra sobre la imagen de 4 m.

Una vez conseguida la resolución espacial requerida, se han aplicado los siguientes pasos para obtener los mapas de TST. Primero, la imagen se ha corregido de los efectos atmosféricos a partir de la ecuación de transferencia radiativa (Ecuación 1) obteniendo así un mapa de radiancia a nivel del suelo para cada canal térmico i del AHS (L_i^{sup}).

$$L_i^{\sup} = \frac{L_i(T_i) - L_i^{\uparrow}}{\tau_i} \qquad (1)$$

donde L_i es la radiancia medida por el canal i, T_i es la temperatura de brillo del sensor para cada canal i, $L_i^{\uparrow}$ es la radiancia atmosférica ascendente y τ_i es la transmisividad atmosférica para cada canal i. Los parámetros atmosféricos $L_i^{\uparrow}$ y τ_i se obtuvieron a partir de radiosondeos realizados durante la campaña y utilizando el software de transferencia radiativa MODTRAN-4 (Berk et al., 1999).

Finalmente el algoritmo que se ha aplicado para obtener la TST es el algoritmo TES (del

inglés *Temperature and Emissivity Separation*) (Gillespie et al., 1998), utilizando siete de las 10 bandas térmicas (bandas 72, 73, 75, 76, 77, 78 y 79), ya que en trabajos previos se ha demostrado que esta combinación da buenos resultados (Sobrino et al., 2008). Para esta configuración, la relación entre la emisividad mínima (ε_{min}) y el MMD (del inglés Minimum Maximum Difference) viene dada por:

$$\varepsilon_{\min} = 0.999 - 0.777 MMD^{0.815}, \quad r = 0.996 \quad (2)$$

La Figura 1 muestra las imágenes de TST generadas con el método de agregación. Se observa una pérdida de información cuando la resolución espacial disminuye. Este hecho se evidencia principalmente en la imagen a 1000 m, donde la estructura térmica de los distintos barrios y estructuras de la ciudad no se distinguen. Esto da cuenta de la limitación de los sensores con 1 km de resolución espacial para diferenciar la estructura térmica de la ICUS en grandes ciudades y, peor aun en el caso de ciudades pequeñas. Esta pérdida de información se puede observar también en la Tabla 2, donde aparece la desviación estándar de la TST de la zona urbana de las imágenes (área rodeada en la Figura 1). Se puede observar la fuerte variación de 3.6 K (desde los 4.4 K de la imagen original de 4 m hasta los 0.8 K para la imagen reescalada a 1 km).

Para continuar con el análisis de la resolución espacial, se han seleccionado tres barrios de la ciudad (Figura 2) con estructuras distintas: el barrio 1 en el centro de la ciudad está caracterizado por calles estrechas y edificios bajos con tejas en el tejado. El barrio 2 cuenta con calles anchas y edificios altos con materiales aislantes en el tejado. Finalmente, el barrio 3 está cubierto principalmente por un jardín. En la Figura 2 se observa que para resoluciones espaciales de 10 m y 50 m se diferencian estructuras como calles o pequeños parques. Para los 100 m, estos detalles se empiezan a confundir y ya, finalmente, para 500 m y 1 km de resolución espacial, los barrios aparecen homogéneos y la heterogeneidad entre ellos se pierde.

En la Figura 3 se ha representado la ICUS máxima (ICUSM) para cada barrio, definido como la diferencia entre la temperatura máxima de cada barrio y la temperatura media de la zona rural de la imagen (zona excluida del trazado de la Figura 1). Se observa que (1) para resoluciones espaciales entre 10 m y 40 m, la ICUSM es mayor de 10 K para los tres barrios y se pueden observar diferencias en su valor entre los distintos barrios, (2) la resolución espacial de 50 m, SUHIM cerca de 10 K para todos los barrios, puede considerarse como una resolución crítica y (3) resoluciones menores de 50 m presentan valores de SUHIM más bajos y no diferencian entre un barrio y otro.

Resolución espacial (m)	σ (K)	Resolución espacial (m)	σ (K)
4	4.4	100	1.7
10	3.3	200	1.4
20	2.8	300	1.2
30	2.5	500	1.0
40	2.4	1000	0.8
50	2.2		

Tabla 2: Desviación estándar de la TST de la ciudad.

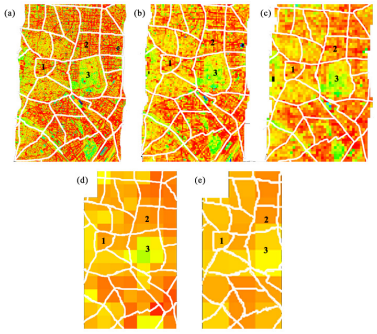


Figura 2: Detalle de los barrios analizados (1, 2 y 3) en las imágenes de TST. (a) 10 m, (b) 50 m, (c) 100 m, (d) 500 m, (e) 1000 m.

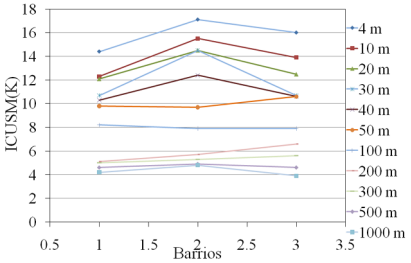


Figura 3: ICUS máxima para los tres barrios considerados a las diferentes resoluciones espaciales.

ESTUDIO DE LA HORA DE PASO

Para analizar la hora de paso del satélite, se presenta una comparación entre la TA y la TST hora a hora. Para así determinar el momento en el cual el paso de la TST a la TA es más inmediato y por tanto, se puede obtener la ICU más fácilmente a través de la obtención de la ICUS con datos de teledetección. Se han utilizado los datos registrados en los mástiles fijos durante la campaña.

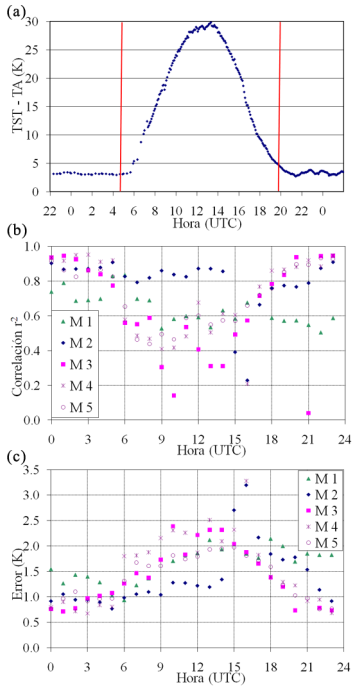


Figura 4: Evolución diaria de (a) la diferencia media entre TST y TA para todos los mástiles, en rojo se ha marcado la hora de salida y puesta del sol, (b) del coeficiente de correlación entre las dos temperaturas y (c) del error estimado en la obtención de TA a partir de cada ajuste lineal.

En la Figura 4.a vemos que las diferencias TST-TA son mínimas entre las 20 h UTC y las 6 h UTC. En la Figura 4.b y 4.c se muestra la evolución a lo largo del día del coeficiente de correlación y del error obtenido cuando se establece una correlación lineal entre TA y TST para todos los mástiles. Los coeficientes de correlación mayores se obtienen entre las 22 h y las 5 h UTC para los mástiles situados sobre superficies artificiales. Es en este periodo cuando los errores son próximos a 1 K (Figura 4.c). Justo antes de la hora del amanecer (5 h UTC), se consigue el mayor coeficiente de correlación y un error mínimo para el mástil situado en el césped (M1). Así, antes del amanecer sería la mejor elección para estimar el valor de la ICUS, que podrá ser comparada con el valor de la ICU obtenida a partir de la TA.

CONCLUSIONES

En este trabajo mostramos las características que tiene que tener un sensor, en términos de resolución espacial y hora de paso, para caracterizar la ICUS en una ciudad del estilo de Madrid. Los resultados muestran que resoluciones espaciales mayores de 50 m no son suficientes para caracterizar el fenómeno a nivel de barrio. Además, la hora de paso idónea que se ha obtenido ha sido justo antes del amanecer.

BIBLIOGRAFÍA

BERK, A., ANDERSON, G. P., BERNSTEIN, L. S., ACHARYA, P. K., DOTHE, H., MATTHEW, M. W., ADLER-GOLDEN, S. M., CHETWYND, J. H., RICHTSMEIER, S. C., PUKALL, B., ALLRED, C. L., JEONG, L. S. y HOKE, M. L., 1999, *MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction*. Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research Iii, 3756, 348-353.

GILLESPIE, A., ROKUGAWA, S., MATSUNAGA, T., COTHERN, J. S., HOOK, S. y KAHLE, A. B., 1998, *A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images*. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 1113-1126.

SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SÒRIA, G., GÓMEZ, M., B.-O., A., ROMAGUERA, M., ZARAGOZA, M., JULIEN, Y., CUENCA, J., ATITAR, M., HIDALGO, V., FRANCH, B., MATTAR, C., RUESCAS, A., MORALES, L., GILLESPIE, A., BALICK, L., SU, Z., NERRY, F., PERES, L. y LIONATI, R., 2008, *Thermal remote sensing in the framework of the SEN2FLEX project: field measurements, airborne data and applications*. International Journal of Remote Sensing, 29, 4961-4991.

SOBRINO, J. A., SÒRIA, G., OLTRA-CARRIÓ, R., JIMENEZ-MUNOZ, J. C., ROMAGUERA, CUENCA, J., M., FRANCH, B., HIDALGO, V., MATTAR, C., JULIEN, et al., 2009. *DESIREX 2008: Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid*. Revista de Teledetección, 31, 80-92.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de la ESA (proyecto DESIREX 2008-21717/08/I-LG) y de la beca V Segles de la UVEG (R. Oltra-Carrió).

Últimos avances y estado actual del Plan Nacional de Teledetección

J.J. Peces [1], A. Fernández-Renau [2], G. Villa [1], M.A. Dominguez-Durán [2], E. Domenech [1], J.A. Tejeiro [1], M. Simón [2] y N. Plaza [1]

[1] Instituto Geográfico Nacional. Observación del Territorio. C/ General Ibáñez de Ibero, 3. 28003 (Madrid, España). Correo electrónico: jjpeces@fomento.es

[2] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera.

RESUMEN

EL Plan Nacional de Teledetección (PNT) proporciona coberturas periódicas de España con imágenes de satélite, actuales e históricas, con tratamientos geométricos y radiométricos consensuados por los expertos de la comunidad científica nacional, y con licencia de uso multiusuario para las administraciones y universidades públicas, facilitando así el uso masivo de la teledetección en España tanto en proyectos científicos como operativos.

En alta resolución, desde 2005 se han adquirido coberturas del sensor HRG de SPOT 5, con 2.5 metros. Con estos datos se obtienen productos corregidos geométricamente, con pansharpen, y mosaicos realzados en varias combinaciones de bandas. En un futuro, con el satélite español Ingenio, se incrementará el número de coberturas anuales. En media resolución desde 2008 se están adquiriendo todas las imágenes disponibles del sensor TM de Landsat5. Actualmente se generan imágenes corregidas geométricamente y se ha establecido la cadena productiva de datos de reflectividad que se implementará mediante un WPS. También se están desarrollando herramientas para generar compuestos sin nubes. Por último, el PNT prevé también coberturas de satélite de baja resolución, con píxeles entre 100 y 500 metros y una periodicidad de 1 a 3 días. MODIS y MERIS, con 250 y 300 metros de resolución máxima, son los principales satélites disponibles para captar este tipo de datos.

Palabras clave: Plan Nacional de Teledetección, PNT, imágenes de satélite, tratamiento de imágenes.

ABSTRACT

Spanish Remote Sensing Program, PNT, provides regular coverages of the Spanish territory with satellite imagery, current and historical, with geometric and radiometric processing consensus by experts of Spanish scientific community, with multi-user licenses for all Spanish public Institutions, doing possible the massive use of remote sensing applied or scientific.

In high resolution, since 2005 has been acquired a complete coverage of Spain with HRG SPOT 5, 2.5 meters. With those data are obtained geometrically corrected products and mosaics with different band combinations. In the future, Spanish satellite Ingenio will increase annual coverages. In medium resolution, since 2008 there is a constant acquisition every 16 days of Landsat5 TM images. Currently, it has been obtained geometrically corrected images and has been established the productivity chain to obtain reflectivities that will be implemented with a WPS. It is been developed tools to generate cloudless compounds. Finally, PNT also provides satellite coverage with low resolution, with pixels from 100 to 500 meters and every 1-3 days. MODIS and MERIS, 250 and 300 meters maximum resolution are the main satellites available to capture this data.

Keywords: *Spanish Remote Sensing Program, PNT, satellite images, image processing.*

INTRODUCCIÓN

EL Plan nacional de Teledetección proporciona coberturas periódicas de todo el territorio español, haciendo posible el uso masivo de la teledetección en las administraciones y universidades públicas españolas. El PNT es coordinado por el Ministerio de Fomento a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN-CNIG) y por el Ministerio de Defensa través del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Existe además un coordinador del PNT por cada Ministerio y cada Comunidad Autónoma partici-

pante y grupos de trabajo formados por expertos y usuarios con el objeto de "consolidar" los requerimientos e identificar soluciones.

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES, TRATAMIENTOS Y PRODUCTOS

Las coberturas del territorio español consideradas en el PNT se estructuran en tres niveles de resolución espacial y temporal: alta, media y baja.

a) Alta resolución

Las aplicaciones principales de estas imágenes son: obtención de cartografía de ocupación del Suelo (SIOSE, CORINE Land Cover, etc.). Actualización de bases de datos cartográficas de escalas medias, obtención de información medioambiental y agrícola, etc.

Desde 2005 a 2010, el sensor de alta resolución escogido ha sido el HRG a bordo del satélite SPOT5. Las imágenes que capta este sensor son de 2,5 m de tamaño de píxel en modo pancromático (una sola banda) y 10 m en modo multiespectral (4 bandas), con fechas preferentes entre el 15 de Junio a 15 de Septiembre. En el futuro estará disponible el satélite español INGENIO. Las imágenes SPOT5 se reciben con un nivel de procesamiento 1A. Todo el procesado geométrico posterior, así como los tratamientos radiométricos, son realizados en el Instituto Geográfico Nacional. Los procesados básicos que se aplican a éste tipo de imágenes son los siguientes (Tejeiro. 2010).

a.1. Toma de puntos de control y ajuste en bloque: Se forman bloques con las imágenes pancromáticas y con las imágenes multiespectrales, midiéndose unos 13 puntos por imagen sobre ortofotografías aéreas con 0,5 m de tamaño de píxel.

a.2. Corrección geométrica: Incluyendo las coordenadas de los puntos de control terreno (imagen-ortofoto), puntos de enlace entre imágenes y los residuos finales obtenidos en cada punto (Se utilizan coordenadas ETRS89,UTM en los diferentes husos). Se realiza un control de calidad visual y geométrico, mediante la toma de 10 puntos de chequeo en cada escena. El error medio cuadrático obtenido en los puntos de chequeo debe ser menor de 1,5 píxeles, y el error máximo en cualquiera de los puntos, inferior a 2 píxeles.

Las imágenes son remuestreadas por el método de interpolación bicúbica; y también por el vecino más próximo para el caso de las imágenes multiespectrales.

a.3. Fusión o Pansharpening: Mediante el pansharpen se obtiene una imagen con la resolución espacial de la pancromática y la información radiométrica de la imagen multiespectral, (Figura 1).

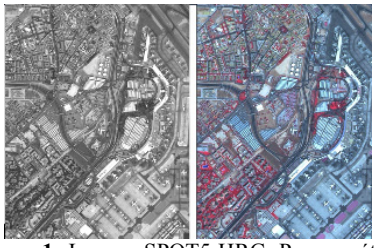


Figura 1: Imagen SPOT5 HRG, Pancromático y fusionada. Aeropuerto de Barajas, Madrid.

a.4. Equilibrado radiométrico: Se emplea para homogeneizar la radiometría de las imágenes, para obtener así un mosaico continuo. Se parte de una imagen de referencia para equilibrar las radiometrías de las más de 200 imágenes Spot. Esto se hace calculando los parámetros de una transformación lineal $y = a*x + b$ que se va a aplicar banda a banda.

a.5. Productos en combinaciones de 3 bandas: En el PNT se generan las siguientes combinaciones: falso color clásico, falso color Corine, pseudocolor natural y pseudocolor natural Siose que es una mezcla al 50% entre el pseudocolor natural siose y un color natural que se obtiene a partir de un azul sintético.

a.6. Realce: Pretende obtener una imagen fácil de interpretar y consiste en una expansión lineal del contraste de forma independiente para el rojo, verde y azul; posteriormente se aplica una curva gamma para darle brillo.

a.7. Mosaicos: Se obtiene un mosaico para Península y Baleares y otro para Canarias, para cada una de las combinaciones de bandas. En los años 2005, 2008, 2009 (Figura 2) y 2010 se ha cubierto todo el territorio español, por lo que hay dos mosaicos completos para cada uno de estos años. Entre los años 2006 y 2007 hay otra cobertura completa.

b) Media resolución

La periodicidad prevista inicialmente era de al menos 4 coberturas al año, pero desde mayo de



Figura 2: Mosaico de España SPOT5, Pseudo-color Natural SIOSE. 2009.

2008 se adquieren todas las imágenes tomadas sobre España por el satélite Landsat5, sensor Thematic mapper. Otras alternativas complementarias a las imágenes Landsat5 son DEIMOS1, satélite español de iniciativa privada o el futuro Sentinel 2.

La captación repetitiva de información de una misma zona se realiza con el fin de permitir el seguimiento y análisis multitemporal (intra e interanual) de la evolución del medio ambiente y del territorio. También es útil para la gestión medioambiental, clasificación automática de coberturas del suelo, identificación de cultivos, detección de regadíos, información forestal, parámetros biofísicos, etc.

Las imágenes Landsat5 se reciben con un nivel de procesamiento 1G. Todo el procesado geométrico posterior, así como los tratamientos radiométricos, son realizados en el Instituto Geográfico Nacional.

b.1. Tratamiento geométricos:

Toma de puntos de control y ajuste en bloque (proceso similar al realizado con las imágenes de alta resolución pero midiendo 33 puntos de control por imagen) y corrección geométrica.

b.2. Tratamientos radiométricos en el óptico:

El paso a reflectividades sigue las especificaciones técnicas para el PNT del Grupo de Trabajo de Media Resolución (Chuvieco et al. 2008) y se está implementando mediante un WPS. Los pasos propuestos son:

- Obtención de radiancias: Se calcularán las radiancias a partir de los coeficientes de calibración del sensor.

- Cálculo de reflectividad aparente TOA.

- Corrección atmosférica. Se ha optado por el modelo del objeto oscuro, desarrollado por Chavez (1996).

- Corrección topográfica. Se utiliza un método empírico-estadístico.

c) Baja resolución

El PNT prevé la adquisición de coberturas con imágenes multiespectrales de 100 m a 500 m de resolución y periodicidad de 1 a 3 días. Los sensores propuestos son AQUA/TERRA Modis y ENVISAT Meris (con 250 m y 300 m de resolución máxima respectivamente). En el futuro también estará disponible Sentinel 3.

Los datos de baja resolución se utilizan principalmente para analizar la evolución de fenómenos que cambian rápidamente a lo largo del tiempo, mediante la generación de parámetros biofísicos registrados en forma de "variables continuas". La disponibilidad diaria o incluso superior de las imágenes de estos sensores y de los parámetros derivados de ellas, facilita el seguimiento en tiempo casi real de la superficie de la Tierra, orientada al análisis de variables medioambientales.

Las imágenes se adquirirán en tiempo real mediante las antenas receptoras existentes. Se transformarán los datos brutos (formato.pds) en datos de nivel 1b, es decir, radiancia y reflectividad en el sensor, ángulo de observación e iluminación y georreferenciación (Camacho et al. 2009).

PERSPECTIVAS FUTURAS

El gran inconveniente con el que se encuentran los usuarios de imágenes de satélite a la hora de trabajar con ellas es la existencia de nubes. Según el "International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), se estima que nuestro planeta está cubierto permanentemente por nubes en más de un 60%. Desde el punto de vista operativo, las nubes son la fuente más significativa de error para la obtención de la reflectividad de la superficie y afectan a la mayoría de las aplicaciones en teledetección, haciendo inservibles muchas de las imágenes adquiridas por los distintos satélites.

Lo ideal sería, por tanto, poder eliminar las nubes de cualquier imagen conservando la información del territorio. Hasta ahora se ha investigado en la detección automática de nubes y se han elaborado algoritmos de detección para

distintos sensores, pero lo que se consigue es un enmascaramiento de las nubes dejando inservible esa parte de la imagen.

El Instituto Geográfico Nacional, en colaboración con otros organismos públicos españoles: Instituto de Desarrollo Regional de Albacete (IDR), Image Procesing Laboratoty de U.Valencia (IPL), Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales de Barcelona (CREAF), está trabajando en un proyecto de investigación para poder obtener imágenes libres de nubes a partir de la serie temporal de imágenes, procedentes de distintos sensores, con distintas resoluciones espaciales y temporales, de las que se disponga para un mismo punto de la tierra.

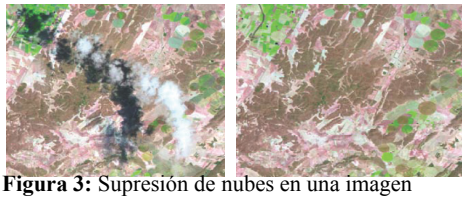


Figura 3: Supresión de nubes en una imagen mediante interpolación temporal.

La idea es utilizar imágenes procedentes de múltiples sensores para conocer la superficie de reflectancia espectro-temporal para cada punto de la superficie y poder modelarla. Una vez creado el modelo de esta superficie, se podrá obtener el valor de reflectancia para cualquier fecha y longitud de onda de las que no se posea datos (imagen) de partida. Por lo tanto, se podrán suprimir las nubes de una imagen sustituyendo los valores radiométricos de los píxeles con nubes por los valores de reflectancia correspondientes para cada píxel (Figura 3). Para conseguir tal propósito, es necesario realizar downscaling o upscaling, (transformar una imagen de un tamaño de píxel a otro para poder comparar imágenes con distinta resolución espacial) e interpolación temporal (Villa et al. 2009).

CONCLUSIONES

El Plan Nacional de Teledetección ha impulsado el uso masivo de imágenes de satélite en múltiples proyectos y trabajos de la Administración Española, al coordinar la adquisición de imágenes y realizar sobre estas los tratamientos geométricos y radiométricos básicos y distribuirlas a toda la Administración Pública Española, Organismos Públicos de Investigación y Universidades. Pero el PNT no permanece estático, sino que, tratando de responder a las necesidades de los usuarios finales, estudia la adquisición de imágenes de otros sensores y satélites; y la obtención de nuevos productos derivados, como los compuestos sin nubes.

BIBLIOGRAFÍA

CAMACHO, F., SOBRINO, J.A., ROMAGUERA, M., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., et al., 2009. *Estudio de los tratamientos a realizar sobre las imágenes de satélite de baja resolución adquiridas para el PNT*. Valencia.

CHUVIECO, E., HANTSON, S., MORÉ, G., CEA, C., et al., 2008. *Propuesta de procesado de imágenes Landsat y evaluación de algunos aspectos en zonas piloto para el PNT*. Barcelona.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, 2009. *Documento PNT versión 2.0*. Madrid.

TEJEIRO, J.A., 2010. *Procedimiento Operativo Estándar. Plan Nacional de Teledetección. Procesado Básico Alta Resolución*. IGN. Madrid.

VILLA, G., MORENO, J., CALERA, A., (3), AMORÓS**,** J., et al., 2010. STRS (Spectro-*Temporal Reflectance Surfaces): a new conceptual framework for the integration of remote sensing data from multiple different sensors.* RAQRS. Valencia.

CHAVEZ, P.S., 1996. *Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62, 1025-1036.

Clasificadores lineal y cuadrático con utilización del contexto espacial

Borja Rodríguez y José A. Malpica

Universidad de Alcalá de Henares. Escuela Politécnica, Campus universitario externo. 28871 Alcalá de Henares (Madrid, España). Tel: 918856748, Fax: 918856835. Correo electrónico: borja.rodriguezc@uah.es

RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar la sensibilidad de un algoritmo de clasificación lineal (distancia euclidea) y otro de clasificación cuadrática (distancia de Mahalanobis) ante factores como la separabilidad o la correlación entre clases, determinando de una forma empírica cuándo es más conveniente usar uno u otro clasificador. También se ha estudiado la conveniencia de aplicar procesos de post clasificación utilizando el contexto espacial para mejorar el rendimiento de los algoritmos de clasificación. Para este estudio se han utilizado imágenes sintéticas e imágenes satelitales. La facilidad en la manipulación de las imágenes sintéticas ha permitido descubrir la relación entre la correlación espacial de las clases y la capacidad de detección de cada clasificador.

Palabras clave: clasificación supervisada, post-clasificación, imágenes sintéticas

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the sensitivity of a linear classification algorithm (Euclidean distance) and a quadratic classification (Mahalanobis distance) with features such as separability or correlation between classes; of empirically determining when it is more convenient to use one or other classification. It has also been considered to implement the process of post classification using spatial context to improve the performance of classification algorithms. For this study it has been used synthetic images and satellite images. The ease of manipulation of synthetic images has allowed to discover the relationship between the spatial correlation of the classes and the detection capability of each classifier.

Keywords: *supervised classification, post classification, synthetic images*

INTRODUCCIÓN

El rendimiento de los algoritmos de clasificación de imágenes digitales está en relación directa con la resolución espacial de la imagen: cuanto mayor sea esta resolución, más compleja será su clasificación ya que habrá mayor número de detalles. Cuando la resolución es elevada, podría ser conveniente tener en cuenta la información contextual para mejorar el resultado de la clasificación. Existen gran cantidad de clasificadores con diversos grados de complejidad: desde los simples clasificadores basados en paralelepípedos hasta los sofisticados y más actuales métodos basados en redes neuronales (Fauvel et al., 2008; Del Frate et al., 2007). En muchas ocasiones se utilizan algunos algoritmos pensando que permiten obtener mejores resultados que otros porque en una situación determinada y con unas imágenes concretas un método ha sido superior a otro, pero en la literatura especializada no se encuentran estudios empíricos sistemáticos que demuestren cuándo es mejor utilizar uno u otro clasificador.

Los métodos de clasificación usados más frecuentemente llevan a cabo una clasificación pixel a pixel, es decir, se etiquetan los pixeles de forma individual de acuerdo a unas reglas y sin tener en cuenta la categoría de los pixeles vecinos. Sin embargo, en las imágenes reales, los píxeles adyacentes están correlacionados debido a que las cubiertas del terreno, generalmente, tienen lugar sobre regiones más grandes que el tamaño de un pixel. Existen numerosos algoritmos que tratan de mejorar la clasificación pixel a pixel inicial mediante diferentes reglas que tienen en cuenta la categoría de los pixeles vecinos, así como otros aspectos útiles para discriminar categorías como pueden ser el tamaño o la posición (Steinnocher, 1996; Van de Voorde et al., 2007).

DATOS DE PARTIDA

Para llevar a cabo este estudio se han seleccionado dos tipos de imágenes: sintéticas y reales. Las imágenes sintéticas (Rodríguez Cuenca, 2010) son de gran utilidad para realizar

pruebas sobre ellas ya que sus parámetros están perfectamente controlados por el usuario (permiten modificar el número de bandas, las clases representativas, aspectos estadísticos…), lo que resulta difícil en una imagen tomada por un satélite. Se han creado una serie de imágenes sintéticas con distintos grados de separabilidad y correlación entre sus categorías para analizar en qué casos funcionan mejor los algoritmos testeados.

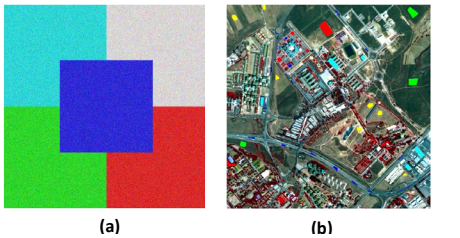


Figura 1: (a): Imagen sintética incorrelada con índice de separabilidad intermedio; (b): imagen SPOT5 utilizada en este estudio a la que se han superpuesto los campos de entrenamiento de las 5 categorías

Para que las condiciones de las imágenes sintéticas fueran similares a las reales que luego se van a utilizar se han creado aleatoriamente y con una distribución gaussiana 4 bandas y 5 clases significativas (Figura 1 (a)).

Con las imágenes sintéticas se estudia el comportamiento de los algoritmos de una forma empírica y controlada y se extraen una serie de conclusiones con la intención de que sean extensivas a las imágenes reales. Con objeto de comprobar que las conclusiones obtenidas con el trabajo en las imágenes sintéticas son fidedignas, se ha utilizado en este estudio una imagen real procedente del sensor SPOT5, centrada en el Campus Universitario externo de la Universidad de Alcalá de Henares y con una resolución espacial de 2,5 metros. Está compuesta por 4 bandas: la primera en el verde (0,50 - 0,59 µm), otra en el rojo (0,61 - 0,68 µm), una tercera en el infrarrojo cercano (0,78 - 0,89 µm) y otra más en el infrarrojo medio (1,58 - 1,75 µm). A la hora de clasificar se han tenido en cuenta 5 clases representativas (Figura 1(b)).

En las imágenes sintéticas se han tomado como campos de entrenamiento una parte aleatoria de la totalidad de los pixeles que conforman cada clase: se distinguen fácilmente las fronteras entre clases, lo que no ocurre en las imágenes reales. En la imagen SPOT se han tomado como campos de entrenamiento regiones representativas de las diferentes categorías consideradas (Figura 1 (b)).

METODOLOGÍA

Para analizar los algoritmos de clasificación se ha seguido una metodología empírica, con experimentos sobre imágenes sintéticas generadas con una distribución normal para cada una de las clases. Como método lineal se ha utilizado la distancia euclídea y como clasificador cuadrático la distancia de Mahalanobis (Richards y Jia, 2006).
Sean C clases:

$$\omega_i, i = 1, ..., C$$

y la probabilidad condicionada de ocurrencia de la clase ω_i en el pixel m habiendo sido observada la vecindad $\aleph_m$:

$$p_m(\omega_i \mid \aleph_m) \qquad i = 1, \ldots, C \qquad (1)$$

La vecindad de un pixel influye en su clasificación, ya que los pixeles suelen formar regiones que se corresponden con coberturas del suelo.
El pixel m es asignado a la clase ω_i si

$$p_m(\omega_i \mid \aleph_m) \geq p_m(\omega_j \mid \aleph_m) \qquad \forall\ i \neq j \qquad (2)$$

Según el teorema de Bayes se tiene que:

$$p_m(\omega_i \mid \aleph_m)\ \alpha\ p_{\omega_i}(m).p(\omega_i \mid \aleph_m) \qquad (3)$$

donde $p_{\omega_i}(m)$ es la verosimilitud y $p(\omega_i \mid \aleph_m)$ es la probabilidad a priori de la clase i para la vecindad $\aleph_m$. El principal reto radica en encontrar un valor para la expresión $p(\omega_i \mid \aleph_m)$, probabilidad a posteriori.

En cuanto a la postclasificación, se ha estudiado igualmente de forma empírica el comportamiento de Majority (filtros) y de Probabilistic Label Relaxation (PLR1). Además, ha sido desarrollado por los autores un algoritmo de postclasificación llamado PLR2, similar a PLR1 pero utilizando estadísticas de segundo orden (Rodríguez Cuenca et al., 2011) y cuyo rendi-

miento también ha sido determinado de forma empírica.

PLR1 y PLR2 obtienen inicialmente la probabilidad a posteriori $p(\omega_i \mid \aleph_m)$ a partir de las probabilidades de la clasificación original (Mahalanobis en nuestro caso) y mediante iteraciones la van modificando hasta que el resultado converge. PLR1 lo hace con estadísticas de primer orden (pares de pixeles) mientras que PLR2 utiliza estadísticas de segundo orden (ternas de pixeles).

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados más significativos obtenidos en este trabajo:

- El algoritmo de clasificación Mahalanobis proporciona mejores exactitudes que el de mínima distancia siempre y cuando la correlación de la imagen sea alta (Figura 2 y 3)

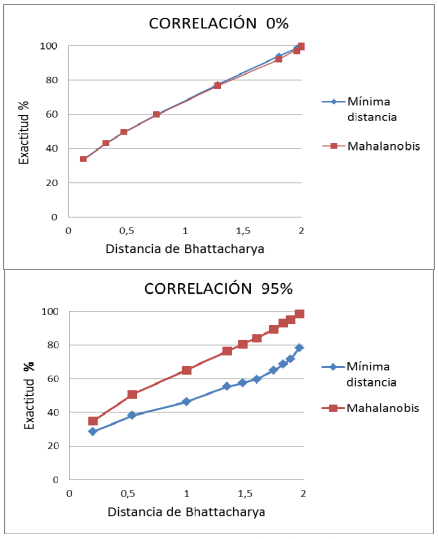


Figura 2: Comportamiento de los algoritmos de clasificación estudiados con distintos grados de correlación

A medida que disminuye la correlación de las clases, mejora el rendimiento de la distancia euclidea, llegando a superar en algún momento a Mahalanobis (siempre y cuando la separabilidad sea buena y la correlación muy baja). Por su parte, Mahalanobis mantiene un comportamiento más o menos constante con los distintos grados de correlación. Cuando hablamos de correlación nos estamos refiriendo a la correlación entre las clases determinadas por el usuario, no entre las bandas que conforman la imagen.

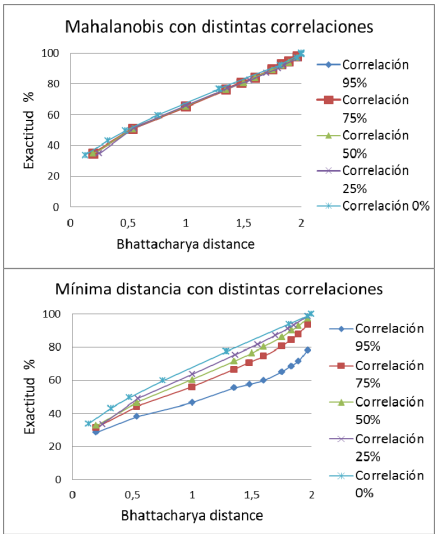
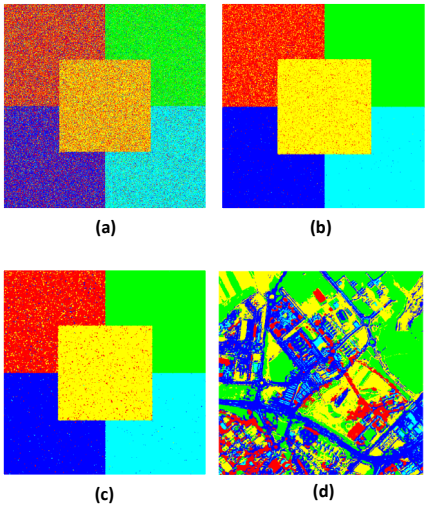
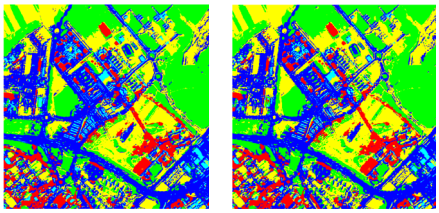


Figura 3: Comparativa del rendimiento de mínima distancia y Mahalanobis en imágenes con distintos grados de correlación entre clases

- En cuanto al contexto, los procesos con filtros proporcionan mejores resultados que el método PLR1 cuando a los pixeles vecinos se les da el mismo peso.

- El rendimiento del algoritmo de relajación de la etiqueta PLR1 no mejora al aumentar las iteraciones. Se ha observado que aplicando entre 3 y 5 iteraciones se obtienen los mejores resultados (Figuras 4 (a), (b) y (c); (d), (e) y (f)).





(e) (f)

Figura 4: (a): Imagen sintética clasificada con Mahalanobis; (b): filtro Majority aplicado sobre (a); (c): relajación de la etiqueta aplicado sobre (a).

(d): imagen original clasificada con Mahalanobis; (e): filtro Majority aplicado sobre (d); (f): relajación de la etiqueta aplicado sobre (f)

- El algoritmo desarrollado, PLR2, proporciona mejores resultados que PLR1 y que Majority. Visualmente esto puede observarse en la Figura 5. Aunque PLR2 produce más ruido que PLR1 y que Majority, clasifica mejor en las zonas de delimitación entre clases. Cuando se utiliza más de un pixel de avance en la ecuación (3) se obtienen mejores resultados:

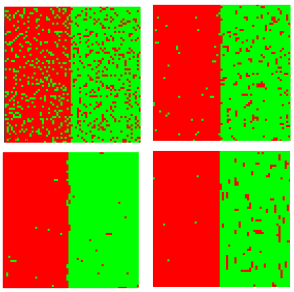


Figura 5: Mahalanobis, Majority, PLR1 y PLR2

- PLR2 es más robusto que PLR1 en cuanto al número de iteraciones se refiere, sin observarse una caída en la exactitud al aumentar el número de iteraciones

CONCLUSIONES

El clasificador de Mahalanobis ofrece resultados más robustos que el de mínima distancia, ya que no es tan sensible ante cambios en la correlación como este último.

En cuanto a los procesos de post clasificación evaluados, el de Majority (o filtros) ha dado mejores resultados que el método de la relajación de la etiqueta PLR1. El algoritmo que utiliza estadísticas de segundo orden, PLR2, mejora los resultados obtenidos con los métodos de filtros y el PLR1, especialmente en las regiones de contacto entre varias clases, que son las más conflictivas, y se acerca al rendimiento deseado para los procesos de postclasificación.

BIBLIOGRAFÍA

FAUVEL, M.; BENEDIKSSON, J.A.; CHANUSSOT, J.; SVEINSSON, J.R., 2008. *Spectral and spatial classification of hyperspectral data using SVMs and morphological profiles*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 46 (11), 3804 – 3814.

DEL FRATE, F.; PACIFI, F.; SCHIAVON, G.; SOLIMINI, C., 2007. *Use of neural networks for automatic classification from high – resolution images*. IEEE transactions on geosciences and remote sensing, 45 (4), 800 – 809.

RICHARDS, J. A. y JIA, X., 2006. R*emote sensing digital image analysis*. Springer – Verlag.

RODRÍGUEZ CUENCA, B., 2010. *Clasificación de imágenes con aplicación del contexto*. Universidad de Alcalá de Henares. Proyecto fin de carrera, Escuela Superior de Arquitectura y Geodesia.

RODRÍGUEZ CUENCA, B., MALPICA, J.A., y ALONSO, M.C., 2011. *A spatial contextual post – classification method for Remote Sensing Data*. Enviado a "Transactions on Geoscience & Remote Sensing".

STEINNOCHER, K., 1996. I*ntegration of spectral and spatial classification methods for building a land – use model of Austria*. Austrian Research Centre Seibersdorf, 31, 841 – 846.

VAN DE VOORDE, T.; DE GENST, W.; CANTERS, F., 2007. *Improving pixel – based VHR Land – cover classifications of urban areas with post – classification techniques*. American society for Photogrammetry and Remote Sensing, 73 (9), 1017 – 1027.

Algoritmo no supervisado para la detección de nubes con MSG

P. Salvador, A. Calle y J.L. Casanova

LATUV. Universidad de Valladolid. C/Paseo de Belén, s/n. 47011 Valladolid (España). Correo electrónico: pablo@latuv.uva.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un Nuevo algoritmo de detección de la cubierta nubosa mediante imágenes de MSG, operativo a escala global en período diurno. Este algoritmo se fundamenta en la alta resolución espectral y temporal del sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Las máscaras de nubes generadas con este algoritmo durante todo el año 2009 han sido comparadas con las generadas por los algoritmos de la NASA (MOD35) para el sensor Terra-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y de EUMETSAT para el sensor SEVIRI en toda España. El resultado muestra un acuerdo promedio del 88% cuando se compran con el algoritmo de EUMETSAT y mayor del 83% con el MOD35.

Palabras clave: Filtro de nubes, MSG.

ABSTRACT

This work tries to present a new cloud detection algorithm with MSG images, operative at global scale near the solar noon. The algorithm takes advantage of the high spectral and temporal resolution of the SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) sensor. The cloud masks generated during a whole year (2009) have been compared to the masks obtained with the NASA algorithm MOD35 with Terra-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) images and the EUMETSAT algorithm for MSG-SEVIRI in Spain. The result shows an 88% agreement with EUMETSAT and better than 83% with the MOD35 algorithm.

***Keywords**, Cloud masking, MSG.*

INTRODUCCIÓN

Las nubes ocultan la superficie de la tierra para los sensores con canales en los rangos del espectro electromagnético visible e infrarrojo cercano hasta las 3 μm a causa de la absorción y la dispersión (Elachi, 1987). La detección de la cubierta nubosa es una tarea previa imprescindible en muchos casos, para discriminarla de la cobertura objeto del estudio o bien identificarlas en los casos en los que el objeto de estudio sea la propia nube.

El mecanismo más eficiente para la detección de nubes es la interpretación visual. Este método se fundamenta en la formación de un foto-intérprete que distinga, tendiendo en cuenta ciertos criterios, espaciales, temporales y espectrales, las nubes del resto de cubiertas. Estos criterios son muy fáciles de utilizar por una persona, pero resulta muy difícil definirlos en el marco de un algoritmo no supervisado. Debido a estas dificultades, se han desarrollado algoritmos no supervisados basados en umbrales espectrales, espaciales y temporales o en códigos de transferencia radiativa. Todos estos algoritmos se basan en los diferentes comportamientos que presentan las nubes en la tierra o el mar. En términos generales, las nubes suelen presentar reflectancias mayores que la superficie terrestre en el espectro visible y menores temperaturas de brillo en la región térmica del espectro. La evolución temporal de la cubierta nubosa es, generalmente, más dinámica que la de la superficie terrestre. El proyecto APOLLO (AVHRR Processing scheme Over cLoud Land and Ocean), por ejemplo, para generar una máscara de nubes utiliza los cinco canales del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA (Gesell 1989).

El objetivo de este trabajo es presentar un algoritmo de detección de nubes no supervisado, basado en el sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), que minimiza los errores de comisión y omisión y no requiere de más información además de las propias bandas del sensor SEVIRI. Este algoritmo está basado en umbrales espectrales, espaciales y temporales.

Los umbrales involucrados en el proceso se auto-actualizan de manera no supervisada en las sucesivas escenas, de esta manera el algoritmo es válido para todo tipo de cubiertas a escala global.

DATOS DE PARTIDA

Las imágenes empleadas en este trabajo han sido recibidas y procesadas en el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV) por medio de antenas propias de MSG-SEVIRI (Schmetz et al., 2002) y Terra-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

La NASA ha desarrollado un algoritmo de detección de nubosidad para el sensor MODIS, MOD35, descrito en (Ackerman et al., 1997) y validado respecto a medidas de campo en (Kotarba, 2009).

EUMETSAT ha desarrollado un algoritmo de detección de la cubierta nubosa para el sensor SEVIRI. El algoritmo está basado en un modelo de cielo despejado. En total se usan 34 filtros, más el modelo "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF) de predicción meteorológica, un modelo de transferencia radiativa (Saunders, 2002) y datos auxiliares (EUMETSAT, 2007).

Durante 358 días de 2009 se han generado mediante el nuevo algoritmo las correspondientes máscaras de nubes durante las 10:00 y las 12:00 horas (UTC). De esta manera 2798 máscaras han sido generadas, y 399 de estas máscaras se han comparado con las correspondientes máscaras del algoritmo MOD35, seleccionadas de modo que la hora de adquisición sea la más próxima a la correspondiente de la imagen MODIS. 305 de las 358 máscaras se han comparado con las generadas por EUMETSAT.

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

La metodología consiste en filtros basados en umbrales. Estos filtros pueden ser divididos en tres grupos. El primer grupo es el de filtros espectrales, basados en el diferente comportamiento que presentan la reflectancia y temperatura de brillo de la superficie de la tierra y de las nubes. De esta manera el algoritmo considera un píxel nuboso si el valor de la reflectancia en los canales visibles (alrededor de 0.6, 0.8 μm y el HRV) es mayor que cierto umbral (T006, T008 y THRV, respectivamente). Si el valor de la temperatura de brillo en el canal alrededor de las 10.8 μm para el píxel es menor que un umbral (T108) entonces el píxel también se cataloga como nuboso. Valores inferiores a cierto umbral (T108039) en la diferencia entre los canales alrededor de las 10.8 y 3.9 μm indican la presencia de nubes bajas, debido a la contribución de la alta reflexión solar en las nubes en las 3.9 μm. El siguiente grupo de filtros se basa en la velocidad de cambio en la reflectancia y emisión de ambas superficies. Éste es el grupo de los filtros temporales. Éstos se aplican sobre el cociente y la diferencia de la imagen actual y la inmediatamente anterior. Un píxel se considera nuboso si el módulo de estas operaciones resulta mayor que un cierto umbral. También se consideran los valores mayores y menores dentro de una ventana alrededor del píxel en cuestión y si la diferencia entre ambos es mayor de un cierto umbral el píxel se cataloga como nuboso. El último grupo de filtros es el de claridad y de detección de nieve. El filtro de claridad detecta, mediante ciertos valores umbral en la reflectancia y la emisión (CT006, CT008, CTHRV, CT108, CT134 y CT108039), pixeles libres de nubes, el algoritmo cataloga un píxel como despejado si este filtro es positivo, incluso en el caso en el que otro filtro haya sido positivo también. La nieve es una cubierta que, debido a su respuesta espectral y la evolución temporal, puede ser una fuente de error para los filtros temporales y espectrales. El filtro de nieve trata de corregir este problema, identificando pixeles cubiertos de nieve mediante el "Normalized Difference Snow index" (NDSI) (Hall et al., 1995) y su evolución temporal.

El éxito de los filtros espectrales y de claridad está directamente afectado por los valores de los correspondientes umbrales. Debido a la variabilidad espacial y temporal de la respuesta espectral de los pixeles escoger estos umbrales es complicada y debe de hacerse para cada pequeña área, para cada momento del día y para cada día o pequeño grupo de días. A continuación se describe la metodología propuesta para este proceso.

Esta metodología se basa en el análisis del histograma, construido con los valores de los pixeles de escenas correspondientes a varios días antes de la escena actual y para cada ventana de 20x20 pixeles de 1km. En estos histogramas generados es fácil distinguir entre distintas familias de valores, pero para un algoritmo no supervisado es difícil definir un umbral que las separe. Por los filtros anteriores sabemos cuales de estos pixeles han contribuido al histograma

como nube, por lo que pueden eliminarse del mismo, simplificando el problema. De esta manera se generan los umbrales: para los canales en el rango visible del espectro, el umbral de claridad se define como el valor de la reflectancia correspondiente al máximo del histograma. El valor mínimo de la reflectancia, mayor que el umbral de claridad correspondiente y cuyo valor de histograma es menor que el 5% del máximo del histograma y sumado a un 20% de la diferencia entre él mismo y el umbral de claridad se define como el umbral (T008, T006 y THRV). En el caso de los canales térmicos el valor del umbral de claridad se define como el valor de la temperatura de brillo que corresponde al máximo del histograma. Después de encontrar este valor se determina el valor de la temperatura de brillo menor que el umbral de claridad y cuyo valor del histograma es mayor que el 8% del valor correspondiente al máximo del histograma. Esta temperatura de brillo menos dos grados es el umbral espectral elegido para cada canal térmico.

RESULTADOS Y VALIDACIÓN

El algoritmo descrito en el apartado anterior se ha aplicado sobre el territorio español durante 2009 y el resultado se ha comparado con la máscara de nubes obtenida por el algoritmo MOD35 y con la máscara obtenida por el algoritmo de EUMETSAT para el sensor SEVIRI.

Durante 2009, el algoritmo MOD35 clasificó 69405295 pixeles como cubiertos y 69327207 probablemente cubiertos. La Tabla 1 muestra el tanto por ciento de acuerdo y desacuerdo (respecto del número de pixeles nubosos según el algoritmo MOD35) entre la máscara de nubes de MODIS y EUMETAT, la máscara de nubes obtenida por el algoritmo descrito en el apartado anterior y con la máscara obtenida con cada uno de los canales de MSG utilizados en el algoritmo. La comparación se ha llevado a cabo en dos etapas, primeramente considerando como píxel nuboso según el algoritmo MOD35 solo el primer nivel, es decir, seguridad de cubierto y luego los dos primeros niveles, seguridad de cubierto y probablemente cubierto.

	MODIS seguridad de nuboso		
Canal	**Acuerdo**	**Omisión**	**Comisión**
Final	0.89	0.11	0.63
HRV	0.76	0.24	0.44
006	0.87	0.13	0.48
008	0.73	0.27	0.54
108	0.86	0.14	0.62
108039	0.88	0.12	0.47
134	0.69	0.31	0.44
	MODIS nuboso + probablemente nuboso		
Final	0.82	0.18	0.33
HRV	0.70	0.30	0.24
006	0.81	0.19	0.28
008	0.69	0.31	0.31
108	0.80	0.20	0.32
108039	0.82	0.18	0.27
134	0.65	0.35	0.25
	EUMETSAT		
Final	0.88	0.12	0.26
HRV	0.77	0.23	0.17
006	0.86	0.14	0.27
008	0.73	0.27	0.26
108	0.85	0.15	0.26
108039	0.86	0.14	0.24
134	0.68	0.32	0.21

Tabla 1: Acuerdo y errores (omisión y comisión) entre la máscara del nuevo algoritmo, la máscara del MOD35 y la de EUMETSAT.

Las discrepancias entre las máscaras obtenidas mediante el nuevo algoritmo y el MOD35 se deben principalmente a la diferencia entre sensores. Una de las diferencias más notables entre ambos sensores es la resolución espacial. Este hecho hace que MSG no pueda detectar pequeños cúmulos mientras que MODIS puede. Por otro lado, SEVIRI puede clasificar un píxel como nuboso, cuando está sólo parcialmente cubierto, mientras que MODIS puede detectar cuales de los aproximadamente 3x3 píxeles de 1 km están cubiertos y cuales no.

Otra diferencia importante es el momento en el que se toma la imagen. El algoritmo descrito en este trabajo utiliza dos imágenes consecutivas para generar la máscara de nubes cada cuarto de hora, mientras que MODIS toma una imagen de la península en apenas 2 minutos. De esta manera las máscaras de nubes generadas pueden estar ligeramente desplazadas.

Se ha llevado a cabo un análisis sobre la distribución espacial los errores de comisión y omisión. La Figura 1 muestra el número de errores para cada píxel, tomando como referencia los clasificados por el MOD35 como seguridad de nubosos y probablemente nubosos. Los errores por omisión del nuevo algoritmo respecto del MOD35 muestran valores mayores en las áreas con mucha reflectancia y niveles bajos de vegetación. Algunas de las imágenes en las que se da este caso han sido analizadas por un foto-intérprete dando la razón al nuevo algoritmo. Un caso particular de este hecho es la región de Almería.

En esta zona durante gran parte del año la mayoría del terreno se tapa con plásticos de muy alta reflectividad como consecuencia de las explotaciones de invernaderos. El nuevo algoritmo auto-regula los umbrales en esa área y cataloga estos píxeles como libres de nubes, coincidiendo con el resultado obtenido por una interpretación visual, pero no con el MOD35.

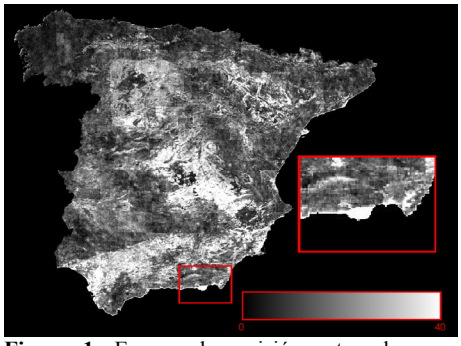


Figura 1: Errores de omisión entre el nuevo algoritmo y el MOD35 acumulados durante 2009.

La comparación con la máscara de EUMETSAT presenta buenos resultados, mejores que con MODIS en la mayor parte de los casos. Para más del 95 % de los días el acuerdo es mayor que el 80%. Los casos en los que el acuerdo es menor del 30% presentan nubosidad (según el algoritmo de EUMETSAT) en menos de 10000 pixeles, mientras que el promedio de pixeles cubiertos en cada escena sobre la España peninsular es de 230000. Si hacemos el promedio del acuerdo entre algoritmos, ponderándolo mediante el número de pixeles nubosos, en vez de la simple media diaria, obtenemos un acuerdo promedio ponderado anual del 93%.

CONCLUSIONES

Durante la validación se han comparado los resultados del algoritmo con las máscaras de nubes obtenidas mediante imágenes del sensor Terra-MODIS con el algoritmo MOD35. También se han utilizado máscaras de nubosidad obtenidas por EUMETSAT con imágenes MSG. El acuerdo entre las máscaras es mejor del 83% en todos los casos, siendo del 88% cuando comparamos el nuevo algoritmo con el de EUMETSAT y mejor del 80% en más del 95% de los casos. El acuerdo medio diario, ponderado por la cantidad de nubosidad es del 93%.

BIBLIOGRAFÍA

ACKERMAN, S., STRABALA, K., MENZEL, P., FREY, R., MOELLER, C., GUMLEY, L., BAUM, B., SCHAAF, C., RIGGS, G.. 1999. *Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document (MOD35)*. MODIS Cloud Mask Team. Version 3.2, November 1997.

ELACHI, C., 1987. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Wiley Interscience. ISBN 0-471-84810-7.

EUMETSAT, 2007. *Cloud Detection for MSG – Algorithm Theoretical Basis Document*. Doc.No. EUM/MET/REP/07/0132.

GESELL, G., 1989: *An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data: An extension to the APOLLO software package*. Int. J. Remote Sens., 10, 897-905.

HALL, D. K., RIGGS, G. A., & SALOMONSON, V. V. 1995. *Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data*. Remote Sensing of Environment, 54, 127–140.

KORTABA, A.Z., 2009. *A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations*. Atmospheric Research, 92. 522-530.

SAUNDERS, R.W., 2002. RTTOV-7 *Science and validation report. NWP SAF report* available from RTTOV web site: metoffice.com/research/interproj/nwpsaf/rtm/

SCHMETZ, J., PILI, P., TJEMKES, S., JUST, D., KERKMANN, J, ROTA, S., & RATIER, A. 2002. *An Introduction to Meteosat Second Generation* (MSG), *BAMS*, 83, 977-992

AGRADECIMIENTOS

Proyecto CGL2004-00173 financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y fondos europeos FEDER.

Formación en técnicas de teledetección para la implementación de modelos de gestión de recursos naturales

M. C. Serafini[1], M. E. Antes [1, 2] y S. Villanueva[1]

[1] Universidad Nacional de Luján, Departamento de Ciencias Básicas, (PRODITEL). Rutas 5 y 7 (6700) Luján, (Buenos Aires, Argentina). Correo electrónico: proditel@mail.unlu.edu.ar

[2] Centro de Sensores Remotos, Fuerza Aérea Argentina. Dorrego 4010, Ciudad Autonóma de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

En la República Argentina la preocupación por la formación de recursos humanos en teledetección ha observado un importante avance, particularmente luego de la modificación de la Ley de Educación Superior en el año 1995; en la actualidad son numerosas las instituciones que incluyen la temática en los Planes de Estudio de carreras ligadas al conocimiento del espacio geográfico y los recursos naturales. La Universidad Nacional de Luján, pionera en la enseñanza de esta disciplina, ofrece formación tanto a nivel de grado como de postgrado. En este trabajo se presentan las distintas actividades y metodologías desarrolladas para la capacitación en los distintos niveles educativos.

Palabras clave: teledetección, educación, metodologías, postgrado

ABSTRACT

The concern for human resources in remote sensing training in Argentina has had a major advance during last years, particularly after the amendment of the Higher Education Act in 1995; nowadays there are numerous academic institutions that include this thematic in the Curriculum of Careers related with the knowledge of geographical space and natural resources. Luján National University, a pioneer institution, offers training at both undergraduate and graduate levels. This paper shows the different activities and methodologies developed for training remote sensing in those educational levels.
Keywords: *remote sensing, education, methodologies, graduate*

INTRODUCCIÓN

La planificación territorial, como instrumento de una política de desarrollo que supere la visión sectorial y la acerque a una comprensión sistemática de la sociedad y el espacio es el resultado de la interacción de las dimensiones ambiental, cultural, económica y social con base en el territorio y tiene como objetivos fundamentales, la reducción de las disparidades del desarrollo regional y la mayor integración económica territorial.

Desde esta perspectiva, la teledetección ha dado, en los últimos 35 años, acabadas muestras de su utilidad en el relevamiento de los recursos productivos y la planificación territorial del país; esta herramienta se ha adoptado como la forma sistemática de obtención de datos y se ha incorporado a los procedimientos regulares de evaluación, vigilancia y control de recursos y medio ambiente, tanto dentro de las agencias estatales como en las empresas privadas.

El desafío de conocer y monitorear el estado de situación de los recursos naturales y el medio ambiente en un país tan extenso como Argentina, demanda contar con recursos humanos especialmente formados. Ello implica su capacitación para: acceder, en tiempo y forma, a la información que proveen las tecnologías sistémicas de Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica; llevar a cabo su procesamiento con el know-how adecuado; y tomar decisiones respecto de su aplicación a cuestiones diversas del campo del conocimiento ambiental.

De las recomendaciones surgidas de la Tercera Conferencia de las Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Ultraterrestre (UNISPACE III, 1999), puede destacarse el llamado a incrementar las acciones educacionales para la generalización de la utilización de estas herramientas en los países en vías de desarrollo. Dicha conferencia y la Declaración de Viena sobre el Espacio y el Desarrollo Humano recomendaron que las actividades del Programa de las

Naciones Unidas para la Educación y Aplicaciones de la Tecnología Espacial, promovieran la participación de los Estados Miembros en un marco de colaboración en los planos regional e internacional, haciendo hincapié en la promoción de los conocimientos y la capacidad de los países en desarrollo (ST/SPACE/18, 2003).

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar la situación observada en Argentina en relación a los programas de formación en la temática de teledetección, tanto a nivel de grado como de postgrado, que permitan abordar estudios orientados a la evaluación y manejo de los recursos naturales y el medio ambiente; en particular en el ámbito de la Universidad Nacional de Luján.

DESARROLLO

En la República Argentina, los primeros pasos orientados a la capacitación en disciplinas relacionadas con la teledetección, deben relacionarse con los trabajos realizados en base a la Fotointerpretación y la Fotogrametría. Pierina Pasotti, puede considerarse como una de las pioneras en la utilización de esta herramienta ya que es quien introduce, hacia 1940, la utilización de aerofotografías en la Carrera de Agrimensura en la Universidad Nacional de Rosario (Racca, J., et. al; 2000), incluyéndolas también en sus investigaciones y dando origen, en la década de 1950, a las primeras publicaciones científicas en esta disciplina en nuestro país. Hacia fines de 1960, principios de 1970, otras instituciones universitarias, entre las que se pueden mencionar, Universidad Nacional de San Juan, Universidad Nacional del Sur, Universidad de Buenos Aires, etc., comienzan a incluir estos conceptos en los Planes de Estudio de algunas carreras de grado, en particular Geología y Geografía. Poco después y con la disponibilidad de datos satelitales se introducen conceptos de teledetección, como módulos incorporados a la currícula de Asignaturas, tales como Fotogrametría, Fotointerpretación y Cartografía, entre otras; extendiéndose esto, en la década de 1980, a otras carreras tales como Agronomía, Ciencias Forestales, Ciencias Ambientales, etc..

La modificación más importante se puede observar en la década de 1990, con la sanción, en julio de 1995, de la Ley de Educación Superior, (Ministerio de Educación, 1995). Con la sanción de esta ley comienza toda una reestructuración de los Planes de Estudio en la mayor parte de las instituciones universitarias, dando lugar ello a la posibilidad de incorporar como Asignatura la disciplina teledetección en diferentes carreras de grado y postgrado (Figura 1).



Figura 1: Incorporación de la enseñanza de la teledetección en carreras de grado y postgrado

En ese contexto, los estudios orientados a apoyar la planificación territorial se concentran, entre otras cuestiones, en la determinación de estrategias que favorezcan la distribución espacial del bienestar social, conducentes a un manejo integral de los recursos terrestres mediante la implementación de modelos de gestión de recursos naturales (Serafini, M. C. y Sausen, T.; 2002). Haciéndose eco de estas tendencias, en varios países Latinoamericanos, entre los que se encuentra Argentina, se han implementado programas de capacitación, en los distintos niveles de educación.

En Argentina los primeros Programas de Capacitación en el área de Teledetección tienen su origen a partir de 1970 y estaban orientados a satisfacer las necesidades de formación de grupos de investigadores que comenzaban a utilizar esta tecnología; sin embargo, es recién hacia fines de la década de 1980 y principalmente en la del 1990 que la enseñanza de esta disciplina cobra importante impulso; a partir de este momento se advierte un acentuado crecimiento, tanto en lo que se refiere al número de cursos ofrecidos por diferentes instituciones como por la demanda de graduados en áreas relacionadas con el estudio del espacio geográfico y los recursos naturales.

En Argentina, la enseñanza terciaria ofrecida a nivel universitario se desarrolla a partir de 48 instituciones públicas y 46 privadas. Con el objetivo de relevar la situación de la enseñanza de la teledetección en este nivel de educación, fueron analizadas las propuestas académicas del total de universidades, tanto públicas como privadas y analizados los Planes de Estudios de

Carreras relacionadas con el estudio del espacio geográfico y los recursos naturales; en el caso universidades públicas, el 77 %, o sea 37 universidades, cuentan entre su oferta académica con carreras ligadas al estudio del espacio geográfico y los recursos naturales, mientras que en el caso de instituciones privadas, es de solo el 39 % (18 universidades). Por otra parte, en relación a la incorporación de la disciplina teledetección en los Planes de Estudio de estas Carreras debe indicarse que, para el caso de universidades públicas es del 80 %, siendo solo del 22 % en las privadas (Tabla 1).

Carreras	Universidades donde se dicta la carrera	Carreras que incluyen Teledetección
Agronomía	23	6
Agrimensura	10	9
Ciencias Ambientales	16	9
Ciencias Forestales	7	3
Geografía	20	16
Geología	14	9

Tabla 1: Cantidad de universidades donde se dictan las distintas carreras y en cuántas se incluye teledetección.

En la Figura 2 se puede observar la evolución de la incorporación de la asignatura teledetección en las universidades públicas, en el periodo comprendido entre 1970 y 2011.

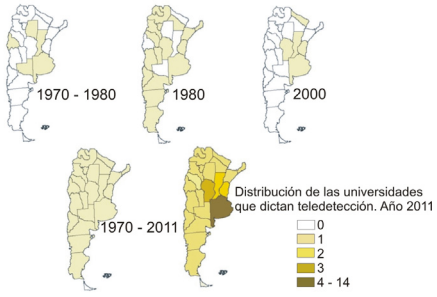


Figura 2: Evolución de la incorporación de la teledetección como asignatura en universidades nacionales

En el nivel de postgrado se advierte que la mayor parte de los programas de teledetección que se imparten en nuestro país tiene lugar en organismos de índole pública, principalmente universidades que ofrecen oportunidad de capacitación a través de cursos de corta y media duración.

En este sentido, si bien la temática se encuentra incluida en la currícula de carreras de cuarto nivel, tales como Especializaciones y Maestrías relacionadas con el estudio del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, la oferta académica de una carrera de Especialización o Maestría enteramente ligada a la enseñanza de la teledetección se traduce en las propuestas ofrecidas por cuatro universidades nacionales, a saber: Universidad Nacional de La Plata, Universidad Nacional de Luján, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs. As y Universidad de Buenos Aires.

CASO ESTUDIO: ENSEÑANZA DE LA TELEDETECCIÓN EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LUJÁN

En la Universidad Nacional de Luján la enseñanza de la Teledetección a nivel de grado comienza tempranamente, en el año 1987, al incluirse dentro de la Currícula de las Carreras de Ingeniería Agronómica y Licenciatura en Geografía, el módulo Sensores Remotos; se trata de una de las primeras experiencias a nivel de grado universitario, ya que en la mayor parte de los planes de estudio no se contemplaba esta disciplina. Poco tiempo después otras carreras, Profesorado y Licenciatura en Geografía, Licenciatura en Información Ambiental, fueron incorporando la Asignatura de Teledetección en sus planes de estudio.

La metodología desarrollada en la enseñanza de esta disciplina comprende una parte teórica y otra práctica. En la parte teórica se imparten conocimientos básicos de Teledetección, (fundamentos físicos y sistemas sensores) que permiten al alumno acreditar las competencias básicas, necesarias para abordar los contenidos propios del tratamiento de imágenes satelitarias, tanto visual como digital.

Por otro lado, y dado que parte de la actividad se desarrolla en el Centro Espacial de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) se incluyen en esta parte teórica las exposiciones realizadas por expertos de esta Comisión, donde los alumnos tienen oportunidad de conocer los avances observados en el desarrollo de los distintos proyectos de investigación que se realizan, orientados al estudio del espacio geográfico, recursos naturales y medio ambiente.

La parte práctica incluye actividades ligadas a la interpretación digital y visual de los datos satelitarios. En relación a esta última se incluye la generación de a) cartografía preliminar sobre uso del suelo considerando criterios de interpretación visual, b) control terrestre, c) cartografía final y d) elaboración de un informe final.

Dentro de las actividades prácticas se incluye la selección del área de estudio y se realiza una visita al campo de cuatro días de duración. Los alumnos cuentan con el material necesario para la realización del relevamiento: 1) Imágenes satelitarias: Landsat TM/Spot, Quick Bird, a escala seleccionada; 2) Fotografías aéreas; 3) Cartas topográficas y 4) Planillas de Campo. En cada una de los sitios de entrenamiento se obtiene información sobre: a) localización geográfica de las muestras, posicionamiento con GPS; b) descripción de la cobertura, tipo y condición de la misma. Cabe destacar la importancia del control terrestre, ya que permite al alumno corroborar o modificar las unidades ambientales definidas previamente, otorgando alto grado de precisión a la cartografía final generada.

Uno de los elementos a considerar en la estrategia previa de trabajo es la definición de la leyenda; mucho se ha escrito sobre esta cuestión (Chuvieco, E.; 2000), y sobre la conveniencia de utilizar leyendas jerárquicas y generales; en este sentido lo recomendable es que cada alumno elabore su propia leyenda, a partir del conocimiento de los diferentes sistemas de clasificación propuestos en la bibliografía.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los avances científicos y tecnológicos en teledetección resulta sumamente importante brindar a los alumnos de grado de distintas carreras universitarias y de postgrado, una formación actualizada en la temática. A través de esta capacitación, el alumno logra conocer los mecanismos que rigen a la teledetección e incorpora una visión diferente y actual de los sistemas de exploración y reconocimiento modernos basados en satélites y aeronaves.

Por otra parte brinda la posibilidad de contar con una óptica distinta y actualizada sobre los aspectos mencionados, conduciendo esto a un mejor aprovechamiento de los contenidos relacionados con el estudio del espacio geográfico y sus recursos.

Si bien se observa una evolución favorable en la incorporación de la disciplina teledetección, en las distintas carreras de grado de las universidades públicas, se requiere fortalecer las propuestas académicas a nivel de postgrado, a fin de satisfacer la demanda planteada.

BIBLIOGRAFÍA

CHUVIECO, E., 2000. *Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio*"; 1º ed.; Ed. Ariel Ciencia, pág. 162-167

MINISTERIO DE EDUCACION, 2011. *http://portal.educacion.gov.ar/universidad/universidad-en-cifras/estadisticas/* .

MINISTERIO DE EDUCACION, 2011. *http://www.me.gov.ar/consejo/df_leysuperior.html/*.

RACCA, J. M.; CANOBA, C. A. y PEÑA, H. C., 2000. *Enseñanza de la fotointerpretación y teledetección en la carrera de Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario;* Simposio de enseñanza de la Agrimensura, pág. 115-120

SERAFINI, M. C.; ANTES M. E.; VILLANUEVA S. N., 2010. *"Experiencia didáctica en teledetección. Caso de aplicación: análisis de recursos naturales y problemática ambiental"*. XIV Simposio Internacional de SELPER, CD rom.

SERAFINI, M.C. y SAUSEN, T. M., 2002. *Jornadas de Educación en Percepción Remota en el Ámbito del MERCOSUR: Sus avances de 1996 a la actualidad*"; IV Conferencia Espacial de las Américas.

UNISPACE III, 1998. *Third United Nation Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space, Education and Training in Space Science and Technologies,* A/Conf.

Análisis cuantitativo de la docencia y de la investigación en Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica en Cataluña

P. Serra[1] y X. Pons[1]

[1] DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de la UAB, 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona, España). Correo electrónico: pere.serra@uab.cat

RESUMEN

En las últimas dos décadas, la Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica (CTIG) ha experimentado un importante auge en todo el mundo como muestran la gran cantidad de revistas, congresos, proyectos de investigación y empresariales, etc, abarcando multitud de disciplinas como la biología, la geología o la arqueología, entre muchas otras. En este contexto parece lógico ahondar en el conocimiento del estado actual de la CTIG en Europa, en general, y en España, en particular. Este trabajo, encargado por el Institut Cartogràfic de Catalunya, presenta los resultados obtenidos en una encuesta realizada a todos los centros de investigación y de docencia, tanto públicos como privados, especializados en CTIG de Cataluña con el objetivo de conocer su estado desde el año 2004 hasta el 2009. El elevado número de respuestas obtenido hace de este estudio una referencia muy valiosa como radiografía de la situación de la CTIG en Cataluña y un punto de partida para futuros trabajos. Los resultados muestran la importancia en la investigación y en la docencia, con una tendencia al incremento.

Palabras clave: Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica (CTIG), docencia e investigación en CTIG, encuesta, Cataluña.

ABSTRACT

In the last decades, Science and Technology of Geographical Information(STGI) has experienced a boom in the world as shown by the large number of journals, conferences, research projects and business, etc, covering several subjects as biology, geology and archaeology, among many others. In this context it seems logical to increase our knowledge of the STGI current state in Europe in general and Spain in particular. This work, commissioned by the Cartographic Institute of Catalonia, presents the results of a survey made to all research and teaching institutions, both public and private, in Catalan CTIG with the aim of knowing its state from 2004 to 2009.The high number of responses obtained in this study makes an invaluable reference as a x-ray of STIG in Catalonia and as a possible example for future work. The results show its importance in research and teaching, with an increasing trend.

Keywords: *Science and Technology of Geographical Information (STGI), research and teaching in STGI, survey, Catalonia.*

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, la Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica (CTIG), de la cual destaca su carácter multidisciplinar y la integración de procesos y tecnologías (Bosque, 1999), ha experimentado un importante auge en todo el mundo como muestran la gran cantidad de revistas, congresos y proyectos de investigación, abarcando multitud de disciplinas como la biología o la geología, entre otras. En este contexto parece lógico profundizar en el conocimiento del estado actual de la CTIG en Europa, en general, y en España, en particular. En este sentido, cabe citar como antecedente el trabajo realizado por la Asociación Española de Teledetección (AET, 2008) cuyos resultados muestran la situación en el año de referencia de la docencia en teledetección en España.

En este trabajo, impulsado por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), se presentan los resultados obtenidos en una encuesta realizada a todos los centros de investigación y de docencia, tanto públicos como privados, en CTIG de Cataluña con el objetivo de conocer el estado de la disciplina desde el año 2004 hasta el 2009.

METODOLOGÍA

Fuentes de información

El principal problema inicial fue establecer qué centros de investigación y docencia debían recibir el cuestionario. Para ello se consultaron más de 200 páginas de Internet, correspondientes a todas las universidades, departamentos y centros de investigación, así como el trabajo anteriormente citado (AET, 2008), el estudio del sector TIG en Cataluña del año 2007 (AESIG, 2007), el directorio de la AET (2000) de personas vinculadas a la CTIG y, finalmente, la consulta de los congresos más importantes realizados en España.

El cuestionario

El cuestionario de investigación constaba de seis apartados, con 35 preguntas en total, abarcando los datos del grupo de investigación o de la empresa, la participación en proyectos competitivos y no competitivos, las publicaciones y el desarrollo de *hardware* y *software*. Por otro lado, la encuesta de docencia, con 27 preguntas en total, constaba de tres apartados, uno dedicado a los estudios superiores especializados en CTIG, el segundo a estudios superiores de licenciatura o doctorado y el tercero a cursos específicos.

Con el objetivo de facilitar la participación de los encuestados, se ofrecieron dos vías de respuesta, una a través de un archivo PDF editable y otra a través de una página web. La metodología empleada para su respuesta consistió en la elaboración y envío de diversas cartas de presentación y de recordatorio a los investigadores principales de los centros así como a los coordinadores de docencia. El número total encuestas enviadas fue de 93 en el caso de investigación y de 76 en el caso de docencia.

RESULTADOS

El número total de encuestas de investigación recibidas fue de 50 (el 53% del total), de las cuales el 60% correspondieron a centros de investigación y el 40% restante a empresas. En relación a la docencia, las 41 recibidas (el 54% del total) abarcaron 9 estudios de postgrado (el 100% del total de Cataluña), 62 asignaturas de estudios superiores (el 61% del total) y 30 cursos de especialización (el 83% del total). Así pues, se considera muy alto el nivel de participación dada la consabida dificultad de obtener respuestas en encuestas relativamente largas como la planteada.

En investigación

Las principales líneas de investigación en CTIG en Cataluña son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el desarrollo de datos geoespaciales con un 41% del total de respuestas. Si se suman las respuestas correspondientes a producción cartográfica y a teledetección, el porcentaje incrementa hasta el 73%. En relación a la composición de los 704 investigadores y trabajadores incluidos en la encuesta, los resultados muestran que el 45% procedían de licenciaturas en ciencias de la Tierra y el 38% en ingenierías superiores y afines. Del número total también se extrajo que el 26% eran doctores y el 17% doctorandos, destacando que sólo cuatro empresas poseían algún doctor.

El número total de proyectos en los que habían participado los encuestados fue de 878, de los cuales el 38% eran competitivos y el resto no. La estimación del presupuesto total de todos ellos fue de 76 428 500 euros en todo el período, con una media por proyecto de 94 639 euros. El 34% del total del presupuesto tuvo como origen una entidad estatal española mientras que el 30% lo fue de una entidad regional catalana. En relación al presupuesto medio según la entidad convocante, apareció que la financiación europea presentaba el valor medio más elevado, 184 000 euros, seguido de la internacional y de la española. También cabe destacar que el 50% de los proyectos tenían como ámbito de estudio Cataluña y el 12% el resto de España y, finalmente, que el 29% de las entidades participantes en el conjunto de proyectos (sobre un total de 1 253 entidades) pertenecían a Cataluña y el 23% a Europa.

Por lo que respecta a las publicaciones, del 2004 al 2009, se publicaron 719 artículos indexados según SCI o SSCI para las revistas internacionales, 95 artículos indexados según CARHUS o IN-RECS para las revistas españolas y 647 en revistas no indexadas. Aparte del número de publicaciones, a través del apartado en el que se pedía detallar las diez publicaciones más relevantes, se hicieron constar 108 artículos SCI o SSCI, de los cuales el 58% correspondían al primer cuartil (publicados en 30 revistas diferentes, destacando *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *Journal of Geophysical Research* o *Remote Sensing of Environment*) y el 22% al segundo cuartil.

En relación al número total de libros, se publicaron 113 como autores directos y se actuó de editor en otros 15, mientras que los capítulos de libros fueron 280 y las aportaciones a congresos 1393 en internacionales y 882 en no internacionales. Finalmente, se dirigieron 157 tesis doctorales y se organizaron 43 congresos internacionales y 40 no internacionales.

En el apartado de desarrollo propio de *hardware* y *software*, los resultados muestran que sólo cuatro entidades desarrollaron *hardware* propio y dos entidades patentes. Sin embargo, el desarrollo de *software* fue intenso ya que 7 entidades hicieron constar su comercialización (con 1 658 unidades vendidas), 13 el desarrollo de programas de uso interno, 5 de distribución libre (con 105 150 unidades distribuidas) y 3 de código abierto (con 1 143 unidades). Otro apartado interesante fue el relacionado con el lenguaje de programación ya que 24 entidades se consideraron expertas en alguno. En concreto los lenguajes más usados fueron Java (en 16 casos o el 36% de los cuatro lenguajes más usados), C y C++ (en 14 casos o el 32%), Visual Basic (en 10 casos o el 23%) y Fortran (con 4 o el 9%). En relación a entornos de programación de alto nivel, los resultados mostraron que Matlab era usado en el 13% de los casos, Visual Basic Application (VBA) en el 11%, IDL y VBA Autocad ambos en el 10%, mientras que el 46% restante se agrupó en el apartado de "otros". Por lo que respecta a los entornos de programación para Internet, los más usados fueron el PHP, en el 23% de los casos, seguido de JavaScript y de ASP, ambos con el 18%, mientras que el 20% de los casos se incluyeron en el apartado de "otros".

Como era previsible, dada la gran diversidad de entidades que se incluyeron en el estudio, en el apartado de *frameworks* y/o librerías la opción más contestada fue "otros" (en el 67% de los casos). Sólo es posible destacar moderadamente el uso de Openlayers en el 17% de los casos. En relación a las bases de datos espaciales usadas, el 29% contestó Oracle y el 19% MySQL, mientras que en relación a la producción y publicación de datos geoespaciales, 13 entidades citaron algún producto de uso externo y 6 productos comercializados, estimándose un número total de 200 unidades. En el apartado de recursos materiales destacados la mayoría de entidades citaron material informático, mientras que 9 mencionaron los relacionados con herramientas GPS y radiómetros de campo, 5 citaron antenas de recepción de imágenes NOAA y 3 de Meteosat y METOP. Finalmente, comentar que en el período analizado sólo se creó una spin-off.

En docencia

Entre los cursos 2006-2009, el número estimado de alumnos que realizaron algún postgrado especializado en CTIG o asignaturas de estudios superiores o algún curso especializado fue de 6457, de los cuales el 74% eran catalanes, el 14% del resto de España y el 12% restante de otros países. Los postgrados tuvieron 408 alumnos, las asignaturas 4 788 y los cursos 1 261.

En relación a los másters y postgrados especializados en CTIG, se analizaron 6 másters propios, de los cuales uno era no presencial, y 3 diplomas de postgrado, de los cuales uno era no presencial. Del número total de alumnos, 408, se estimó que el 45.3% eran catalanes, el 31.6% del resto de España y el 23% de otros países. La figura 1 muestra la evolución estimada en el período analizado.

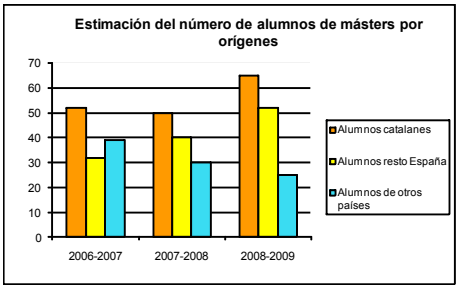


Figura 1: Evolución en la estimación del número de alumnos de másters según origen.

En relación a los contenidos, en la mayoría de ellos se impartía mayoritariamente SIG (en uno de ellos hasta el 80%) mientras que en uno se impartía claramente más teledetección que en el resto. Según los créditos ECTS, los contenidos prácticos en SIG y los teóricos en SIG equivalían al 55% del total, seguido del 12% de contenidos teóricos en cartografía. Finalmente, en todos los másters se usó el programa ArcGis, en 5 de ellos MicroStation y en cuatro MiraMon y gvSIG.

En las asignaturas de estudios superiores, un total de 20 departamentos diferentes se implicaron en 62 asignaturas. El 69% correspondieron a 19 licenciaturas de diferentes universidades y el 39% a 16 másters y doctorados. El 42% del total de asignaturas se impartieron en departamentos

de geografía. Otro aspecto a resaltar es que la mayoría de las asignaturas se impartieron en el segundo o tercer año de licenciatura, siendo el 37% optativas, el 3% de libre elección y el 60% restante obligatorias o troncales. El 76% de los alumnos eran catalanes, el 12% del resto de España y el 12% restante de otros países. La tendencia ha sido de un leve incremento en el caso de los primeros, mientras que de mantenimiento en el resto. En relación a los contenidos, el 52% de las asignaturas el contenido era igual o superior al 50% en SIG seguido del 45% con un contenido entre el 10 y el 50% en cartografía mientras que en teledetección llegaba al 34%. El 23% del número de créditos ECTS correspondieron a créditos prácticos en SIG y el 19% en teóricos. Los programas más usados correspondieron a ArcGis, con el 30%, MiraMon, con el 23%, e Idrisi con el 14%.

El número total de cursos especializados analizados fue de 30, con un número de alumnos estimado de 1 261, de los cuales el 79% fueron catalanes, el 14% del resto de España y el 7% de otros países. La tendencia en los años analizados ha sido de aumento. Finalmente, el 77% de los contenidos de los cursos era de SIG y el 20% de cartografía, mientras que el 39% de los créditos ECTS correspondían a contenidos prácticos en SIG y el 20% a teóricos. Finalmente, el 27% de los cursos usaron ArcGis y el 18% MiraMon.

CONCLUSIONES

Los resultados en investigación destacan la presencia de grupos potentes en SIG y teledetección con una gran diversidad de especializaciones que publican en las principales revistas internacionales, la elevada distribución de datos geoespaciales comercializados y de uso externo, y la producción de *software*, mayoritariamente de distribución gratuita, programado en Java y C/C++. Sin embargo, el estudio muestra el reducido peso del *hardware* y la difícil interrelación entre la formación universitaria especializada y las empresas privadas encuestadas: éstas emplearon un número muy reducido de doctores y durante el periodo analizado sólo se creó una spin-off.

En relación a los resultados en docencia, se ha estimado que 6 457 alumnos han estado implicados en formación CTIG, con una tendencia, desde el curso 2006-2007, al incremento. Los másters especializados en CTIG eran todos ellos propios, con un uso predominante del *software* internacional conjuntamente con MiraMon y gvSIG y con una preponderancia de los contenidos en SIG. En el caso de los estudios superiores, el 42% de las asignaturas se impartieron en departamentos de geografía, siendo las licenciaturas implicadas muy diversas, destacando por su número la Universidad de Barcelona. Las asignaturas se impartieron mayoritariamente en el segundo y tercer curso, con una elevada obligatoriedad en contenidos SIG a través de ArcGis y MiraMon. En el caso de los cursos especializados destacan algunos cursos con una larga tradición, con más de 15 años de antigüedad, con el 82% de alumnos catalanes, con predominio de contenidos en SIG y de los programas ArcGis y MiraMon. Finalmente, comentar que el estudio permite otras lecturas más detalladas pero imposibles de detallar aquí por motivos de espacio.

BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (AESIG), 2007. *Estudi del sector TIG a Catalunya 2007*. http://www.actig.cat/aesigcat/enquesta/AESIG2006v08.pdf [En catalán].

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN (AET), 2000. *¿Quién es quién en Teledetección, Cartografía y SIG?* Disponible en: http://telenet.uva.es/qeq/qeq.php

AET, 2008. *Estado de la docencia en Teledetección en España*. Disponible en: http://www.aet.org.es/?q=encuesta-docencia-gral1

BOSQUE, J., 1999. *La ciencia de la información geográfica y la geografía*. VII Encuentro de Geógrafos de América Latina. CD-ROM, San Juan de Puerto Rico, 22-26 de marzo, 15 p.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todas las instituciones que, con sus respuestas, han hecho posible este trabajo, así como al ICC por confiarnos su realización. Xavier Pons es beneficiario de un ICREA Acadèmia Excellence in Research grant (2011-2015).

Algoritmo de morfología matemática multicanal adaptado a imágenes multiespectrales

W. Torres

Instituto de Ingeniería. Centro de Procesamiento Digital de Imágenes. Urb. Monte Elena II, Sartenejas, Baruta. Caracas. Venezuela. Correo electrónico: wuiliantor@gmail.com

RESUMEN

La morfología matemática (MM) es una herramienta que encuentra su mayor utilidad en el análisis de imágenes donde las formas, la orientación y la topología de los objetos presentes en la escena constituyen el elemento de interés. Los axiomas que definen los operadores morfológicos se basan en el ordenamiento de los datos, operación sencilla cuando los píxeles están representados por un escalar. En las imágenes multicanal, como las imágenes multiespectrales, cada píxel es representado por un vector y su ordenamiento deja de ser una tarea evidente. En este trabajo, se presenta un algoritmo que propone un esquema para el ordenamiento de píxeles vectoriales, y su aplicación en la construcción de los operadores morfológicos para imágenes multiespectrales. Se presentan resultados que muestran el uso de algunos de los operadores en una imagen SPOT de una región de alta producción agrícola en el estado Portuguesa, Venezuela, donde la forma y distribución de las parcelas es determinante para la estimación de la producción.

Palabras clave: morfología matemática, ordenamiento, imagen multiespectral, teledetección.

ABSTRACT

The Mathematical morphology (MM) is a tool that finds its major usefulness in the image analysis where the objects shape, orientation and topology are the elements of interest in the scene. The axioms that defines morphological operators are based on data ordering; a simple operation when the pixels are represented by a scalar. In multichannel images, such as the multispectral images, where each pixel is represented by a vector, vector-pixels ordering is not longer an obvious task . This paper presents an algorithm that proposes a scheme for ordering vectors, making it possible to construct morphological operators for multispectral images. Some results are presented, showing the application of the morphologic operators upon SPOT images in a region of high agricultural production in Venezuela, where the analysis of shape and the distribution of agricultural plots is necessary for productivity estimation.

Keywords: *mathematical morphology, vector order, multispectral image, remote sensing.*

INTRODUCCIÓN

La tecnología actual permite adquirir imágenes digitales bajo diferentes modalidades o condiciones para el estudio de determinados fenómenos físicos, es el caso de la teledetección con las imágenes multi e hiperespectrales. En general, el análisis de estas imágenes se orienta a la identificación de elementos presentes en la imagen que se caracterizan por su firma espectral, su forma o su relación con elementos vecinos. Como ejemplo de ello, se tiene la identificación de parcelas agrícolas para estimar la producción de las cosechas. La Morfología Matemática (MM), introducida en 1964 por G. Matheron y J. Serra, es una herramienta del procesamiento de imágenes que permite el análisis de las imágenes donde el parámetro de interés es la forma y topología de los objetos. Los desarrollos que permitieron establecer los fundamentos matemáticos de esta tecnología fueron inicialmente orientados a imágenes binarias o imágenes en niveles digitales de un solo canal [SERRA, J.; SOILLE P.]. La MM se apoya en la teoría de conjuntos y en la de los retículos. Un retículo completo es un conjunto dotado de una relación de orden y posee un mínimum y un máximum. Para el análisis de cada píxel de la imagen y su entorno, la MM utiliza una estructura geométrica de referencia denominada elemento estructurante (EE); a medida que el EE recorre la imagen, los píxeles cubiertos por él se ordenan siguiendo un criterio específico. En los operadores morfológicos básicos, el pixel central toma el valor del mínimo en el caso de la erosión, o el máximo en la dilatación. Cuando se trata de imágenes monocanal, el criterio utilizado para el ordena-

miento de los píxeles viene dado simplemente por el nivel digital. En las imágenes compuestas por varios canales o bandas, cada píxel se representa por un vector cuya dimensión está definida por el número de canales presentes en la imagen. En este caso, la MM se enfrenta al problema de establecer un criterio para el ordenamiento de los píxeles-vector, pues no existe una solución única para ello. Diversos autores han propuesto diferentes esquemas de ordenamiento: marginal, condicionado o lexicográfico, reducido, parcial, pareto, mezcla de bits [APTOULA, E., LEFEVRE, S.; KÖPPEN, M., et al.; CHANUSSOT, J., LAMBERT, P.]. En este trabajo, se presenta un esquema de ordenamiento que, en forma progresiva, separa los pixeles-vector en grupos equidistantes al origen siguiendo una métrica particular, finalizando con un ordenamiento lexicográfico. Este esquema de ordenamiento sirve de fundamento para establecer los dos operadores básicos de la morfología matemática multicanal, la erosión y la dilatación; a partir de ellos se construye toda la librería de operadores morfológicos.

ORDENAMIENTO VECTORIAL

Sea $\mathbf{P}$ un conjunto de M vectores p_i, provenientes de los píxeles de una imagen con N canales, incluidos en una región delimitada por un EE B:

$$\mathbf{P} = \{p_1, \quad p_2, \quad ..... \quad p_M,\} \ ;$$
$$\text{donde } p_i = \left[p_{i,1}, \quad p_{i,2}, \quad ..... \quad p_{i,N} \right]$$

El ordenamiento del conjunto $\mathbf{P}$ se hace por comparación de pares de vectores de acuerdo con la siguiente estrategia (Ecuación 1):

Sean dos vectores r y q de $\mathbf{P} \in Z^N$;
y sus componentes r_i , $q_i \in Z, 1 \le i \le N$,
$r = [r_1, \quad r_2, \quad .... \quad r_N]$; $q = [q_1, \quad q_2, \quad .... \quad q_N]$

Y sean los vectores r' y q' los obtenidos al ordenar en forma decreciente los r_i y q_i.

$$r' = [r'_1, \quad r'_2, \quad ..... \quad r'_N] \ ; \text{con } r'_j \ge r'_{j+1} \quad 1 \le j \le N\text{-}1$$
$$q' = [q'_1, \quad q'_2, \quad .... \quad q'_N] \ ; \text{con } q'_j \ge q'_{j+1} \quad 1 \le j \le N\text{-}1$$

$$r > q \text{ si } \begin{cases} 1) \quad \bar{r} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} r_j > \bar{q} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} q_j \\ 2) \quad \bar{r} = \bar{q} \text{ y } r'_1 > q'_1 \\ 3) \quad \bar{r} = \bar{q} \ ; \ r'_1 = q'_1 \text{ y } r'_2 > q'_2 \qquad (1) \\ ..... \\ N) \quad \bar{r} = \bar{q} \ ; \ r'_j = q'_j \ 1 \le j \le N\text{-}2 \text{ y } r'_{N-1} > q'_{N-1} \\ N{+}1) \quad \bar{r} = \bar{q} \ ; \ r'_j = q'_j \ 1 \le j \le N\text{-}1 \\ \qquad \rightarrow \text{Orden lexicografico de } r \text{ y } q \end{cases}$$

La primera condición permite hacer un pre-ordenamiento de los vectores de $\mathbf{P}$ agrupando los que poseen el mismo promedio. La Figura 1a muestra el pre-ordenamiento obtenido para el caso de dimensión 3; allí se representan tres grupos de vectores que cumplen la primera condición. Los pixeles incluidos en el grupo en rojo anteceden a los representados en azul y éstos a los coloreados en verde.

Para ordenar los vectores incluidos dentro de un mismo grupo, se utiliza la segunda condición. Se comparan los componentes máximos de r y q generando subgrupos que se ordenan en forma de capas concéntricas partiendo desde el centro de los datos. Como resultado, los vectores menores se localizan alrededor del centro del volumen de datos y los mayores se distribuyen hacia la periferia. La Figura 1b ilustra, en el caso 3D, el orden que se asigna a un grupo de pixeles-vector con igual promedio, la comparación del primer elemento de r' y q' forma nuevos grupos concéntricos que parten desde la diagonal principal del cubo hacia la periferia, los vectores localizados en el centro, representados en azul, son inferiores a los vectores de la periferia en color violeta.

Las condiciones 2 a N indicadas en la Ecuación 1 comparan de manera consecutiva los elementos de r' con los de q' hasta conseguir desigualdad. La Figura 1c muestra el orden asignado a uno de los subgrupos mostrados en la Figura 1b; en ella, los vectores se ordenan partiendo desde el centro de los datos hacia los vértices, los vectores en azul son inferiores a los pixeles en violeta.

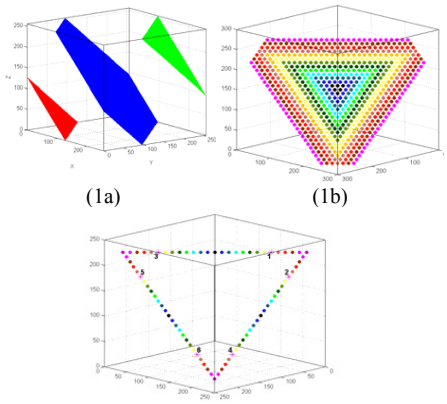
Finalmente, para tener un ordenamiento total, los vectores que mantienen la igualdad se ordenan siguiendo el orden lexicográfico asignando una prioridad predefinida a los canales. En la Figura 1c se indica mediante números el orden asignado a seis de los vectores.

OPERADORES MORFOLÓGICOS

Los operadores morfológicos fundamentales son la erosión y la dilatación. La erosión ($\varepsilon_B(f)(\mathbf{x})$), descrita por la Ecuación 2 asigna, en la posición correspondiente al centro del EE B, el ínfimo (□) de los píxeles-vector cubiertos por el EE, mientras que la dilatación ($\delta_B(f)(\mathbf{x})$) en la Ecuación 3, asigna el supremo (□).

$$\varepsilon_B(f)(\mathbf{x}) = \bigwedge_{b \in B} f(\mathbf{x}+b) \quad (2)$$

$$\delta_B(f)(\mathbf{x}) = \bigvee_{b \in B} f(\mathbf{x}+b) \quad (3)$$



(1a) (1b)

(1c)

Figura 1: Ordenamiento de los vectores 3D*:* **a)** Grupos formados por la primera condición; **b)** Sub-grupos formados por la segunda condición; **c)** Orden asignado con la tercera condición y en números el orden lexicográfico.

A partir de los operadores fundamentales se definen otros operadores importantes como el gradiente (dilatación menos erosión); la apertura (erosión seguida de dilatación) y el cierre (dilatación seguida de erosión), y de esa misma forma se establece toda la familia de operadores morfológicos para las imágenes multicanal. Se destaca, por su utilidad en el proceso de segmentación de imágenes, la expresión del gradiente multiescala en la Ecuación 4 [NALLAPERUMAL, K. et al.]. En ella, MG es un vector con N componentes; para obtener una expresión escalar del gradiente, en cada píxel se determina el valor máximo de los componentes de MG, previa normalización entre 0 y 1 (Ecuación 5).

$$MG(f) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\varepsilon_{B_{k-1}}\left(\delta_{B_k}(f) - \varepsilon_{B_k}(f)\right)\right] \quad (4)$$

$$Grad(f) = \bigvee_{i=1}^{N}(MG_i) \quad (5)$$

APLICACIONES

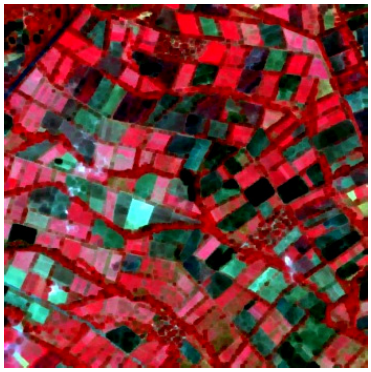
El algoritmo propuesto se utilizó en una imagen multiespectral adquirida por el satélite SPOT 5 en el estado Portuguesa, Venezuela, es una región caracterizada por su alta vocación agrícola. La MM permite segmentar la imagen y cuantificar las superficies cultivadas por diferentes rubros agrícolas, información que se complementa con datos de campo para la estimación de la producción.

La figura 2a presenta una subimagen en falso color infrarrojo. Para ilustrar el efecto introducido por los operadores morfológicos básicos se presenta en la figura 2.b la erosión con un EE cuadrado de 5x5, allí se destacan los pixeles-vector con módulo más pequeño presentándose con colores oscuros. En La figura 2.c presenta la dilatación, que resalta en colores brillantes los pixeles-vector con mayor módulo.

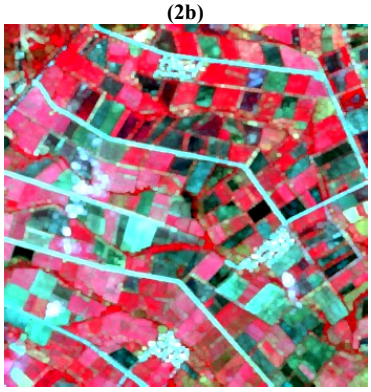
La imagen es filtrada utilizando filtros morfológicos multicanal para reducir el ruido y evitar introducir firmas espectrales inexistentes que impedirían el reconocimiento de los rubros agrícolas. Para segmentar la imagen y delimitar las parcelas agrícolas, se determina el gradiente multiescala que se muestra en la figura 3a; este filtro realza los bordes más importantes reducir la sobresegmentación típica que introduce el operador "watershed". La Figura 3b superpone a la imagen original, la segmentación obtenida por el operador morfológico de divisorias de agua o "watershed" [Torres, W. y Salcedo, R.].



(2a)



(2b)



(2c)

Figura 2: a) Imagen SPOT; b) Erosión vectorial; c) Dilatación vectorial



(3a)



(3b)

Figura 3: a) Gradiente morfológico multiescala; b) Segmentación utilizando el algoritmo de divisoria de aguas o "watershed"

CONCLUSIONES

El algoritmo propuesto tiene como principal ventaja su adaptación a imágenes multicanal de cualquier dimensión. Adicionalmente, la simetría del algoritmo para el ordenamiento de los vectores, reduce el sesgo que muestran otros métodos descritos en la literatura. Los operadores morfológicos generan imágenes que solo contienen pixeles-vector presentes en la imagen original. Aún se deben estudiar y minimizar los inevitables efectos de distorsión topológica derivados del ordenamiento que, en algunas ocasiones, asigna un orden consecutivo a píxeles distantes, y viceversa.

BIBLIOGRAFÍA

APTOULA, E., LEFEVRE, S., 2007. *A comparative study on multivariate mathematical morphology*. Pattern Recognition 40, 2914-2929

CHANUSSOT, J., LAMBERT, P., 1997. *Entrelacement de Bits et "Space Filling Curves": une Extension des Filtres de Rang aux Images Couleur*. GRETSI, Grenoble

KÖPPEN, M., NOWACK, CH., RÖSEL, G., 2000. *Pareto-Morphology for Color Image Processing: A Comparative Study of Multivariate Morphologies*. Pattern Recognition and Image Analysis, 10 (4), pp. 478–491

NALLAPERUMAL, K., KRISHNAVENI, K., VARGHESE, J., SAUDIA, S., ANNAM, S., KUMAR, P., 2007. *A novel Multi-scale Morphological Watershed Segmentation Algorithm*. International journal of imaging science and engineering, 1 (2), 60-64

SERRA, J., 1982. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, London.

SOILLE P., 2004. *Morphological Image Analysis,* Springer-Berlag Berlin

TORRES, W., SALCEDO, R., 2010. *Object oriented image segmentation by means of multichannel mathematical morphology*. Proc. SPIE 7830, 783009.

Proyecto EnerBioAlgae (SUDOE): Utilización de técnicas espectrales de fluorescencia en el control de cultivos de microalgas para biomasa

Jesus M. Torres Palenzuela, Evangelos Spyrakos, Manuel Piñeiro Martínez y José Luis Legido Soto

Dep. de Física Aplicada. Fac. de Ciencias del Mar. Universidad de Vigo. Lagoas Marcosende 36310, (Vigo, España). Correo electronico: jesu@uvigo.es

RESUMEN

El desarrollo de las energías renovables surge de la necesidad de contar con fuentes alternativas de energía que puedan contribuir a satisfacer la creciente demanda de la sociedad. Las microalgas pueden proveer varios tipos de productos como el metano producido por la digestión anaeróbica de la biomasa de algas, biodiesel derivado de aceites de microalgas y biohidrógeno En este trabajo se exponen los objetivos del proyecto EnerBioAlgae (SUDOE) liderado por la Universidad de Vigo y en colaboración con la Universidad de Almería, Universidad de Aveiro (Portugal), INEGA (Instituto de Energía de Galicia), Universidad de Pau (Francia) cuyo objetivo es investigar en la producción de biodiesel mediante cultivos de microalgas en varios tipos de aguas degradadas.

Palabras clave: fotobiorreactor, biodiesel, Fluorescencia, Clasificador neuronal.

ABSTRACT

There is a significant interest in alternative renewable energy sources due to the global increase of energy demands and the daily decrease of fossil fuel resources. Microalgae can provide a range of products such as methane and biodiesel. In this work we present the objectives of the project EnerBioAlgae (SUDOE), led by the University of Vigo, Spain in collaboration with Universidad de Almería, Universidad de Aveiro (Portugal), INEGA (Instituto de Energía de Galicia), Universidad de Pau (France) which aims to investigate the biofuel production by microalgae grown in several types of wastewater.

Keywords: photobioreactor, biodiesel, Fluorescence, Neural Classifier.

INTRODUCCIÓN

Las microalgas pueden proveer varios tipos de productos como el metano producido por la digestión anaeróbica de la biomasa de algas (Spolaore et al., 2006), biodiesel derivado de aceites de microalgas (Roessler et al., 1994) y bio-hidrógeno (Kapdan and Kargi, 2006).

Las técnicas de producción de biodiesel son conocidas desde hace más de 50 años (Meher et al., 2006) y la utilización de microalgas para este biodiesel se remonta a la década de los 80, pero es ahora con la crisis energética, económica y ecológica cuando globalmente se está considerando como una seria opción a los combustibles fósiles.

Briggs (2004) indica que desde 1978 hasta 1996, el Departamento de Energía de USA, bajo el National Renewable Energy Laboratorio (NREL), conocido como "Aquatic Species Program", desarrolló diversas investigaciones para identificar las microalgas con alto contenido de aceites, que puedan ser cultivadas con la finalidad de producir biodiesel. Los resultados de este programa establecieron que algunas especies de microalgas son ideales para la producción de biodiesel, debido a su alto contenido de aceite (más de 50%) y su rápido crecimiento; no obstante, primero se deben resolver algunos problemas referidos principalmente a los costes de producción.

Hasta la fecha el programa desarrollado por NREL ha sido el más ambicioso en la producción de biodiesel a partir de microalgas. No obstante, en la actualidad existen muchos países tratando de mejorar las técnicas de cultivo de las microalgas, con la finalidad de hacerlos más sencillos y rentables.

De acuerdo al portal www.oilgae.com, la producción de aceite en las microalgas es mayor

que en las tradicionales semillas oleaginosas. En este sentido, estimaciones realizadas por la empresa Bio Fuel System (BFS) indican que soya, colza y palmera aceitera producen 50 m3 km-2 año-1, 100 a 140 m3 km-2 año-1, y 610 m3 km-2 año-1, respectivamente; mientras que las microalgas pueden producir de 10 000 a 20 000 m3 km-2 año-1.

EnerBioAlgae se presenta como una iniciativa estructurante que abarca una temática estratégica para el desarrollo integral del Sudoe y cuya finalidad última es lograr un rendimiento energético a través de intervenciones de recuperación medioambiental en espacios hídricos degradados ricos en microalgas. Alcanzar este objetivo comporta investigar el potencial energético de las microalgas y desarrollar y validar novedosas estrategias que mejoren la eficiencia de los cultivos energéticos encaminados a la obtención de energía de forma productiva, vía biomasa o por conversión en biocombustible.

La utilización de técnicas de signatura de fluorescencia espectral (SFS) para control del crecimiento de los cultivo y el análisis de la calidad de las aguas en el mismo, supone un avance en las técnicas analíticas *on line* aplicadas en este tipo de reactores.

Las redes neuronales artificiales (ANN) son algoritmos implementados en forma de programa informático o modelo electrónico, inspirados en métodos estadísticos. Las ANN son métodos no paramétricos, en el sentido de que no requieren una arquitectura predefinida, por tanto las redes neuronales construyen su propio modelo a base de entrenamiento, modificación y aprendizaje. La utilización de redes neuronales es un uso cada vez mayor en la clasificación de parámetros ópticos a partir de datos de radiómetros, permitiendo modelizar operativamente algoritmos complejos difícilmente implementables de otro modo.

Actualmente los algoritmos encaminados al estudio de este tipo de aguas utilizando teledetección (Doerffer et al., 2007; Kratzer et al., 2008) están basados en este tipo de redes neuronales (Luis González et al., 2011), entrenados y validados con datos *in situ* (Evangelos Spyrakos et al., 2011).

OBJETIVOS DEL PROYECTO

En el plan de trabajo del proyecto EnerBioAlgae están representados cada una de las etapas del proceso de generación de energía: desde la localización de los recursos hídricos susceptibles de intervención, la identificación y caracterización de la cepa más adecuada, el desarrollo experimental del cultivo de microalgas en laboratorio, la caracterización de la biomasa y los procesos de biocombustibles. Finalmente, la demostración de la viabilidad técnica, económica y ambiental a través de una experiencia piloto situada en dos espacios del territorio Sudoe con gran potencial de explotación. Todo el proceso se ve potenciado por el desarrollo de las tecnologías precisas y en su puesta en funcionamiento.

Este ambicioso propósito reportará resultados significativos en la optimización del rendimiento del proceso de producción de biocombustible al mismo tiempo que permitirá iniciar procesos de recuperación ambiental. Se trata, en definitiva, de desarrollar procesos de conversión energética más eficientes y limpios para dar respuesta a las demandas tecnológicas y medioambientales presentes y futuras, demostrando su viabilidad técnica y económica. El cultivo de microalgas y su conversión en biocombustibles es una factible solución al incierto futuro energético.

EnerBioAlgae es una propuesta que integra la protección y conservación del medio ambiente, la lucha contra el cambio climático, la diversificación de las fuentes de abastecimiento energético, el desarrollo y la explotación de energías alternativas, y la protección de la biodiversidad.

METOLOLOGÍA

Se están utilizando fotobiorreactores en la Universidad de Vigo, Universidad de Aveiro y en la Universidad de Almería con distinto tipo de aguas y cepas de crecimiento (ver figura 1).

La técnica de SFS (Spectral Florescent Signature) aplicada en este proyecto para el análisis de los cultivos, utiliza un barrido de longitudes de onda en dos modos, uno en el espectro de UV y otro en el visible, recogiendo la señal en el espectro entre 200 y 750 nm. De esta forma se obtiene una imagen de fluorescencia como las observadas en la figura 2.

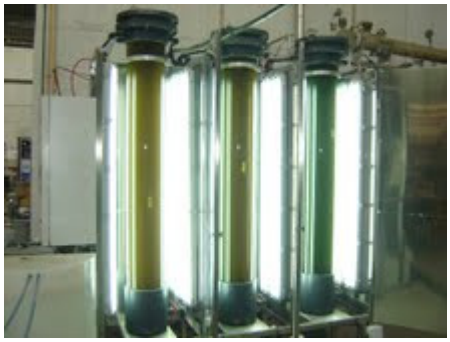


Figura 1: Fotobiorreactor tubular con varias cepas en crecimiento en distintos tipos de aguas.

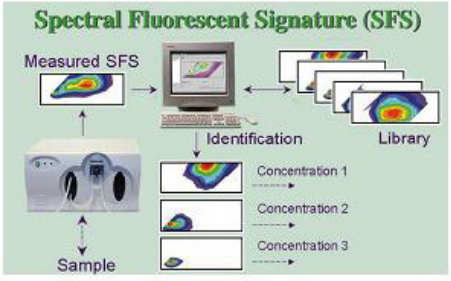


Figura 2: Esquema de funcionamiento del sistema de detección basado en técnicas (SFS).

Para este propósito se está trabajando con un Instant-Screener de LDI (Laser Diagnostic instruments) que nos permite medir diferentes tipos de aceites, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), compuestos fenólicos y todo tipo de compuestos aromáticos (Babichenko et al., 2003).

Dado a que los diferentes tipos de petróleo tienen diferentes firmas espectrales de fluorescencia, es posible caracterizarlos elaborando las librerías de clasificación. El modo de excitación visible nos permite obtener información de pigmentos y materiales orgánicos para estudios de cultivos (Van Der Wagt et al., 1999) (Ver figura 3).

La aplicación de algoritmos de clasificación neuronal nos permite conocer tanto el estado de crecimiento del cultivo, como la calidad del agua en que éste se desarrolla.

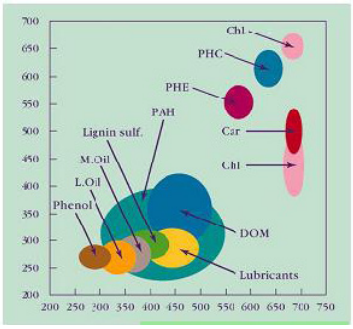


Figura 3: Gráfica con los principales máximos de fluorescencia correspondientes a distintas sustancias como hidrocarburos, materia orgánica y pigmentos.

CONCLUSIONES

El crecimiento de la demanda energética, la excesiva dependencia energética exterior y la necesidad de preservar el medio ambiente y asegurar un desarrollo sostenible, obligan a apostar por nuevas fórmulas que emplean fuentes de energía renovable y menos contaminante en su uso. De ahí surgen los retos energéticos que asume el espacio SUDOE, de desarrollar fuentes de energía limpia, en entornos favorables y con recursos propios.

El empleo de microalgas como fuente de energía vía biomasa para usos energéticos o por conversión en biocombustibles presenta excelentes perspectivas de futuro, con ventajas competitivas. Sin embargo, aunque el número de experiencias y proyectos es cada vez mayor, los avances en la investigación son lentos e impera la necesidad de profundizar en el trabajo científico orientado al desarrollo de tecnología más eficiente y a su puesta en funcionamiento. Obtener la máxima rentabilidad de la producción energética a escala industrial, requiere más inversión en la investigación aplicada a diversos campos tecnológicos y apoyada por experiencias piloto con carácter demostrativo.

EnerBioAlgae responde a estas necesidades al tiempo que contribuye a la mejora medioambiental mediante la integración de la utilización de aguas contaminadas y la captación de CO2.

La utilización de nuevas técnicas de análisis en continuo como la presentada en este trabajo con el sistema SFS unido a algoritmos de

clasificación neuronal nos permite avanzar en las técnicas de instrumentación y análisis en este campo.

BIBLIOGRAFÍA

SPOLAORE P., JOANNIS-CASSAN C., DURAN E. AND ISAMBERT A. 2006. *Commercial applications of microalgae*. Journal of Biosciences and Bioengineering 101 (2): 86-96.

ROESSLER PG, BROWN LM, DUNAHAY TG, HEACOX DA, JARVIS EE, SCHNEIDER JC, ET AL. *Genetic-engineering approaches for enhanced production of biodiesel fuel from microalgae*. ACS Symp Ser 1994, 566:255–70.

KAPDAN IK, KARGI F. 2006. *Bio-hydrogen production from waste materials*. Enzyme Microb Technol 2006, 38:569–82.

MEHER LC, VIDYA SAGAR D, NAIK SN. 2006. *Technical aspects of biodiesel production by transesterification— a review*. Renew Sustain Energy Rev 2006, 10:248–68.

KRATZER S., BROCKMANN C., MOORE G., 2008. *Using MERIS full resolution data(300 m spatial resolution) to monitor coastal waters – A case study from Himmerfj¨arden, a fjord-like bay in the north-western Baltic Sea*. Remote Sens.Environ., 112 (5), 2284–2300.

BRIGGS, M., 2004. *Wide scale Biodiesel Production from Algae*. UHN Bio Diesel group.

R. DOERFFER; H. SCHILLER. 2007. *The MERIS Case 2 water algorithm.* International Journal of Remote Sensing, Volume 28, Issue 3 & 4, 2007, Pages 517 – 535.

LUIS GONZÁLEZ VILAS, EVANGELOS SPYRAKOS, JESUS M. TORRES PALENZUELA 2011. *Neural network estimation of chlorophyll a from MERIS full resolution data for the coastal waters of Galician rias (NW Spain)*. Remote Sensing of Environment, 115, 524–535.

EVANGELOS SPYRAKOS; LUIS GONZÁLEZ VILAS; JESUS M TORRES PALENZUELA; ERIC DESMOND BARTON *Remote sensing chlorophyll a of optically complex waters (rias Baixas, NW Spain):Application of a regionally specific chlorophyll a algorithm for MERIS full resolution data during anupwelling cycle*. Aceptado en la Remote Sensing of Environment.

S. BABICHENKO, L. PORYVKINA AND F. DE VOS. 2003 *Oil-in-water monitoring using spectral fluorescent signatures – theory and field applications*. Oil-in-Water Monitoring Workshop.

VAN DER WAGT, R., DE VOS, F., BABICHENKO, S., PORYVKINA, L. 1999. *On-line analysis of water contamination by organic compounds*. Powerplant Chemistry, 1, p.20.

OCEANOGRAFÍA Y RECURSOS MARINOS

Validación de los productos altimétricos en aguas costeras del Golfo de Cádiz

I. Caballero[1] , J. Gomez-Enri[2] y G. Navarro[1]

[1] Departamento de Ecología y Gestión Costera. Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Avda. Republica Saharaui, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España). Correo electrónico: gabriel.navarro@icman.csic.es

[2] Departamento de Física Aplicada. Universidad de Cádiz. Avda. Republica Saharaui, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España).

RESUMEN

En este trabajo se presenta el ejercicio de validación de los productos altura de ola significante, velocidad del viento y anomalía del nivel del mar del satélite ENVISAT con observaciones in-situ en la región costera del Golfo de Cádiz. La adición de términos correctivos mejorados en el procesamiento se evalúa en el área de la desembocadura del Guadalquivir. Los datos altimétricos (Hz) cubren un periodo de más de siete años (2002-2009), con criterios de comparación espaciales y temporales definidos por 50 km y 10 min. Las mediciones del satélite muestran concordancia con las estimaciones de campo para escalas de tiempo estacionales y climáticas. Los resultados altimétricos son precisos y de alta calidad hasta 20 km de la costa, ofreciendo una fuente útil de información para gran variedad de estudios oceanográficos en estos complejos y relevantes entornos.

Palabras clave: altimetría costera, validación, estuario del Guadalquivir.

ABSTRACT

The validation of significant wave height, wind speed and sea level anomaly products from ENVISAT against in-situ observations in the coastal domain of Golf of Cadiz is presented in this manuscript. The addition of improved corrective terms in the processing strategy is evaluated in the Guadalquivir estuary area. Satellite data (1 Hz) cover a period of more than seven years (2002-2009), and collocation criteria of comparison was defined as 50 km and 10 min. The altimeter retrieved measurements show good agreement with the coincident sea truth estimates for seasonal and climatic time scales. Satellite altimetry is precise and of acceptable quality at 20 km from coast, providing an immensely valuable source of information for oceanographic studies in this crucial and complex environments.

Keywords: *coastal altimetry, validation, Guadalquivir estuary.*

INTRODUCCIÓN

El Golfo de Cádiz es una cuenca oceánica situada en el suroeste de la Península Ibérica, que conecta el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar. La plataforma continental del Golfo de Cádiz es amplia (~50 km) y recibe importantes aportes fluviales asociados a la descarga de grandes ríos como el Guadiana y el Guadalquivir. El estuario del Guadalquivir es un entorno muy especial con una dinámica compleja y con una relevante importancia social, económica y ecológica (Navarro et al., 2011). Se caracteriza por un régimen mesomareal, con un gradiente de salinidad longitudinal. Recientemente ha sido objeto de un intenso desarrollo de la agricultura, pesca y turismo.

Desde varias décadas, los datos obtenidos mediante satélites altimétricos se han utilizado de forma muy fructífera para estudiar la dinámica marina a escala global (Caires & Sterl, 2003; Durrant et al., 2009). La calidad de estos datos era muy superior en aguas oceánicas con respecto a las costeras, donde surgían ciertos problemas para determinar la señal del altímetro relacionados con la contaminación por tierra o por las inexactas correcciones atmosféricas y oceánicas. En la actualidad, y debido a la enorme importancia socio-económica-estratégica de los dominios costeros, se están implementando mejoras en los algoritmos para poder utilizar dichos productos en estas regiones, sobre todo en aquellos lugares donde la variación del nivel del mar, en el contexto de cambio climático, puede afectar de forma negativa, y más aun si permiten establecer tendencias a largo plazo.

En este estudio presentamos los resultados de un ejercicio de validación de los datos altimétricos con datos in-situ medidos durante 7 años en la zona de la plataforma del Golfo de Cádiz (Figura 1). El principal objetivo se centra en demostrar que los nuevos productos funcionan en áreas costeras con similar precisión a la altimetría estándar en océano abierto.

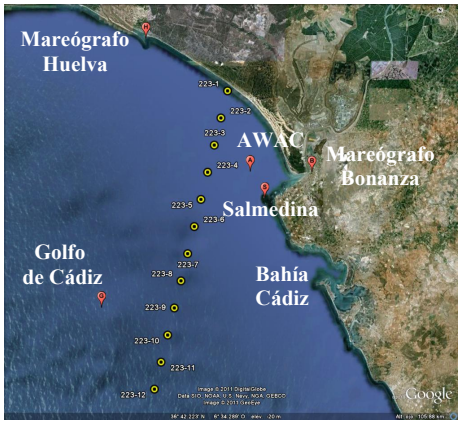


Figura 1: Situación de la desembocadura del Guadalquivir mostrando la traza descendente 223 (ENVISAT RA-2), los mareógrafos de Huelva (H) y Bonanza (B), el correntímetro AWAC (A), y las boyas de Salmedina (S) y Golfo de Cádiz (G).

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos altimétricos

Los datos utilizados en este trabajo proceden del radar altimétrico de doble frecuencia RA-2 (Dual Frequency Radar Altimeter) a bordo del satélite europeo ENVISAT, los cuales han sido distribuidos por la ESA (Agencia Espacial Europea) con las actualizaciones disponibles más recientes. La información que se analizó corresponde al periodo que abarca los ciclos 11 al 84, extendiéndose por más de 7 años (2002-2009). Los parámetros geofísicos que se estudian son la altura significante de ola (SWH, Significant Wave Height), la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del mar (U10) y la anomalía del nivel del mar (SLA, Sea Level Anomaly). La traza seleccionada corresponde al paso descendente de la traza 223, que atraviesa la zona de estudio de la plataforma continental del Golfo de Cádiz (frente a la desembocadura del río Guadalquivir), con ciclos repetitivos de 35 días y frecuencias de 1 Hz. Para el trabajo que se presenta, se han aplicado una serie de filtros de calidad incluyendo "land flag", valor máximo, valores nulos o defectuosos y "Nval" (SWH y s0) >18. Asimismo, referente a la información del nivel del mar, se aplicaron una serie de correcciones geofísicas de los efectos ambientales (oceánicas y atmosféricas) para ajustar las mediciones y eliminar señales corruptas. Las correcciones empleadas fueron: troposférica seca; MOG2D (modelo atmosférico dinámico); troposférica húmeda radiométrica (MWR y modelada); doble frecuencia ionosférica, filtro de 300 Km de la banda Ku (RA-2, modelada y DORIS); Bias del estado de mar no paramétrico y marea oceánica GOT00 (altura total geocéntrica, solución 1 y 2). Todos los datos indicando anomalías fueron eliminados, permitiendo así un aumento en la confianza estadística.

Medidas in-situ

Las observaciones del satélite se compararon con datos de varias estaciones costeras situadas en el Golfo de Cádiz para determinar la calidad de la información altimétrica. Dichos instrumentos pertenecen a las redes del ICMAN-CSIC (Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía-Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y del OPPE (Organismo Público de Puertos del Estado). La estación meteorológica de Salmedina (S) y el fondeo del correntímetro AWAC-AST (A) pertenecen a la red del ICMAN (distancia a costa de 3 y 10 km, respectivamente) y han estado en continuo funcionamiento durante los últimos años, midiendo U10 y SWH. Asimismo, datos de viento y oleaje fueron recogidos de la boya Rayo del Golfo de Cádiz (G), perteneciente a OPPE y situada a 55 km de la costa. La información del nivel del mar se obtiene de los registros de mareógrafos de Huelva (H) y Bonanza (B), situados en el Puerto de Huelva y en el Puerto Pesquero-Deportivo de Bonanza, respectivamente. Durante el proceso de validación se han llevado a cabo rigurosos controles de calidad de los datos de campo mediante la edición y/o el filtrado. Asimismo, en la serie temporal de altura de ola significante se descartaron todas las observaciones donde 0.15 m< SWH >15 m. La ubicación de las estaciones (Figura 1), variables medidas, cobertura temporal y otras características se muestran en la Tabla 1. El criterio de selección para encontrar el ajuste

Estación	Coordenadas (Lat/Lon)	Periodo	Variables	Red	Frecuencia (min)
Huelva	37°7'59.28"N / 6°50'11.24"W	1996-2009	Nivel del mar	OPPE	5
Bonanza	36°48'7.90"N / 6°20'17.34"W	1992-2010	Nivel del mar	OPPE	5
Golfo de Cádiz	36°28'37.20"N / 6°57'46.80"W	1997-2010	Viento, SWH	OPPE	60
Salmedina	36°44'16.26"N / 6°28'39.18"W	1983-2010	Viento	ICMAN-CSIC	10
AWAC	36°48'6.48"N / 6°30'56.16"W	2008 -2009	SWH	ICMAN-CSIC	60

Tabla 1: Características de las series de datos in-situ.

entre las dos fuentes de datos se estableció mediante una separación temporal de 10 minutos y una ventana espacial de 50 km. Las observaciones que se desvían de los intervalos de confianza del 95% se identifican como valores atípicos y son eliminados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La regresión de SWH de la boya más expuesta (G) ofrece una correlación muy alta (R=0.97; n=797; RMS=0.17 m; Bias=0.006 m). Referente a la situada en el estuario (A), el mejor ajuste lineal corresponde al punto de mínima distancia al emplazamiento in-situ y a 11 km de la costa (R=0.78; n=161; RMS=0.36m; Bias=0.28m). En la Figura 2 se presentan los resultados estadísticos a lo largo de la traza para cada punto altimétrico con respecto a la distancia a costa (la flecha indica la situación de la estación). Se observa la baja correlación y contaminación por tierra de los dos puntos más próximos a costa.

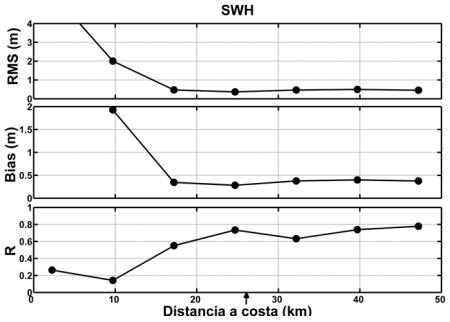


Figura 2: Resultados de RMS, Bias y R de los puntos de la traza para SWH (m) con respecto a la costa. La flecha muestra la ubicación del correntímetro (A).

La validación de la velocidad del viento referente a la boya G muestra una correlación muy alta (R=0.90; n=777; RMS=0.07m/s; Bias=0.79m/s). En cuanto a Salmedina (S), se obtiene su mejor ajuste en el punto de traza más próximo a la estación (R=0.67; n=711; RMS=1.53m/s; Bias=0.02 m/s), mientras que el más cercano a costa se encuentra marcado por la contaminación costera (Figura 3).

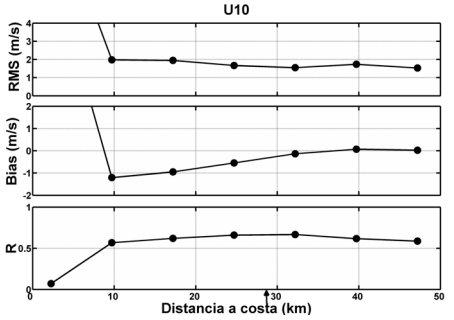


Figura 3: Resultados de RMS, Bias y R de los puntos de la traza para U10 (m/s) con respecto a la costa. La flecha muestra la ubicación de la estación (S).

La Figura 4 presenta la correlación de los datos altimétricos frente a las mediciones del nivel del mar de los mareógrafos con respecto a la distancia a costa. Los mejores ajustes se caracterizan por valores de R de 0.70 y 0.80, para H y B, respectivamente, con excepción de los dos puntos de la traza situados próximos a costa, indicando el deterioro de la señal a medida que se acerca a tierra. Las correcciones asociadas a los mejores ajustes fueron la ionosférica MODIS, troposférica húmeda modelada y solución 2 de altura de marea

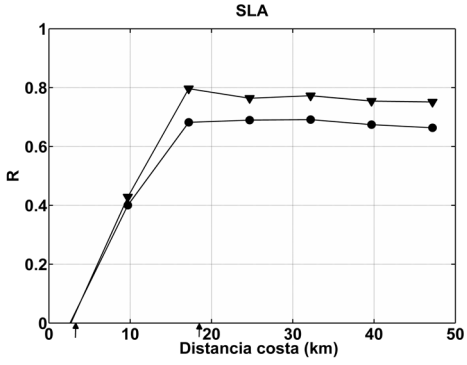


Figura 4: Resultados de la correlación de SLA para el mareógrafo de Huelva (círculos); y Bonanza (triángulos). Las flechas indican la localización de la mínima distancia al emplazamiento de los mareógrafos con respecto a la traza 223 (izquierda, Huelva; derecha, Bonanza).

CONCLUSIONES

Los estadísticos obtenidos con el procesador actual indican consistencia en las variables nivel del mar, viento y oleaje, con correlaciones máximas alrededor de los 20 km a costa. Asimismo, se cumple que los mejores ajustes corresponden a las mínimas distancias entre satélite e in-situ, exponiendo la relevancia de la "ventana espacial" en validaciones de sensores. Este trabajo muestra la precisión de los datos altimétricos mucho más cercanos a costa que la estima lograda habitualmente, confirmando y ampliando la información de estudios anteriores (Vignudelli et al., 2005; Bouffard, 2008). La dispersión que aparece en los datos puede ser debida a la variabilidad espacial en el clima marítimo, con claros efectos locales en una zona tan dinámicamente compleja como el estuario de Guadalquivir, o atribuida a fenómenos atmosféricos a diferentes escalas. Estos resultados ponen de manifiesto que con simples mejoras en el procesamiento, la señal recuperada permite deducir conclusiones oceanográficas en escalas de tiempo estacionales y climatológicas. Asimismo, se pueden aplicar en una gran variedad de propósitos tales como el seguimiento de los procesos costeros y su modelado, la predicción del clima, las condiciones de la superficie del océano, la circulación y la topografía, transporte de sedimentos y erosión, con implicaciones en los proyectos de ingeniería, diseño de la defensa y protección costera y rutas de navegación. No hay que olvidar la importante repercusión de las corrientes costeras sobre la producción primaria y pesquera en la plataforma atlántico andaluza. Además, la determinación de la serie temporal del nivel nos podrá dar pistas de si existe variación del nivel del mar en conexión con los procesos de cambio global. A pesar de la calidad de los datos cercanos a tierra, este método no proporciona aun datos geofísicos optimizados en la propia costa debido a que las señales radiométricas aun se encuentran contaminadas por la reflexión, por lo que se necesita un estudio más detallado. Los futuros trabajos se dirigen hacia el perfeccionamiento de la nueva generación de productos cumpliendo con los requisitos necesarios mediante el uso los datos a mayor resolución.

BIBLIOGRAFÍA

BOUFFARD, J., VIGNUDELLI, P., CIPOLLINI, P. and MENARD, Y., 2008. *Exploiting the potential of an improved multimission altimetric data set over the coastal ocean*. Geophysical Research Letters, 35, L10601, doi:10.1029/2008GL033488.

CAIRES, S. and STERL, A., 2003. *Validation of ocean wind and wave data using triple collocation*. Journal of Geophysical Research, 108, (C3), 3098, doi:10.1029/2002JC001491.

DURRANT, T.H., GREENSLADE, D. and SIMMONDS, I., 2009. *Validation of Jason-1 and Envisat Remotely Sensed Wave Heights*. Journal of Atmospheric Oceanic Technology, 26, 123-134.

NAVARRO, G., GUTIERREZ, F.J., DÍEZ-MINGUITO, M., LOSADA, M.A. and RUIZ, J., 2011. *Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: a challenge for real-time telemetry*. Ocean Dynamic, doi:10.1007/s10236-011-0379-6.

VIGNUDELLI, S., CIPOLLINI, P., ROBLOU, L., LYARD, F., GASPARINI, G.P., MANZELLA, G. and ASTRALDI, M., 2005. *Improved satellite altimetry in coastal systems: Case study of the Corsica Channel (Mediterranean Sea)*. Geophysical Research Letters, 32, L07608, doi:10.1029 /2005GL022602.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a ESA por la disponibilidad de los datos de ENVISAT, así como a Puertos del Estado por los datos in-situ. Este estudio ha sido financiado por el proyecto de excelencia de la Junta de Andalucía P09-RNM-4853.

Caracterización y delimitación de praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* mediante imágenes procedentes de sensores hiperespectrales (Parque Natural de Gata-Níjar, Almería)

A. Cabello[1], J. E. Frieyro[1], L. Granado[1], A. Hayas[1], E. Méndez[1], G. Montoya[1], I. Pino[1] y J. A. Domínguez[2]

[1] EGMASA. Dpto de Comunicación y Sistemas de Información y Unidad de I+D+i. Johan G. Gutenberg, 1. 41092, Sevilla. jfrieyro@egmasa.es

[2] Consultor externo. C/ Bolivar, 17 F 3º D 28045, Madrid.

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar y delimitar las fanerógamas presentes en el litoral andaluz, se inicia una línea de investigación basada en técnicas con imágenes procedentes de sensores hiperespectrales, aprovechando el minucioso registro del espectro electromagnético que proporcionan éstos. Las imágenes adquiridas proceden del sensor CHRIS a bordo del satélite Proba y del sensor aerotransportado CASI.

Se caracterizan espectralmente las especies de fanerógamas, *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, presentes en el Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, efectuándose una exhaustiva radiometría de campo. Asimismo, se toman medidas para la caracterización de la columna de agua, basada en el cálculo del coeficiente de atenuación difusa (Kd).

La obtención de una imagen del fondo marino requiere de la corrección del efecto de atenuación de la luz con la profundidad. Se aplican diversos métodos, unos basados en la caracterización de la energía a su paso por la columna de agua y otros fundamentados en relaciones empíricas entre datos de campo/imágenes.

En la fase final se procede a la elaboración de la cartografía del fondo marino, partiendo de los procedimientos de clasificación supervisada alimentados por los índices y band-ratios calculados en la fase de análisis de las imágenes.

Palabras clave: hiperespectral, teledetección, fanerógamas marinas, reflectancia del fondo, cartografía, árbol de decisión.

ABSTRACT

In order to characterize and delimitate seagrass bed in the Andalusian coast, a research project using hyperespectral images techniques has been carried out, taking advantage of the electromagnetic spectrum information collected by these sensors in a detailed way. The acquired images are from the CHRIS sensor onboard in the satellite PROBA and the CASI airborne sensor.

The study area is Cabo de Gata-Níjar Natural Park (Province of Almería) where different seagrasses species such as Posidonia oceanica and Cymodocea nodosa are spectrally characterized through field radiometry. Furthermore, the water column has been characterized through measurements determining the diffuse attenuation coefficient (Kd).

To obtain bottom reflectance images, it is necessary to correct the depth light attenuation effect. Different procedures are applied, some of them have been based in the energy characterization through the water column and the others supported by empirical relationships among field data and images.

During the final work phase the seabed mapping is developed following the supervised classification processes using indexes and band-ratios which have been calculated in the imagery analysis phase.

Keywords: *hyperspectral, remote sensing, seagrass, bottom reflectance, mapping, decision tree.*

INTRODUCCIÓN

Se pretende analizar la respuesta de cubiertas vegetales sumergidas cuya extensión sólo ocasionalmente supera la isobata de los 35 m, desarrollando una propuesta metodológica válida y factible, así como los protocolos de trabajo en campo para controlar y verificar el registro de las imágenes adquiridas y apoyar su procesamiento.

Se seleccionan las praderas de fanerógamas marinas debido al interés ambiental que presentan como protectoras de la biodiversidad litoral y su valor como indicador ambiental de calidad de las aguas, reconocido como tal en la Directiva Marco del Agua del año 2000.

OBJETIVOS

El objetivo principal es la caracterización y delimitación de las praderas de fanerógamas marinas en el ámbito del Parque Natural de Cabo de Gata–Níjar mediante la discriminación de diferentes especies dentro de la pradera, teniendo en cuenta los parámetros físico-químicos que condicionan la calidad del agua y repercuten en la creación de hábitats potenciales para dichas especies. Se persigue la elaboración de una cartografía específica para la ayuda a la gestión y el control de este hábitat.

Como objetivo complementario está la generación de una metodología aplicable a aguas marinas poco profundas basada en sensores hiperespectrales y la validación de estos sensores como herramientas de análisis para la gestión ambiental.

SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se ha escogido el Parque Natural Marítimo Terrestre de Cabo de Gata-Níjar. En su lecho marino se encuentran las praderas más occidentales del Mediterráneo de *Posidonia oceanica*. El área de estudio seleccionada se localiza en el término municipal de Níjar (Almería) en el sector costero orientado en dirección SW-NE entre las localidades de Las Negras y Agua Amarga.

MATERIAL Y MÉTODO

Adquisición de imágenes

Se han adquirido imágenes del sensor CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer), a bordo del satélite PROBA de la ESA, e imágenes aerotransportadas del sensor CASI (Compact Airborne Spectral Imager), propiedad del Instituto Cartográfico de Cataluña.

En el caso del sensor CHRIS se ha utilizado el modo de adquisición 2, con una resolución espacial de 17 m y una resolución espectral de 18 bandas localizadas en el rango 405-1.035 nm del espectro electromagnético, muy apropiado para estudios en medios acuáticos.

El sensor CASI 550 es un sensor óptico hiperespectral de barrido (tipo pushbroom) que recoge la información en el rango electromagnético 450-950 nm. Se realizaron dos vuelos a diferentes alturas: un vuelo bajo, en modo espacial, para la obtención de imágenes de 2mx2m de píxel y 25 bandas, cuyo centro y ancho de bandas han sido configurados para este estudio; y un vuelo más alto, en modo espectral, para capturar imágenes de 4mx4m de resolución y 72 bandas homogéneamente distribuidas.

Campañas de radiometría

Durante las campañas 2007-2009, se realizaron medidas para la caracterización de la columna de agua (reflectancia fuera del agua y perfil de radiación luminosa ascendente y descendente de la columna de agua), la caracterización espectral de precisión de muestras, extraídas mediante dragado y realizadas con un laboratorio portátil mediante luz controlada, así como medidas auxiliares de contenido de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera. Los datos obtenidos de las campañas se han utilizado en los procesos de corrección y clasificación de las imágenes y validación de resultados.

Tratamiento y análisis de los datos de campo

Con las medidas de irradiancia descendente del sol (Ed), radiancia de la superficie del agua (Ls) y radiancia del cielo (Lc) se ha calculado la reflectancia de la superficie del mar a partir de la fórmula de Mueller (Mueller et al., 2000).

A continuación, se ha realizado el tratamiento de las firmas obtenidas dentro de la columna de agua para obtener los coeficientes de atenuación difusa de la luz y determinar las propiedades ópticas inherentes al agua. A partir de las irradiancias descendentes (Ed) y ascendentes (Eu) se han determinado los coeficientes de atenuación difusa descendente y ascendente, respectivamente (Jerlov, 1976).

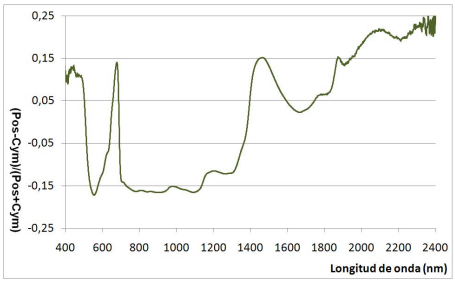


Figura 1: Índice normalizado de fanerógamas.

Por último, se han procesado las medidas de reflectancia, transmitancia y absorbancia de algunas muestras medidas con luz controlada obteniendo la caracterización espectral de las dos especies de fanerógamas presentes en la zona, en distintos estados fenológicos. Se ha realizado un cociente normalizado entre los espectros obtenidos de ambas especies (Figura 1) para determinar las diferencias espectrales entre ellas.

Tratamiento de imágenes para la obtención de imágenes de fondo

Se han realizado las correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas. Para la corrección atmosférica de la imagen CHRIS se ha utilizado un algoritmo diseñado para obtener de la propia imagen los parámetros atmosféricos necesarios para su corrección (Guanter et al., 2006). La corrección atmosférica de las CASI se ha realizado en dos pasos: primero se aplicó el código de transferencia radiativa 6S (Vermote et al., 1997); después, las imágenes se ajustaron mediante el método de línea empírica.

Después, se ha procedido a la identificación de las masas de agua y la generación de máscaras de tierra, utilizando una banda del infrarrojo cercano y la batimetría existente de la zona.

Las imágenes de agua obtenidas han sufrido un proceso de reducción de ruido mediante una transformación lineal MNF. Por último, las imágenes que lo han requerido han sido corregidas del efecto de "sun glint" (Kutser et al., 2009), que desvirtúa la respuesta espectral.

Para calcular la reflectancia del fondo ha sido necesario controlar la claridad del agua, el tipo de fondo y la batimetría. Una primera aproximación se basó en métodos de caracterización del comportamiento de la energía a su paso por la columna de agua (Maritorena et al., 1994), aplicando a las imágenes ecuaciones de dos flujos (upwelling y downweling) para obtener una solución de transferencia radiativa. El resultado concluyó con la sobreestimación de la reflectancia del fondo en un 20-26%. Por ello se optó por la aplicación de un método derivado de la Ley de Beers, que utiliza dos coeficientes de atenuación diferentes. El resultado mejoró, pero mantenía una acusada influencia de la profundidad por encima de los 10 m.

Al final, la aplicación de métodos de corrección fundamentados en las relaciones empíricas entre datos de campo/imagen ha dado lugar a imágenes de fondo sin aparente influencia de las variaciones en la profundidad y que permitieron, además, discriminar distintos aspectos de las fanerógamas.

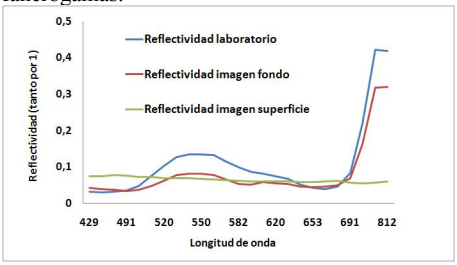


Figura2: Comparativa entre las firmas espectrales de un punto de posidonia.

Análisis de las imágenes. Clasificación

Se han calculado índices normalizados y cocientes entre bandas, con el propósito de acentuar alguna propiedad característica de la vegetación y realzar las diferencias espectrales entre ellas. Para ello, se ha realizado un estudio minucioso de las firmas espectrales de las dos especies presentes en la zona para encontrar sus máximos y mínimos, y así escoger adecuadamente en el cálculo las bandas a utilizar para cada imagen (Tabla 1). El resultado obtenido se ha utilizado en la clasificación de las imágenes.

En una primera fase se ha realizado una clasificación no supervisada ISODATA, con el objeto de discriminar el fondo sin vegetación de las zonas con vegetación en áreas de poca profundidad. Seguidamente se ha trabajado con dos métodos de clasificación supervisada. Utilizando la información obtenida con ISODATA y los datos verdad-terreno, se han establecido las zonas de entrenamiento representativas de las distintas clases, necesarias para la aplicación del clasificador SAM (Spectral Angle Mapper). De estas zonas se han extraído las firmas espectrales patrón que SAM utiliza para compararlos con los espectros de las imágenes. Se utilizaron sólo las longitudes de onda en las que se habían encontrado diferencias significativas entre los distintos tipos de fondo.

Otro método se ha basado en árboles de decisión (Breiman et al., 1984). El clasificador, a modo de árbol invertido, ha requerido del análisis

profundo de las respuestas espectrales de las clases y del conjunto de datos disponibles para determinar las condiciones a aplicar a cada píxel en cada nodo del árbol; la respuesta positiva o negativa ha dado lugar a otra condición, continuando así hasta la obtención de la clase a la que pertenece el píxel. Para la elaboración de estas condiciones se han ido definiendo umbrales del índice o band ratio adecuado a la clase que se ha querido extraer. Tras un proceso de post clasificación, se ha evaluado el resultado con la construcción de matrices de confusión, enfrentando las clasificaciones con datos verdad-terreno, concluyendo que la exactitud de las clasificaciones globales está por encima del 75%, presentando un coeficiente Kappa por encima del 0,65.

	IND IR-R	IND IR-R	IND IR-R	IND IR-R	IND IR-R	B_RAT
CASI 2X2 M			605-491	550-491		429/491
						491/502
						491/512
CASI 4X4 M		758-553	606-493	553-493	584-606	493/509
		758-576	629-493			493/516
		758-584	682-441			584/553
						584/606
CHRIS	755-680					490/510

Tabla 1: Índices y cociente entre bandas más significativos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

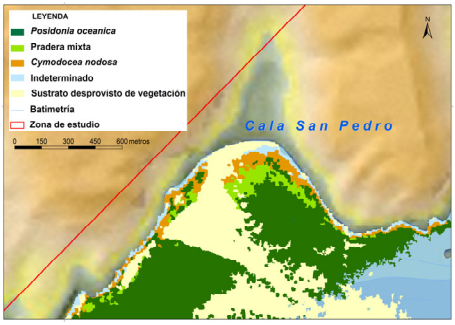


Figura 3: Cartografía derivada de la imagen CASI de resolución 4mx4m.

Se ha obtenido una cartografía de los hábitats bentónicos del área de estudio, generando mapas (Figura 3) que muestran de forma ininterrumpida, la distribución y caracterización de las fanerógamas. Se han discriminado diferentes tipos de coberturas y fondos, no sólo lo referido a las fanerógamas sino también a los fondos donde se asientan. La correcta eliminación de la columna de agua es fundamental para obtener resultados fiables.

En cuanto a resolución espectral, la diferente configuración del sensor CASI en sus modos espacial y espectral no ha supuesto una diferenciación espectral en las firmas, debido principalmente a que en el vuelo bajo las bandas se localizaron de forma expresa para recoger los picos de interés de las fanerógamas. En este sentido, el modo 2 de CHRIS-Proba lo ha convertido en un sensor también útil para estudios en agua, cubriendo prácticamente de forma continua la región visible del espectro.

En lo referido a resolución espacial, si bien un menor tamaño de píxel ha supuesto una menor presencia de mezclas en los píxeles, éstos se han visto afectados en mayor medida por otros factores (viento, oleaje y relación señal/ruido). Respecto a las imágenes CHRIS, su resolución espacial ha resultado suficiente para la delimitación de las praderas de fanerógamas marinas a una escala inferior pero adecuada para el seguimiento a nivel global de las praderas.

BIBLIOGRAFÍA

BREIMAN, L., Friedman J.H., Oldshen R.A., and Stone C.J., 1984. *Classification and Regression Trees*. Belmont, California, Wadsworth International Group, 358 pags. ISBN: 0-412-04841-8.

GUANTER, L. et al., 2006. *Coupled Approach for Spectral/Radiometric Calibration and Surface Reflectance Retrieval from CHRIS/PROBA Data*. 4th ESA CHRIS/PROBA Workshop. ESA/ESRIN.

JERLOV, N.G., 1976. *Marine Optics*. Amsterdam, Elsevier, 231 pags.

KUTSER, T. et al., 2009. *A sun glint correction method for hyperspectral imagery containing areas with non-negligible water leaving NIR signal*. Remote Sensing of Environment, 113, 2267-2274.

MARITORENA, S., MOREL, A. y GENTILI, B., 1994. *Diffuse Reflectance of Oceanic Shallow Waters: Influence of water depth and bottom albedo*. Limnology and Oceanography, 39 (7), 1689-1703.

MUELLER, J.L. et al., 2000. *Above–water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols. Chapter 10*. NASA/TM-2000-209966 Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, revision 2. NASA-GSFSC. Editores: Giulietta S. Fargion and James L. Mueller.

VERMOTE, E.F. et al., 1997. *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35 (3), 675-686.

AGRADECIMIENTOS

A la ESA por los datos cedidos del sensor Chris Proba.

Proyecto EUFAR AIRES-CZM: Gestión de las Zonas Costeras

E. Castillo-López[1], J.A. Dominguez[2], A. Silio-Calzada[3] y A.D. Gutierrez-Barceló[4]

[1] Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Cantabria.. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander (España).

[2] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Departamento de Medioambiente Hídrico. Pº Bajo Virgen del Puerto nº3, 28005 Madrid.

[3] Instituto de Hidráulica. Universidad de Cantabria.. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander (España).

[4] Sands, Solutions and Services, S.L. Avda. Los Castros 36-3º A. 39005, Santander, Spain.

RESUMEN

Las actividades asociadas al desarrollo costero alteran las cuencas y tienen un impacto directo sobre el medio ambiente costero. La gestión de tales ecosistemas requiere una mayor vigilancia de los sistemas de seguimiento de los cambios en la calidad y cantidad del agua a través del tiempo, de manera que los registros estarán mejor contextualizados si se realizan a partir de datos sinópticos. Por otra parte, tales impactos son comúnmente observados a nivel regional en lugar de a escala local, y trascienden los sectores y naciones.

Los sistemas de vigilancia marina siempre han sido difíciles y costosos: muchos de estos impactos a la fecha han desaparecido, simplemente no están registrados. La Directiva Marco del Agua (DMA) obliga a todos los miembros del Estado a proteger y regenerar todas las masas de agua superficiales con el fin de alcanzar el "buen estado" antes de 2015, lo que implica este concepto la evaluación tanto de la parte química como del estado ecológico de las mismas. En el caso de las aguas costeras, es por medio de la gestión integrada de las zonas costeras (GIZC) como se garantiza que este "buen estado" se puede lograr.

Entre las diferentes herramientas de supervisión que considera la GIZC, las técnicas de teledetección aparecen como una posibilidad de gran alcance. La teledetección permite supervisar una serie de indicadores del estado ecológico en una amplia gama de escalas de tiempo y el espacio puede desempeñar un papel crítico en términos de vigilancia costera y la gestión.

En la actualidad, el monitoreo de la calidad del agua a lo largo de la franja costera de Cantabria se enfrenta al problema de la falta de algoritmos propios específicos para recuperar los parámetros de calidad del agua derivada de detección a distancia de datos. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es el de desarrollar un conjunto de algoritmos locales que se puedan aplicar a imágenes de satélite actuales o futuras (es decir, Sentinel-3 y INGENIO) utilizando como base el material derivado del proyecto EUFAR AIRES-CZM. Este desarrollo exige la combinación de datos aéreos y de satélite con la información recogida en las campañas de campo.

Palabras clave: sensores aerotransportados, AISA-Eagle, LIDAR, Directiva Marco del Agua, Sentinel, Ingenio, gestión costera.

ABSTRACT

Coastal development activities alter coastal catchments and directly impact on coastal environments. Management of such ecosystems requires improved monitoring systems to track changes in water quality and quantity through time, but such records are best contextualized using synoptic data, as such impacts are now commonly observed at regional rather than local scales, and transcend sectors and nations. Monitoring marine systems has always been difficult and expensive: many of these impacts to date have simply gone unrecorded. Moreover, the Water Framework Directive (WFD) obligates to all the State Members to protect, and restore all superficial water bodies in order to achieve the "Good State" before 2015, implying this concept the evaluation of both the chemical and the ecological state. In the case of coastal waters, it is by means of Integrated Coastal Zone Management (ICZM) that this "Good State" can

be achieved. Among the different monitoring tools that ICZM considers, remote sensing techniques appear as a powerful possibility. Remote sensing capability to monitor a range of ecological state indicators at a wide range of time and space scales can play a critical role in terms of coastal monitoring and management.

At present, the monitoring of the water quality along the Cantabrian coastal fringe faces the problem of lacking its own specific algorithms to retrieve those water quality parameters derived from remotely-sensed data. Therefore, the main issue addressed here is the development of those regional algorithms. This development requires the combination of both airborne and satellite data with information collected in field campaigns. The main purpose of this work is to propose a set of local algorithms which can be applied either with present and future (i.e. SENTINEL-3 and INGENIO) satellite imagery.

Keywords: *airborne remote sensing, AISA-Eagle, LIDAR, Water Framework Directive, Sentine, Ingenio, Coastal Management.*

INTRODUCCIÓN

Las actividades de desarrollo costero alteran las cuencas costeras y tienen un impacto directo sobre el medio ambiente de estas zonas. La gestión de estos ecosistemas requiere mejorar los sistemas de vigilancia con el fin de llevar a cabo un seguimiento de los cambios en la calidad y cantidad del agua a través del tiempo. Dichos registros están mejor contextualizados si se utilizan datos sinópticos (Goetz et al., 2008), ya que tales impactos son comúnmente observado a nivel regional en lugar de escala local, y suelen tener trascendencia sobre los sectores y las naciones.

A largo plazo, disponer de conjuntos de datos morfológicos de alta resolución que permiten la investigación de la dinámica costera a escalas de tiempo que vayan desde días a meses son escasos. Tradicionalmente, los métodos de estudio *in situ* proporcionan datos excelentes pero requieren importantes compromisos logísticos y, en muchas ocasiones, carecen de la resolución espacio-temporal necesaria para resolver los procesos de interés.

Las técnicas de teledetección ofrecen, probablemente con menor resolución, la posibilidad de coste-eficiente y la recopilación de datos a largo plazo con la alta resolución en tiempo y espacio. En este contexto, el uso combinado de estas técnicas proporciona un medio para mejorar la vigilancia costera y de agua dulce y las capacidades de gestión que tienen que ser desarrolladas con el fin de cumplir con los requisitos de la DMA.

En la actualidad, el monitoreo de la calidad del agua a lo largo de la franja costera de Cantabria se enfrenta al problema de la falta de algoritmos propios específicos para recuperar los parámetros de calidad del agua derivados de la captura sinóptica de información.

Por lo tanto, el tema principal abordado en este proyecto es el desarrollo de algoritmos regionales. Este desarrollo exige la combinación de datos aéreos y de satélite con la información recogida en las campañas de campo.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este trabajo ha sido posible gracias a la concesión de un proyecto EUFAR-FP7 dentro del apartado "Transnacional Access Project" titulado USING AIRBORNE REMOTE SENSING FOR IMPROVED COASTAL ZONE MANAGEMENT (AIRES-CZM).

El instrumental solicitado para llevar a cabo esta experiencia consiste en un sensor hiperespectral aerotransportado (AISA Eagle y Hawk) así como un LIDAR (NERC-ARSF: ALTM). El avión a su vez dispone de un GPS de doble frecuencia encargado de la georreferenciación de la imagen, un sistema inercial de posicionamiento (INS) y un sensor de incidencia de la luz (ILS).

La entidad encargada de la realización del vuelo fue el instituto inglés *Natural Environment Research Council* (NERC) y la fecha de captura de la información 18 y 19 de julio de 2011.

Las regiones de interés se muestran en la Figura 1 y tal y como se puede observar constan de una zona de calibración y otra de validación, utilizada para realizar la validación de los algoritmos regionales desarrollados.

El principal parámetro a medir es la reflectancia observada en las longitudes de onda del sensor AISA Eagle (de 400 a 1000 nm, con una resolución espectral de 1,25 nm).

De manera complementaria se han realizado dos tipos de muestreos, realizados de forma simultánea a la realización del vuelo: radiométrico y biogeoquímico respectivamente.

El muestreo radiométrico *in situ* de los componentes del agua es necesario para llevar a cabo una corrección atmosférica precisa de las imágenes. Dicha tarea se llevó a cabo utilizando el espectrorradiómetro Analytical Spectral Device Full Resolution (ASD-FR) proporcionada por el Centro de Estudios y Experimentación de las Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento.

El muestreo biogeoquímico fue realizado por el grupo de emisarios submarinos de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria).

OBJETIVOS AIRES-CZM

La Directiva Marco del Agua (DMA) obliga a los estados miembros a proteger y restaurar las aguas superficiales con el fin de lograr el *buen estado* antes de 2015.

Esto implica la evaluación tanto de la componente química como del estado ecológico.

En el caso de las aguas costeras, es por medio de la gestión integrada de las zonas costeras (GIZC) que este *buen estado* se puede lograr.

Entre las diferentes herramientas de supervisión que el Ministerio considera, la detección a distancia aparece como una posibilidad de gran alcance. La capacidad de supervisar una serie de indicadores clave (concentraciones de clorofila-a, sedimentos en suspensión, materia orgánica disuelta, así como temperatura, velocidad, etc) en una amplia gama de escalas de tiempo y espacio, puede desempeñar un papel crítico en términos de supervisión y gestión de zonas costeras.

En este sentido, el estudio de la óptica del agua ha sido históricamente considerado como la mejor alternativa para la determinación de los componentes del agua. Sin embargo, la vigilancia de las aguas costeras representa una tarea difícil debido a su complejidad (Morel y Prieur, 1977, Gordon y Morel, 1983; Bukata et al, 1995).

Las características biogeoquímicos e hidrodinámicas de las zonas costeras determinan la composición de la masa de agua.

Por lo tanto, los algoritmos necesarios para la estimación de los componentes de las aguas costeras se deben ajustar a la región en estudio.

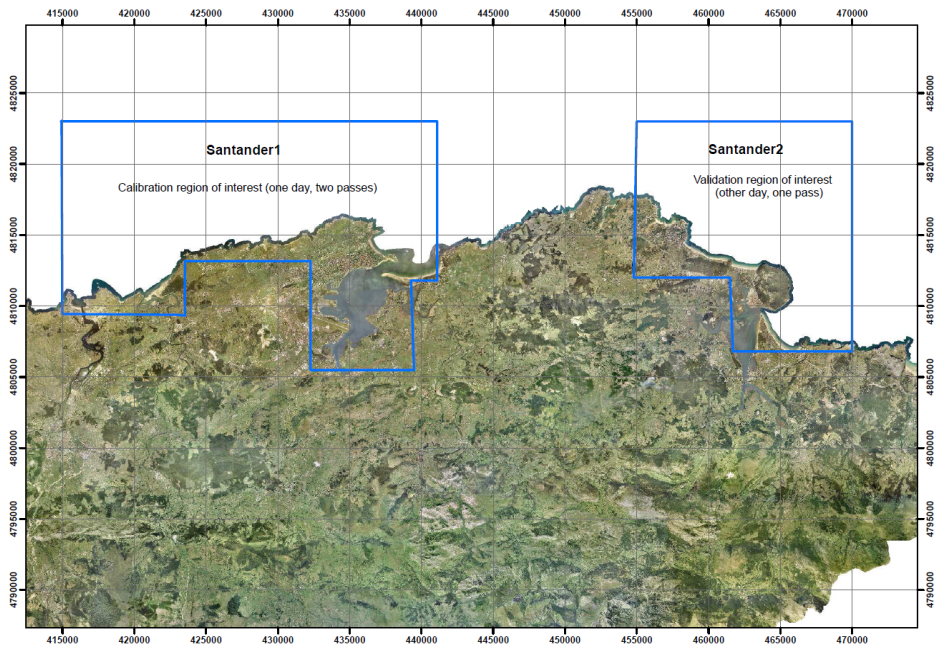


Figura 1: Detalle de la zona de calibración y validación del proyecto AIRES-CZM.

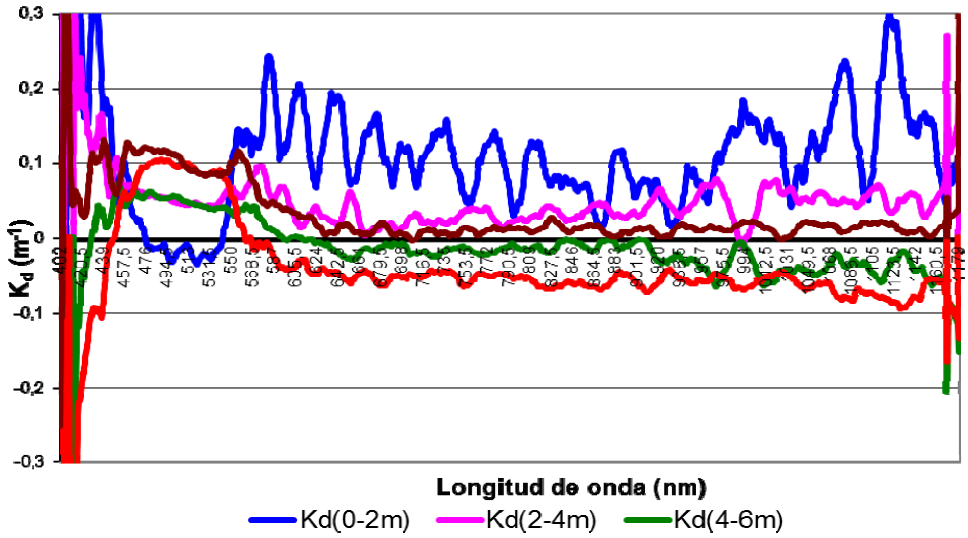


Figura 2: Coeficiente de atenuación a diferentes profundidades (zona Santander)

Los objetivos científicos de este proyecto son:

- Desarrollar una herramienta fiable para estimar los indicadores de la calidad del agua costera mediante el uso de la teledetección satelital y aerotransportada.

- Desarrollar un conjunto de algoritmos semi-empírico basado en los datos aerotransportados e in situ para estimar las concentraciones de los componentes del agua.

- Migrar los algoritmos desarrollados a partir de la información aerotransportada a la información satelital.

- Implementar un sistema de aviso automático basado en el procesado de imágenes satelitales.

- Incluir la información obtenida por medio de la teledetección en una base de datos utilizada para la calibración de los modelos hidrodinámicos regionales.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los primeros resultados obtenidos a partir de este proyecto son:

- espectros radiométricos de diferentes puntos de muestreo a lo largo de la línea de costa en los que se puede observar los distintos componentes presente en el agua;

- perfiles radiométricos en profundidad en diferentes puntos de muestreo y coeficiente de atenuación derivado (Figura 2);

- correcciones atmosféricas aplicadas a dichas imágenes;

- resultado del muestreo biogeoquímico en los puntos de muestreo anteriormente citados;

- primeros algoritmos semiempíricos asociados a la estimación de indicadores de la calidad del agua en la costa.

BIBLIOGRAFÍA

ACKER, J. et al., 2005. *Measuring Marine Suspended Sediment Concentrations from Space: History and Potential*. 8thInternational Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. Halifax, NS, Canada.

AHN, Y.H. et al., 2006. *Retrieval of ocean colour from high resolution multispectral imagery for monitoring highly dynamic ocean features*. International Journal of Remote Sensing. 27, 367-392.

GOETZ et al., 2008. *Monitoring freshwater, estuarine and near-shore benthic ecosystems with multi-sensor remote sensing: An introduction to the special issue*. Remote Sensing of Environment, Volume 112, Issue 11, 15 November 2008, Pages 3993-3995.

LEE, Z. et al, 1998. *Hyperspectral remote sensing for shallow waters. A semianalytical model*. Applied Optics, Vol. 37, No 27. See references within.

STERCKX, S. et al., 2006. *Operational Remote Sensing Mapping of Estuarine Suspended Sediment Concentrations (ORMES)*. Remote Sensing, AUV's Hydrographic Vessels.

Participación del INTA en el proyecto SEN3EXP: Teledetección aeroportada hiperespectral en áreas experimentales marinas

A. Fernández-Renau, J.A. Gómez, E. de Miguel, A. Ruiz, O. Gutiérrez de la Cámara, M. Jiménez, I. Pérez, F. Muñoz, E. Prado, C. Doñamayor y R. Rodríguez.

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Ctra. Ajalvir s/n, Torrejón de Ardoz, 28850 Madrid. Correo electrónico: fdezra@inta.es

RESUMEN

El Área de Teledetección del INTA participó en 2009 en la campaña de teledetección aeroportada del proyecto SEN3EXP de la ESA, para la simulación de imágenes de los sensores OLCI y SLSTR de la futura misión espacial Sentinel 3. Se describen los objetivos y planificación de la campaña, así como la adquisición y proceso de las imágenes hiperespectrales, obtenidas con los sistemas AHS y CASI-1500i en dos áreas experimentales marinas.

Palabras clave: teledetección aeroportada hiperespectral, AHS, CASI, Sentinel 3.

ABSTRACT

INTA's Remote Sensing Laboratory took part in 2009 in the airborne remote sensing campaign of the ESA's SEN3EXP project, whose objective was the simulation of OLCI and SLSTR images for the forthcoming Sentinel 3 mission. The campaign objective and planning are described, as well as the acquisition and processing of the hyperspectral AHS and CASI-1500i imagery, obtained at two marine experimental areas.

Keywords: *hyperspectral remote sensing, AHS, CASI, Sentinel 3.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos principales de la misión Sentinel 3 es dar continuidad a las observaciones de la actual misión Envisat-1 de la ESA (Drinkwater y Rebham, 2007). Para ello, Sentinel 3 incluye los dos instrumentos ópticos OLCI y SLSTR, herederos de MERIS y AATSR, respectivamente. Aunque comparten muchas características comunes con sus antecesores, los nuevos sensores incorporan nuevas bandas espectrales, presentan diferencias en la geometría de observación y (en el caso de SLSTR) notables diferencias tecnológicas y de diseño (Donlon *et al*., 2008).

El sensor OLCI incorpora, además de las 15 bandas espectrales de MERIS, 6 nuevas bandas (centradas en 400, 674, 764, 768, 940 y 1020 nm). Y para evitar el *sunglint*, irá instalado en la plataforma con una inclinación lateral permanente de 12º, con lo que el ángulo cenital de observación en el extremo del FOV (68º) se incrementará con respecto a MERIS, llegando a 55º. En el caso de SLSTR, se añaden dos nuevas bandas respecto a AATSR (a 1,38 y 2,25 μm) y se modifica la resolución radiométrica de las bandas de 3,74 μm y 10,95 μm para mejorar su capacidad de detección de fuegos activos, además de obtener, de forma adicional, imágenes fuera del nadir.

El proyecto *Sentinel 3 Experiment* (en adelante SEN3EXP) de la ESA, se puso en marcha en 2009 con el objetivo de generar una base de datos simulados de los sensores OLCI y SLSTR. Como los datos de Sentinel 3 no pueden ser simulados únicamente con imágenes de Envisat-1, debido a las diferencias anteriormente citadas, el proyecto SEN3EXP preveía la realización de una campaña de teledetección aeroportada con sensores hiperespectrales, que se encomendó al INTA (Fernández-Renau *et al*., 2011).

La campaña debía suministrar los datos necesarios para evaluar los algoritmos de proceso de Nivel 1 del O-GPP (*Optical Ground Processor Protoype*), así como el desempeño de OLCI en los algoritmos de obtención de radian-

cias del agua y los algoritmos Nivel 2 (L2) para la obtención de concentraciones y propiedades ópticas inherentes de constituyentes de aguas Caso 2. Para ello se escogieron dos sitios marinos que contaban con estaciones fijas de medida de datos ópticos y biogeoquímicos: el sitio de validación *Boussole*, frente a las costas de Niza (aguas Caso 1) y la estación oceanográfica *Aqua Alta Oceanographic Tower* (AAOT), en la costa de Venecia (Caso 2).

El INTA como Operador de Instrumentación Aeroportada de SEN3EXP fue el encargado de planificar y realizar los vuelos con su plataforma CASA C-212, equipada con los sensores hiperespectrales CASI-1500i (con hasta 288 bandas en el rango 365 – 1050 nm) y AHS (80 bandas en el rango de 0,46 a 13 μm).

La campaña de teledetección aeroportada se planificó de forma que se aprovechara la versatilidad de la plataforma aérea para la obtención de una base de datos de radiancias en el sensor y reflectancias, en un amplio rango de geometrías de observación. El patrón de líneas de vuelo debía permitir la observación de los sitios escogidos (relativamente homogéneos) con los elevados Ángulos Cenitales de Observación (OZA) de Sentinel 3 y el máximo número de posibles combinaciones de éstos con Ángulos Acimutales del sensor con respecto al sol (RAA) y Ángulos Cenitales Solares (SZA) diferentes.

PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA CAMPAÑA DE VUELOS

Los sitios escogidos para las campañas marinas fueron:

- *Aqua Alta Oceanographic Tower (AAOT)*: Una torre equipada con un completo conjunto de instrumentación oceanográfica y atmosférica, con toma continua de datos, que es parte de la red AERONET-OC (Aerosol Robotic Network Ocean Color), de apoyo a actividades de validación de productos de color del océano. Su situación, en el mar Adriático (45º 18' 31'' N, 12º 30' 18'' E, Figura 1), a tan sólo 8km de la costa de Venecia, en aguas de unos 16m de profundidad, hace que confluyan en ella aguas costeras (caso 2) y oceánicas (caso 1), y que esté influenciada por aerosoles continentales y marítimos, dependiendo del régimen de vientos.

- *Boussole*: Boya permanente con instrumentación para medidas ópticas y biogeoquímicas, situada frente a las costas de Niza (43º 22' 00'' N, 7º 54' 00'' E, Figura 1), en aguas Caso 1 de 2440 m de profundidad.



Figura 1: Ubicación de los sitios marinos de SEN3EXP

La planificación de la campaña de vuelos en los sitios marinos de SEN3EXP fue especialmente compleja dados los exigentes **requisitos geométricos** del proyecto. El FOV de los sensores aeroportados (90º en el caso de AHS y 40º en el caso de CASI-1500i) era insuficiente para simular los OZA de Sentinel 3 (OZA máximo de 55º) en las condiciones de vuelo típicas. La solución era inclinar la plataforma con respecto a la horizontal (incrementar el ángulo de alabeo 15º para AHS y hasta 35º para AHS), con la consecuencia añadida de producir el giro del avión, con lo que las pasadas ya no serían lineales sino circulares.

No existían antecedentes de campañas operativas con plataformas similares y esos ángulos de alabeo, especialmente críticos a las bajas velocidades de vuelo requeridas. Por ello se diseñó una campaña experimental previa (realizada el 11 de junio de 2009, en Barrax, Albacete), que determinó que por encima de 15º de inclinación lateral se comprometía seriamente la operatividad de los instrumentos (en especial AHS, con elementos móviles) y la seguridad de la misión.

Teniendo en cuenta dichos condicionantes, se planificaron dos tipos de campañas en las zonas marinas de SEN3EXP.

- Vuelos circulares: En los que la zona de la instrumentación oceanográfica era observada sucesivamente de forma lateral y con ángulos acimutales variables (Figura 2)

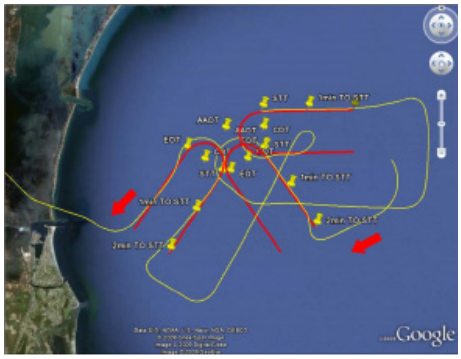


Figura 2: Patrón de vuelos circular realizado en AAOT el 26 de julio de 2009 (vuelo matinal)

- Vuelos en estrella: En los que la zona de la instrumentación oceanográfica era sobrevolada mediante sucesivos vuelos lineales con rumbos variables (Figura 3)

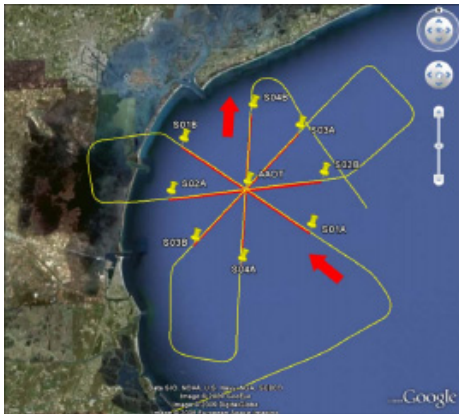


Figura 3: Patrón de vuelos en estrella realizado en AAOT el 26 de julio de 2009 (vuelo matinal)

En los vuelos circulares se alcanzó un OZA máximo de 60º en las imágenes de AHS (Figura 4) y de 35º en las de CASI-1500i (Figura 5). En los vuelos lineales se cubría un rango más limitado de OZA (máximo de 45º en AHS y 20º en CASI), pero se observaba la zona central (boya o torre) con un amplio rango de RAA.

Cada patrón de vuelo se repitió dos veces al día (9:00 y 13:00 UTC) para maximizar el rango de SZA. Adicionalmente se llevaron a cabo, en AAOT, vuelos lineales perpendiculares a la costa, para evaluar los efectos de adyacencia en la radiancia en el sensor sobre aguas costeras. Los vuelos tuvieron lugar el 26/07/09 en AAOT y el 29/07/09 en Boussole

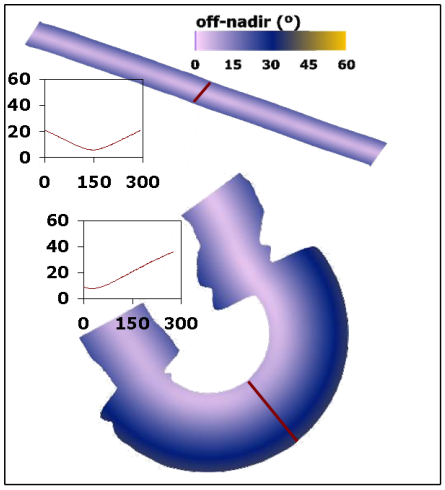


Figura 4: OZA registrados en los ficheros SCA de AHS sobre Boussole (PS1 y PR6; 29/07/09)

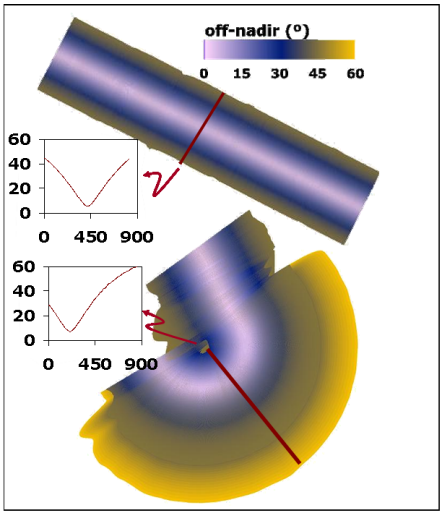


Figura 5: OZA registrados en los ficheros GLU de CASI sobre Boussole (PS1 y PR6; 29/07/09)

Los **requisitos radiométricos y espectrales** fueron los mismos que en los sitios terrestres de SEN3EXP, que ya han sido descritos previamente (Fernández-Renau *et al*., 2011).

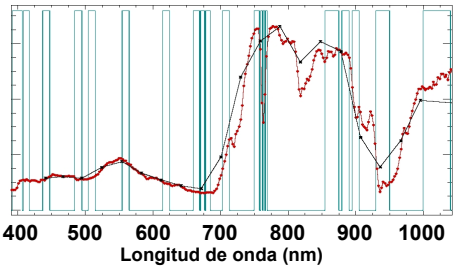


Figura 6: Radiancias en el sensor de CASI (rojo) y AHS (negro) de un píxel de agua caso 2 (AAOT) y bandas de OLCI superpuestas

ADQUISICIÓN Y PROCESO DE IMÁGENES

Todas las imágenes de CASI-1500i y AHS se adquirieron correctamente. El **proceso de imágenes** se realizó hasta el nivel comprometido en el proyecto, que incluía la distribución de imágenes de radiancias en el sensor geolocalizadas (L1b), y temperaturas de la superficie (SST), así como productos de control de calidad de la georreferenciación (L1c).

Las **correcciones radiométricas y atmosféricas** (sólo en los canales térmicos de AHS), la **georreferenciación** y el **control de calidad** de los datos entregados, fueron llevados a cabo con la metodología previamente descrita (Fernández-Renau *et al*., 2011). La información atmosférica (vapor de agua) necesaria para la obtención de la SST fue obtenida de los productos atmosféricos de MODIS.

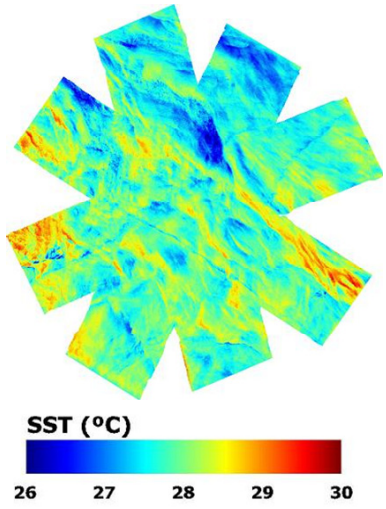


Figura 7: Mosaico de imágenes SST (Boussole)

CONCLUSIONES

La campaña aeroportada de SEN3EXP sobre zonas marinas, realizada por el INTA, es la primera de sus características en la que se obtienen imágenes hiperespectrales en trayectorias de vuelo no lineal. Su ejecución supuso un reto técnico y operativo que fue alcanzado satisfactoriamente, dentro de las limitaciones instrumentales y de la plataforma aérea.

Los sistemas hiperespectrales aeroportados del INTA cumplieron totalmente con los requisitos espectrales y radiométricos del proyecto SEN3EXP, y parcialmente con los requisitos geométricos, encaminados todos a la obtención de una base de datos de radiancias de Sentinel 3 en un amplio rango de geometrías de observación.

La cadena estándar de proceso del Área de Teledetección del INTA esta preparada para generar los productos Nivel 1 y Nivel 2, georreferenciados y corregidos atmosféricamente, que son demandados en campañas de simulación y/o validación de sensores espaciales dedicados principalmente a la observación del océano.

BIBLIOGRAFÍA

DONLON, C. BERRUTI, B. FRERICK, J. MAVROCORDATOS, C. NIEKE, J. REBHAN, H. STROEDE, J., 2008. *Sentinel 3 OLCI and SLSTR*. Medspiration/GlobColour symposium. ESA – ESRIN.

DRINKWATER, M.R. AND REBHAM, H., 2007. *Sentinel 3 Mission Requirements Document*. Issue 2 revision. EOP-SMO/1151/MD-md. European Space Agency.

FERNÁNDEZ-RENAU, A., GÓMEZ, J.A., DE MIGUEL E., RUIZ A., GUTIÉRREZ DE LA CÁMARA O., JIMÉNEZ M., PÉREZ I., MUÑOZ F., PRADO E., DONAMAYOR C., RODRÍGUEZ R., 2011. *Participación del INTA en el proyecto SEN3EXP: Teledetección aeroportada hiperespectral en áreas experimentales continentales*. XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Mieres del Camino (Asturias). Septiembre de 2011.

Avances en el Proyecto COASTALT: la altimetría llega a la costa

J. Gómez-Enri[1], P. Villares[1] C. Gommenginger[2], S. Vignudelli[3] y P. Cipollini[2]

[1] Departamento de Física Aplicada (Universidad de Cádiz). Avda. República Saharaui, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España). Tel: 956016071, Fax: 956016079. E-mail: jesus.gomez@uca.es

[2] National Oceanography Centre. European Way. SO14 3ZH Southampton (U.K.). Tel: +44(0)23 80596404, Fax: 80596400.

[3] Consiglio Nazionale delle Ricerche. Istituto di Biofisica. Area Ricerca CNR. Via Moruzzi 1. 56124 Pisa (Italia)

RESUMEN

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la altimetría, es el desarrollo de nuevas tecnologías, que permitan la utilización de datos altimétricos en la zona más próxima a las regiones costeras. Hasta ahora, se puede decir que la altimetría ha mejorado significativamente los conocimientos en el campo de la Oceanografía en mar abierto, pero poco se ha avanzado en la Oceanografía costera. Los motivos han sido fundamentalmente dos. Por un lado, la mala calidad de algunas de las correcciones aplicadas a la señal altimétrica, cuando el satélite se encuentra en las cercanías de tierra (típicamente a una distancia a costa de unos 30-20 km). Entre estas correcciones se encuentra principalmente la troposférica húmeda y la de marea. Por otro lado, la contaminación que sobre la señal altimétrica tiene la proximidad de la tierra.

El proyecto COASTALT, financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA), ha sido una de las iniciativas puesta en marcha en los últimos años (junto con los proyectos PISTACH, Alticore, Albicocca, etc.), con el objetivo fundamental de mejorar la calidad de los datos altimétricos en las regiones costeras. De esta forma, se prevé poner a disposición de la comunidad científica más de 15 años de datos altimétricos en zonas costeras, con una calidad no alcanzada hasta ahora. Este proyecto internacional está centrado en la mejora de los datos suministrados por el radar altimétrico (RA-2) del satélite europeo ENVISAT de la ESA.

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos con el procesador de datos altimétricos RA-2, desarrollado en el proyecto COASTALT. Este procesador, genera datos a una frecuencia mayor (18 Hz: 1 dato cada 350 m), a los datos que la Agencia suministra a la comunidad científica (1 Hz: 1 dato cada 7 km). Los nuevos datos generados, poseen mejores correcciones (fundamentalmente la corrección troposférica húmeda y la corrección por marea) y han sido procesados de tal forma, que se tiene en cuenta el efecto de la cercanía de la tierra sobre la señales altimétricas en costa.

Palabras clave: altimetría, oceanografía costera, RA-2, ENVISAT.

ABSTRACT

One of the main significant challenges for satellite altimetry is the development of new technologies that allow the use of altimetric data in the coastal zone. Satellite altimetry is a mature discipline over the open ocean that has significantly contributed to improve the knowledge of oceanic processes. In contrast, research on coastal altimetry still needs to be improved. Traditionally, the use of altimetric data in coastal zones is problematic due to two main reasons. On one hand, some bad quality corrections have been applied to the altimetric signals near the coast (typically within 20-30 km from the coast), such as the wet tropospheric component and the tides. On the other hand, there are issues of land contamination in the altimeter signal footprint near the coast.

The COASTALT project, funded by the European Space Agency (ESA), is one of the initiatives launched over the last few years with the aim of improving the quality of the altimetric data in the coastal zone (other similar projects include PISTACH, Alticore, Albicocca, etc). The ultimate goal of such initiatives is to provide the scientific community with more than 15 years of unprecedented high-quality coastal altimetry data. The above mentioned international project is focused in the improvement of the data supplied by the European ENVISAT Radar Altimeter (RA-2).

The present work shows the results obtained with the processor for RA-2 altimetric data developed within the COASTALT project. The processor generates data with a higher frequency (18 Hz: 1 data every 350 m) than that routinely distributed by the ESA to the scientific community (1 Hz: 1 data every 7 km). The new data generated by the processor include better corrections (especially the wet tropospheric component and the tidal corrections) and decontamination of the land effects.

Keywords: *altimetry, coastal oceanography, RA-2, ENVISAT.*

INTRODUCCIÓN

La altimetría por satélite constituye una tecnología madura y ampliamente utilizada en campos como la Oceanografía Física. Actualmente, su principal reto radica en la necesidad de mejorar aún más la precisión y exactitud de sus medidas y la búsqueda de nuevas aplicaciones científicas, que den respuesta a muchas de las incógnitas suscitadas en los últimos años, especialmente las relacionadas con los cambios bruscos en el Clima del Planeta. Sirva como ejemplo, la contribución de la altimetría al estudio de niveles del mar, cuyas variaciones (subida promedio a nivel global de 3.2 mm/año en los últimos 18 años) (Aviso, 2011), están íntimamente relacionadas con algunas de las consecuencias de los cambios climáticos abruptos. La precisión en la determinación de la órbita de los satélites altimétricos requerida para este tipo de estudios, ha de estar por debajo de un error de 2-3 cm. Esta precisión ya ha sido alcanzada globalmente con los datos altimétricos. No obstante, existe la necesidad de seguir avanzando y mejorando las capacidades inherentes al uso de este tipo de información, mejorando aún más las precisiones ya alcanzadas, especialmente a escalas mesoescalares y locales (zonas costeras). Por este motivo, los estudios realizados con altimetría de tendencias del nivel del mar a escalas principalmente locales y la determinación de la altura de ola significativa en regiones costeras, necesitan aún mejores precisiones que las alcanzadas hasta ahora.

Existen varios problemas asociados a la altimetría costera. En la actualidad, se están llevando a cabo diversos proyectos y estudios con el fin de resolver estas dificultades. En primer lugar, debido a la proximidad a la costa, se produce una contaminación de señales altimétricas oceánicas por blancos en tierra (*land contamination footprint*). En segundo lugar, la escasa precisión de algunas de las correcciones geofísicas en las cercanías a la costa, principalmente las correspondientes a las mareas y la componente troposférica húmeda. Esto hace que más de 15 años de datos altimétricos globales en las zonas costeras se encuentren, en gran parte sin explotar. Sin embargo, estos datos serían de gran valor para los estudios de circulación costera, el cambio del nivel del mar y el impacto en el litoral. Además, proporcionan un vínculo esencial entre la tierra (basado en mediciones geodésicas) y el océano (información sobre la superficie del mar) (Vignudelli et al., 2011).

En este trabajo presentamos los primeros resultados obtenidos en el proyecto COASTALT, financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA), dedicado a la altimetría costera utilizando datos del radar altimétrico del satélite ENVISAT (ESA). El trabajo se estructura de la siguiente manera: en la primera sección se comenta brevemente el proyecto COASTALT; la siguiente sección muestra la comparativa entre los datos obtenidos con el reprocesador de señales altimétricas desarrollado en el proyecto, con los datos suministrados por la Agencia. Finalmente, una sección con las conclusiones obtenidas.

EL PROYECTO COASTALT

El proyecto "*Development of Radar Altimetry Data Processing in the Coastal Zone* (COASTALT)", tiene como objetivo fundamental contribuir a llevar a la altimetría costera a un estado preoperacional. Para ello, se pretende generar una serie de productos altimétricos costeros mejorados, mediante el desarrollo de un procesador de señales del radar altimétrico de doble frecuencia del satélite europeo Envisat (ESA). Los tres objetivos específicos del proyecto son: (1) Estudiar las posibilidades de mejora de las correcciones geofísicas, aplicadas a la señal altimétrica, identificando la mejor estrategia a seguir, para su aplicación en las regiones costeras. (2) Analizar las mejoras en el procesamiento de la señal altimétrica para obtener los productos altimétricos (conocido como "*Retracking"*), creando un nuevo procesador de señales. (3) Evaluar la calidad de los nuevos productos altimétricos obtenidos con el nuevo procesador, así como su validación con medias in-situ.

La Figura 1 muestra la configuración básica de funcionamiento del procesador de señales altimétricas, diseñado en el marco del proyecto. Dicho procesador, parte de tres entradas: (1) Fichero de configuración con valores predeterminados, necesarios para el reprocesamiento de la señales. (2) Ficheros SGDR (Sensor Geophysical Data Records), con las señales altimétricas que van a ser procesadas. (3) Máscara costera, que contiene únicamente aquéllas zonas más cercanas a la línea de costa y que serán las que finalmente se procesen. El procesador de señales altimétricas se basa en tres modelos de ajuste de la señal: (i) Reprocesador basado en el modelo teórico de Brown (Brown, 1977). (ii) Reprocesador especular Beta (Deng and Featherstone, 2006). (iii) Reprocesador mixto Brown-Especular, combinando linealmente (i) y (ii). Finalmente, la salida del procesador es un producto específicamente costero, en el que se han implementado las correcciones geofísicas específicas para las zonas costeras a las variables obtenidas por el procesador de señales. Dichas variables son, básicamente, el Alcance (distancia entre el centro de masas del satélite y la superficie media oceánica observada), la velocidad del viento en superficie y la altura de ola significante (SWH).

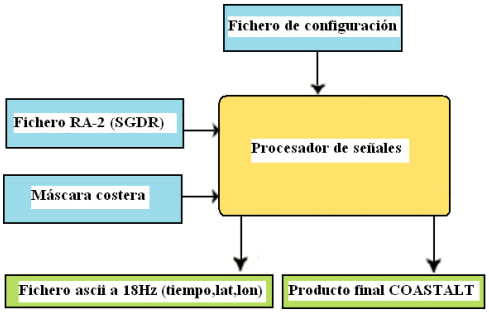


Figura 1: Esquema del procesador de señales del radar altimétrico, desarrollado en el proyecto COASTALT.

RESULTADOS

Comparativa en el Noroeste del Mediterráneo

Para el proceso de validación del los nuevos productos costeros, es necesario en primer lugar comparar los resultados del reprocesador de señales, con los datos suministrados por la Agencia como producto estándar. Para ello se ha seleccionado, de las tres regiones pilotos que hay previstas en el proyecto, el Noroeste Mediterráneo. La Figura 2, muestra las trazas, tanto ascendentes como descendentes, del satélite Envisat, que han sido reprocesadas con el procesador desarrollado en el proyecto. La máscara costera es útil para reprocesar únicamente aquéllas señales que se encuentran dentro de las elipses.

Dicha comparación se muestra en la Figura 3. En este caso, se ha comparado el Alcance (del término anglosajón *Range*), obtenido con el procesador de señales de COASTALT (a partir del modelo de Brown), con el extraído de los ficheros SGDR. El rms es de 1.51 m (banda Ku) y 3.06 m (band S). Se observa como en las proximidades de costa, es donde se producen las mayores desviaciones entre ambos reprocesadotes de señales.

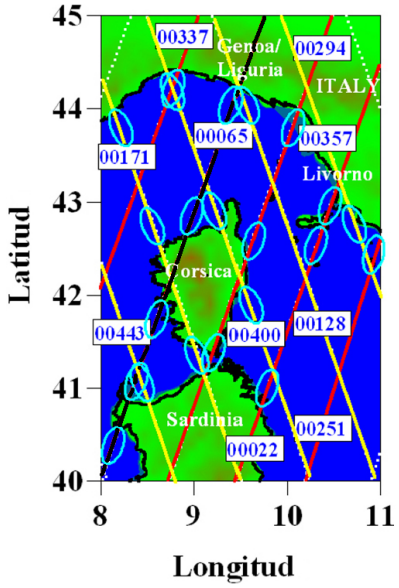


Figura 2: Trazas ascendentes y descendentes del satélite Envisat, en el Noroeste del Mediterráneo. Esta es una de las zonas piloto de estudio del proyecto COASTALT. Las elipses muestran las zonas costeras de interés en las que se van a reprocesar las señales altimétricas. La traza descendente de color negro (número 00065) es la que ha sido utilizada en este trabajo.

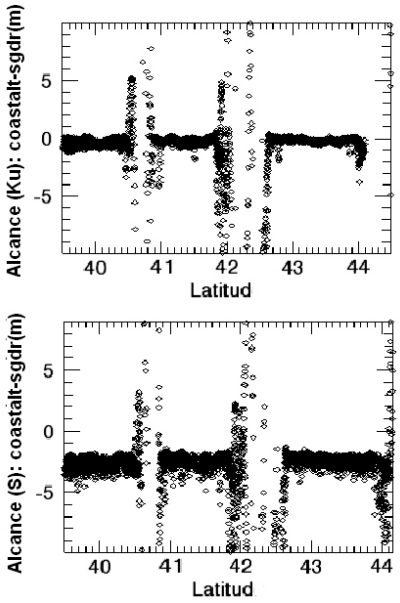


Figura 3: Comparación entre el Alcance obtenido con el procesador (Brown) de señales de Coastalt (bandas Ku y S) y el obtenido del producto SGDR, suministrado por la ESA.

La comparativa con la altura de ola significante (SWH) se muestra en la Figura 4. El rms es de 0.28 m. Hay que indicar que esta comparación se ha hecho con los datos promediados a 1 Hz, que equivale a una resolución espacial a lo largo de la traza de 7 km. Esto se debe a que la SWH extraída de los ficheros SGDR tiene esa resolución espacial, ya que la ESA no proporciona la SWH a 18 Hz. Por lo tanto, para poder comparar ambas series de datos, se creó una serie promediada de alturas de ola (se estimó la media por bloques de 20 valores), a partir de los valores obtenidos por el reprocesador.

CONCLUSIONES

El proyecto COASTALT ha contribuido a acercar la altimetría a la costa. Aunque se encuentra en fase de ejecución, los resultados iniciales obtenidos indican que el reprocesamiento de las señales altimétricas cerca de costa, permiten obtener unos productos costeros de una calidad similar a los existentes en mar abierto y que la Agencia genera de forma sistemática (ciclo completo cada 35 días). Así, es posible obtener parámetros como el alcance, la velocidad del viento en superficie y la altura de ola significativa, generados con el reprocesador de señales, a una distancia a la costa inferior a la existente con los productos estándar.

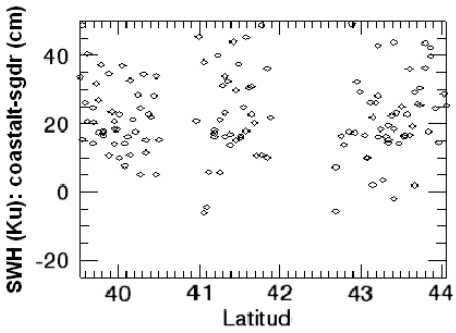


Figura 4: Comparación entre la altura de ola significante (SWH) obtenida con el procesador (Brown) de señales de Coastalt (banda Ku) y la SWH obtenida a partir del producto SGDR, suministrado por la ESA.

BIBLIOGRAFÍA

AVISO, 2011. http://www.aviso.oceanobs.com/.

BROWN, G. S., 1977. *The average impulse response of a rough surface and its applications*. IEEE J. Oceanic Eng., OE-2, 67-74.

DENG, X., FEATHERSTONE, W. E. HWANG, C. and BERRY, P. A. M., 2002. *Estimation of contamination of ERS-2 and POSEIDON satellite radar altimetry close to the coasts of Australia*. Marine Geodesy., 25(4), 249 - 271.

VIGNUDELLI, S., KOSTIANOY, A., CIPOLLINI, P. AND BENVENISTE. *Coastal Altimetry*. Springer. Doi: 10.1007/078-3-642-12796-0. 565 pp.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto nacional CGL2008-04736), así como de la Agencia Espacial Europea (proyecto internacional COASTALT: AO/1-5429/07/I-LG).

Interpretación oceanográfica de imágenes ASAR de alta resolución de las costa gallega utilizando datos auxiliares

Luis González Vilas, Nina Yarovenko, Samuel Curos Mata y Jesus M. Torres Palenzuela

Laboratorio de Teledetección y SIG. Departamento de Física aplicada. Universidad de Vigo. Facultad de Ciencias del Mar. Campus Lagoas-Marcosende. 36200. Vigo (Pontevedra, España). Correo electrónico: luisgv@uvigo.es

RESUMEN

Las imágenes de apertura sintética (SAR), que han sido ampliamente utilizadas para la detección de vertidos de hidrocarburos o para la identificación de embarcaciones en el medio marino, aportan también información oceanográfica relacionada con patrones de viento, oleaje superficial, ondas internas, dinámica de estuarios o afloramientos. La utilización de datos auxiliares simultáneos a las imágenes puede ser así de gran utilidad para la correcta interpretación de las mismas. En este trabajo, se ha llevado a cabo la identificación de diferentes fenómenos oceanográficos en las costas de Galicia mediante el estudio comparado de 27 imágenes ENVISAT ASAR de alta resolución adquiridas entre marzo de 2009 y septiembre del 2010 con los datos aportados por los modelos hidrodinámicos, atmosféricos y de oleaje de MeteoGalicia. Entre los principales resultados destaca la identificación en las imágenes de barreras naturales a los flujos hidrodinámicos y que se derivaron en los modelos utilizando los exponentes de Lyapunov. La experiencia adquirida puede ser de gran utilidad para interpretar futuras imágenes ASAR sobre esta zona y facilitar así su aplicación para la detección de hidrocarburos. Este trabajo es parte del proyecto DRIFTER (AMPERA) para el desarrollo de tecnologías para la detección y predicción de vertidos contaminantes.

Palabras clave: ASAR, vientos, corrientes, oleaje, modelos hidrodinámicos.

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar (SAR) images, which have been widely used for oil spill detection and ship identification on the ocean, also provide oceanographic information related to wind patterns, swell, intern waves, estuarine dynamic or upwelling. The use of ancillary data simultaneous to the images can be very useful for their correct interpretation. In this work, the identification of different oceanographic phenomena on the Galician coastal area has been done by the compared study of 27 full resolution ENVISAT ASAR images acquired between March 2009 and September 2010 with data from hydrodynamic, atmospheric and wave models from MeteoGalicia. Among the main results, it is remarkable the identification on the images of natural barriers to the hydrodynamic flows, which were derived from models using Lyapunov exponents. The acquired experience can be useful for interpreting future ASAR images on this area and making their application to oil spill detection easier. This work has been done in the framework of DRIFTER project, aimed at the development of oil detection and forecasting technologies.

Keywords: *ASAR, winds, currents, wave, hydrodynamic models.*

INTRODUCCIÓN

Las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) presentan múltiples aplicaciones marinas que se basan generalmente en la relación entre la intensidad de la señal retro-dispersada con los patrones de rugosidad superficial (Brekke y Solberg, 2005). De esta forma, se puede estimar las características del viento y del oleaje y detectar corrientes superficiales, frentes oceánicos, vértices, afloramientos u ondas internas. También permiten la identificación de fenómenos de origen atmosférico, como frentes o lluvias intensas. Otras aplicaciones ampliamente extendidas incluyen la detección de vertidos de hidrocarburos y de embarcaciones (Torres Palenzuela *et al*., 2006). Las grandes ventajas de estas imágenes son su relativamente alta resolución espacial y la posibilidad de obtener datos de noche y/o con cobertura nubosa.

A pesar de su enorme potencial, las imágenes

SAR son complicadas de interpretar debido a las interferencias entre los diferentes procesos oceanográficos y atmosféricos. La utilización de datos auxiliares coincidentes en el tiempo y el espacio con las mismas puede así mejorar significativamente su interpretación, ya que permiten verificar la presencia y/o ausencia de determinados procesos (González *et al.*, 2010).

En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos del estudio comparativo entre un conjunto de imágenes ENVISAT ASAR de alta resolución de la zona de las Rías Baixas (costa sur de Galicia) y los datos auxiliares procedentes de de los modelos atmosféricos y oceanográficos ejecutados de forma operacional por MeteoGalicia, el servicio de predicción y observación meteorológica y climatológica de la Xunta de Galicia (www.meteogalicia.es).

FUENTES DE DATOS

Imágenes ASAR

Se utilizaron 27 imágenes de las costas de Galicia obtenidas con el sensor ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) a bordo del satélite ENVISAT entre marzo de 2009 y septiembre de 2010. Este instrumento opera en banda C (5.331 *GHz*) en diferentes modos con una resolución y cobertura variable. Las imágenes utilizadas se adquirieron en modo imagen (IMG), con una resolución nominal de 30 metros y una cobertura espacial de entre 56 y 100 *km* en el rango por 100 *km* en el azimut. Su alta resolución espacial permite el estudio de diferentes procesos incluso en el interior de las rías gallegas, lo cual no es posible con los otros modos de operación del instrumento.

Modelo atmosférico

Meteogalica obtiene diferentes parámetros atmosféricos de forma operacional utilizando el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), que recoge las condiciones de contorno proporcionadas por el modelo global GFS (Global Forecasting System) y se ejecuta en tres mallas de diferente resolución. Se utilizaron campos de viento superficial obtenidos para cada hora en una malla de 4 *km* centrada en Galicia.

Modelos hidrodinámicos y de oleaje

El modelo MOHID de MeteoGalica es un modelo hidrodinámico 3D baroclínico que nos permite obtener datos de corrientes, temperatura y salinidad de forma operacional para cada hora. El modelo, que es forzado por el modelo meteorológico WRF, se ejecuta en varias mallas anidadas de diferente resolución. Para este trabajo se utilizó la malla costera de 0.02º de resolución y la malla que cubre la Ría de Vigo con 500 *m* de resolución.

También se utilizaron datos del modelo de propagación de oleaje en aguas poco profundas SWAN (Simulating Waves Nearshore) ejecutado operacionalmente por MeteoGalicia para la zona de las Rías Baixas con 500 *m* de resolución**.** Este modelo es forzado a su vez por el modelo meteorológico WRF y utiliza las condiciones de contorno proporcionadas por el modelo de oleaje WW III (Wave Watch III), que combina el efecto del mar de fondo y de los vientos locales.

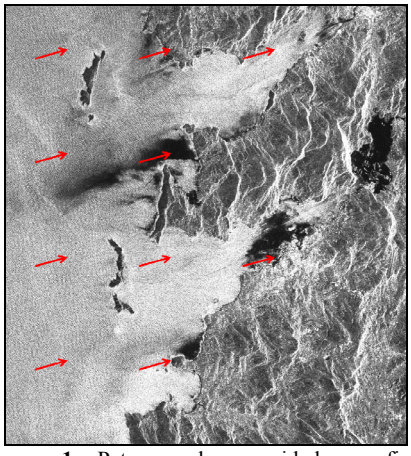


Figura 1: Patrones de rugosidad superficial observados en una imagen ASAR del 6 de Marzo del 2010. Las flechas indican la dirección del oleaje derivada del modelo SWAN

METODOLOGÍA

Exponentes de Lyapunov

Además de los parámetros generados directamente en la ejecución de los modelos (vientos, corrientes u oleaje), se calcularon los exponentes de Lyapunov de tiempo finito (FTLE). Su obtención se basa en las trayectorias que seguirían una red regular de trazadores lagrangianos en un tiempo finito y que se pueden determinar a partir del campo de velocidades de corrientes obtenido de forma operacional por el modelo MOHID (Perez-Muñuzuri y Huhn, 2010). A partir de las

imágenes de FTLE se pueden obtener líneas de divergencia y convergencia que se relacionan con las estructuras coherentes que caracterizan la dinámica lagrangiana, como son los vértices, frentes o barreras del transporte.

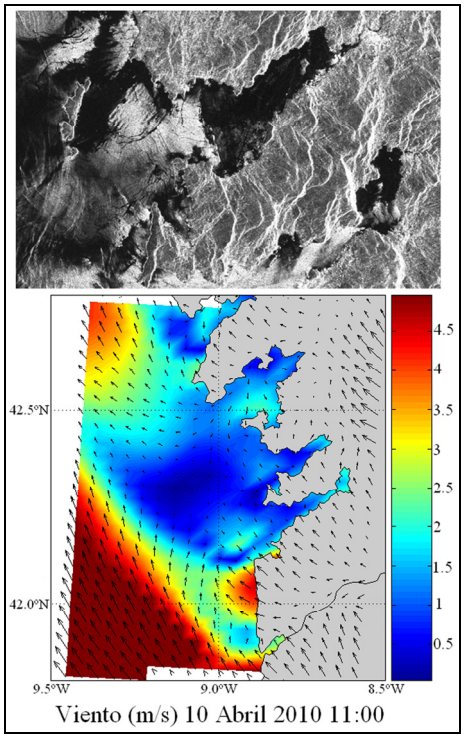


Figura 2: Comparación de la imagen ASAR y de los datos de viento derivados del modelo WRF para el día 10 de Abril de 2010.

Comparación con los datos auxiliares

Las imágenes ASAR se distribuyen ya corregidas geométricamente y georeferenciadas en proyección UTM, mientras que los datos procedentes de los modelos se organizan en mallas definidas con coordenadas geográficas. Por lo tanto, al estar ambas fuentes de datos georeferenciadas, se pueden comparar siempre que cubran la misma área geográfica, aunque sea necesario un cambio en el sistema de coordenadas. El principal problema es la mayor resolución espacial de las imágenes ASAR, por lo que se utilizaron dos estrategias. La primera consiste en la creación de rásteres de una resolución y área geográfica equivalente a la de las imágenes ASAR donde a cada píxel se le asigna el valor correspondiente a un determinado parámetro de los modelos calculado mediante un proceso de triangulación. La segunda estrategia consiste en la superposición sobre la imagen ASAR de datos vectoriales derivados de los datos de los modelos, como puedan ser flechas indicativas de la dirección de los vientos, corrientes u oleaje o bien líneas que nos indican la posición de frentes u otras estructuras. Como las predicciones se obtienen para cada hora, la diferencia temporal de los datos auxiliares y la imagen siempre va a ser inferior a una hora.

RESULTADOS

Debido a que las ondas electromagnéticas de microondas no penetran en el agua de mar, la retro-dispersión de la señal depende directamente de la rugosidad superficial. De esta manera, los patrones de oleaje superficial son a menudo visibles en las imágenes, especialmente las de alta resolución, como se puede ver en la Figura 1. La imagen confirma además los datos obtenidos por el modelo de propagación de ondas para esa zona.

Las variaciones en la velocidad del viento regulan la rugosidad de la superficie marina en la escala de Bragg y causan variaciones locales en la retrodispersión (Brekke y Solberg, 2005). Generalmente, con velocidades de viento por debajo de 2 m/s se generan signaturas oscuras en las imágenes. Muchas de estas signaturas aparecen en áreas costeras y se deben al efecto de la topografía. La comparación entre las imágenes y los datos de viento derivados del modelo atmosférico nos permite verificar éstas signaturas oscuras como áreas de bajo viento (Figura 2).

Otra estructura interesante que se puede identificar en las imágenes ASAR gracias a los datos de los modelos oceanográficos son frentes entre masas de agua diferentes, y con diferentes patrones de circulación superficial, y que se pueden ver como líneas más brillantes en las imágenes (Figura 3).

Finalmente, en la Figura 4 se puede ver un ejemplo de una imagen de FTLE mostrando las líneas de convergencia y de divergencia, las cuales suponen barreras al flujo de transporte, es decir, zonas donde tenderían acumularse material, bien sea fitoplancton, material en suspensión e incluso vertidos. Estas acumulaciones causan una atenuación de la retrodispersión y se verían como signaturas oscuras en las imágenes ASAR.

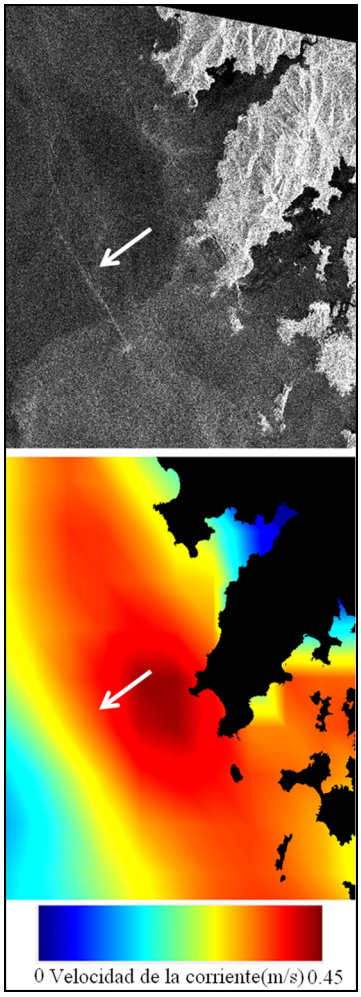


Figura 3: Comparación entre la imagen ASAR y el modulo de la corriente derivado del modelo MOHID para el día 28 de Febrero de 2010.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran como se puede mejorar significativamente la interpretación de imágenes SAR utilizando datos de modelos atmosféricos y oceanográficos. Para aplicaciones como la detección de vertidos de hidrocarburos, los datos auxiliares permiten identificar ciertos procesos que darían lugar a falsas alarmas (González *et al*., 2010).

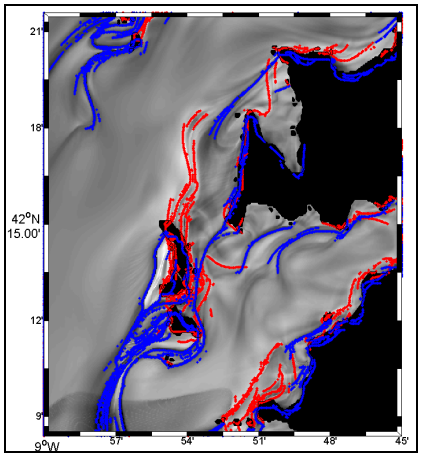


Figura 4: Imagen de los exponentes de Lyapunov de tiempo finito(FTLE) mostrando las líneas de convergencia (azul) y divergencia (rojo).

BIBLIOGRAFÍA

BREKKE, C. and SOLBERG, A. H. S., 2005. *Oil spill detection by satellite remote sensing*. Remote Sensing of Environment, 95, 1–13.

GONZÁLEZ, L., TORRES, J.M., YAROVENKO, N. y MARTIN, J., 2010. *Discriminación automática de vertidos de hidrocarburos a partir de imágenes ASAR utilizando una máquina de vectores soporte (SVM)*. Revista de la Asociación Española de Teledetección, 33, 17-28.

PEREZ-MUÑUZURI, V. and HUHN, F., 2010. *The role of mesoscale eddies time and length scales on phytoplankton production*. Nonlinear Processes in Geophysics, 17, 177-186.

TORRES PALENZUELA, J.M., GONZALEZ VILAS L. y SACAU CUADRADO, M., 2006. *Use of ASAR images to study the evolution of the Prestige oil spill off the Galician coast.* International Journal of Remote Sensing, 27(10), 1931-1950.

AGRADECIMIENTOS

Las imágenes ASAR han sido proporcionadas por la ESA dentro del proyecto AO623. Gracias a Meteogalicia por los datos de los modelos.

Detección de contaminantes en el medio marino a través del análisis e interpretación de imágenes SAR utilizando técnicas de Inteligencia Artificial

D. Mera, J.M. Cotos, G. Álvarez y S. Villarroya

Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Universidad de Santiago de Compostela. C/Constantino Candeira s/n. Campus Vida. 15782. Santiago de Compostela (A Coruña, España). Tel.: 881816000. Correo electrónico: david.mera@usc.es

RESUMEN

Las grandes catástrofes naturales que se producen a raíz de graves accidentes de petroleros o plataformas petrolíferas son investigadas, analizadas e incluso juzgadas, pero existe otro problema que puede parecer menor y que a menudo queda en el anonimato. Cada día se producen vertidos ilegales por la limpieza de las sentinas de los buques en alta mar. La suma de todos estos vertidos produce graves problemas medioambientales. La dificultad para detectarlos hace que a menudo los culpables no sean perseguidos. Anteriores estudios (Fiscella *et al.*, 2000) han demostrado la utilidad de las imágenes de los radares de apertura sintética, SAR, para la detección de hidrocarburos en la superficie del océano. En este artículo se presenta un prototipo semiautomático en el cual se han desarrollado técnicas de Inteligencia Artificial para detectar y clasificar vertidos a través de su forma utilizando para ello imágenes SAR.

Palabras clave: SAR, Contaminantes Marítimos, Hidrocarburos, Teledetección, Inteligencia Artificial.

ABSTRACT

The greatest ecological disasters related to oil spills caused by both tankers and platforms are well known by the international community. The spills are monitored via remote sensing, the cause is analyzed and, whenever possible, the culprits are pursued. However, there is another problem less known which daily affects the coasts. This problem is the oil spills caused by the cleaning of the ship bilges. Although this issue could seem minor, the sum of all these oil spills provokes an ecological disaster. The difficulty to detect these spills has as a consequence that the violators are not prosecuted.

The ability of synthetic aperture radar, SAR, to detect hydrocarbons in the ocean's surface was shown in previous studies (Fiscella et al., 2000). In this paper, a semiautomatic prototype to segment and to classify oil spills from the ocean surface using SAR images is introduced. Intelligent Artificial algorithms were developed to detect the oil spills via their shapes.

Keywords: *SAR, Ocean Pollution, Hydrocarbons, Remote Sensing, Artificial Intelligence.*

INTRODUCCIÓN

Las costas de determinados países, por su situación geográfica, poseen un intenso tráfico marítimo. Un ejemplo perfecto es España y particularmente el dispositivo de separación de tráfico de Finisterre, en la costa Gallega, que soporta un tráfico anual de más de 40.000 barcos (Sasemar, 2009). Una de las peores consecuencias de un gran tráfico marítimo son los desastres ecológicos como por ejemplo el accidente del Prestige (Balseiro *et al.*, 2003).

Este tipo de accidentes tienen gran repercusión internacional pero existe otro problema mucho menos conocido que afecta diariamente a las costas de estos países. La limpieza en alta mar de las sentinas de los buques genera gran cantidad de pequeños vertidos (sentinazos). La suma de todos ellos supone una grave amenaza para el ecosistema. La normativa internacional establece una distancia a la costa y la cantidad de vertido que un buque puede realizar en alta mar (Imo, 1973) pero no siempre es respetada. Resulta muy costoso realizar un seguimiento de los pequeños vertidos y en consecuencia a menudo quedan impunes.

Los Radares de Apertura Sintética, SAR, tienen una eficacia demostrada (Chuvieco Salinero, 2002) para detectar y distinguir características en la superficie del océano.

Los hidrocarburos, así como determinadas formaciones naturales (bajo viento, hielo, algas, etc.), se aprecian como regiones oscuras en las imágenes SAR. La habilidad para discernir entre unas y otras se atribuía tradicionalmente a los oceanógrafos expertos. Es un método posible

para descubrir pequeños vertidos pero exige mucho tiempo en el análisis de la imagen.

Existen desarrollos de aplicaciones semiautomáticas para intentar facilitar la búsqueda de estos vertidos. Estas aplicaciones suelen basarse en las características (textura, color, gradientes) de cada píxel de la imagen. La mayoría de las soluciones existentes se basan en software propietario, como MATLAB (García-Pineda *et al.*, 2009).

En este artículo se presenta un prototipo de software semiautomático para la clasificación de vertidos desarrollado a través de software libre y código abierto. La aplicación realiza una aproximación al problema basándose en la forma de las manchas.

MATERIALES

Para la realización de este trabajo se han utilizado imágenes SAR con vertidos confirmados e imágenes sintéticas para recrear los falsos positivos.

Imágenes SAR

Las imágenes SAR pueden ser vistas como matrices de información, donde cada elemento tiene un valor entre 0 y 255. Dicho valor es trasladado a la escala de grises donde el 0 representa al color negro y el 255 al blanco. Cada elemento de la matriz está asociado a un píxel de la imagen, que se muestra en escala de grises con 8 bits de profundidad.

Se ha utilizado una colección de 36 imágenes del Golfo de Méjico con vertidos confirmados para desarrollar y entrenar los algoritmos. El Golfo de Méjico posee grandes reservas naturales de petróleo y es habitual que se produzcan pequeñas emanaciones naturales. La consecuencia de estas emanaciones son pequeños vertidos en superficie, cuyo comportamiento y forma es muy similar a la de los sentinazos. Esto hace que el conjunto de imágenes sea adecuado para una primera aproximación al problema.

Las imágenes utilizadas fueron captadas por el satélite medioambiental Radarsat-1 que opera en la banda C. La polarización de las imágenes es Horizontal-Horizontal y el "beam mode" es el "standard 2", cuyo ángulo de incidencia va desde los 24,2° a los 31,2°.

Imágenes Sintéticas

Se ha desarrollado un software para generar automáticamente formas aleatorias. El objetivo de este software es crear falsos positivos para poder validar el prototipo.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para descubrir y clasificar vertidos se divide en 3 fases:

Segmentación

El proceso de segmentación consiste en dividir una imagen en regiones homogéneas con el fin de facilitar un posterior análisis o reconocimiento automático. En el caso de este prototipo, el objetivo de esta fase es destacar todas las posibles manchas que contiene una imagen SAR. En este proceso no se evalúa si la mancha es un vertido o un falso positivo.

Se desarrolló una herramienta basada en una red neuronal artificial, RNA, concretamente en un Perceptrón Multicapa, MLP. Cada píxel de la imagen es procesado por dicha red y la salida es un valor binario que representa si el pixel es considerado o no parte de una mancha. El resultado de aplicar esta red a todos los píxeles de la imagen es una nueva imagen en binario, donde los píxeles que pertenecen a una mancha son mostrados en blanco y el resto de la imagen es representado en negro.

La red utilizada para segmentar está compuesta por tres capas. La primera, capa de entrada, contiene 8 neuronas que representan otras tantas características de cada píxel de la imagen: el ángulo de incidencia del satélite con el que se capturó el valor del pixel, el valor del color del pixel, dos operadores de detección de bordes y cuatro más que representan los valores medios de los cuatro primeros niveles de vecindad del píxel evaluado.

La capa intermedia, u oculta, la forman 4 neuronas y la capa de salida una sola, que devuelve si el pixel evaluado pertenece a una mancha o no.

Para realizar el entrenamiento de la red MLP se etiquetaron manualmente más de 13.000 píxeles. Para ello se implementó una función que visualiza la imagen SAR y permite al experto marcar sobre ella cada píxel y etiquetarlo como mancha o zona limpia. La Figura 1 muestra un ejemplo de segmentación.



Figura 1: Resultado de la fase de segmentación: **a)** imagen original y **b)** imagen segmentada.

Caracterización

Una vez que la imagen ha sido segmentada se extraen de ella todas las posibles manchas. Se considera mancha todo conjunto de píxeles blancos que puede ser rodeado por un contorno formando un área con una forma determinada. Cada mancha encontrada se tratará como una unidad independiente.

Las manchas se extraen utilizando la librería cvBlobsLib de OpenCV, desarrollada en C++. Es posible filtrarlas estableciendo un área mínima y/o máxima. Posteriormente cada mancha es caracterizada, es decir, se construye un vector de características que la representa. Las características que se han analizado definen al objeto por su forma.

El vector utilizado consta de 88 componentes que se subdividen en 4 grupos:

- Descriptores geométricos: Este grupo incluye descriptores como el área, perímetro, curvatura, simetría, etc. Se encuentran entre los descriptores más utilizados en procesos de clasificación y reconocimiento de patrones.
- Descriptores basados en Momentos: Permiten describir la distribución de los píxeles contenidos en una mancha. Aunque los momentos generales no son invariantes ante transformaciones geométricas, permiten obtener momentos que sí lo son. Entre las características están presentes momentos generales, centrales, normalizados, momentos de Hu, de Flusser & Suk y momentos de Zernike.
- Descriptores de código de cadena: Se utilizan para representar el contorno de la imagen. Se ha escogido un código de cadena de módulo 8 y se han almacenado en el vector las variaciones entre los dígitos del código para lograr invarianza frente a rotaciones.
- Descriptores de Fourier: Tratan el problema de la invarianza a las transformaciones geométricas desde el dominio de la frecuencia.

La Figura 2 muestra la distribución de los descriptores en el vector de características.

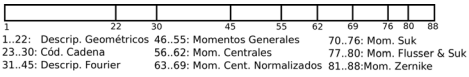


Figura 2: Vista esquemática de la composición del vector de características.

Clasificación

El objetivo final del software desarrollado es clasificar las manchas candidatas en vertidos o falsos positivos.

Como se ha comentado previamente el proyecto trata de clasificar los sentinazos a través de su forma. Estudios previos (Topouzelis, 2008) muestran que los sentinazos, basándose en su forma, pueden agruparse en las cinco clases de la Figura 3.

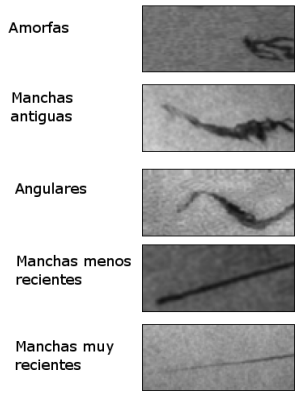


Figura 3: Clasificación de los tipos de sentinazos por su forma.

Se ha empleado otra red MLP para la clasificación de las manchas encontradas. Para entrenar dicho clasificador se ha examinado, con ayuda de un experto, el conjunto de imágenes SAR. A través de estas imágenes se han obtenido una serie de vertidos/emanaciones que han sido agrupados por su forma en las categorías mostrados anteriormente. A su vez se han dividido dichos grupos para formar un conjunto de entrenamiento y otro de validación. La Tabla 1 muestra el número de elementos de cada conjunto.

Forma	Entrenamiento	Validación
Amorfas	98	41
Antiguas	159	66
Angulares	20	8
Menos recientes	102	43
Muy recientes	31	17
Falsas	119	50

Tabla 1: Número de elementos de los conjuntos de entrenamiento y validación de cada clase.

Un sexto grupo de falsos positivos se ha añadido a los conjuntos anteriores. Este grupo está formado por las manchas sintéticas generadas aleatoriamente por el software desarrollado para la ocasión.

De cada mancha se ha obtenido su vector de características, que servirá como entrada de la red neuronal. Por tanto el MLP posee una capa de entrada con 88 neuronas, la capa de salida

contiene 6. Cada neurona de salida representa una de las clases consideradas. Se han probado diferentes configuraciones en la capa oculta, siendo 20 neuronas la que mejores resultados obtuvo, como se ve en la Figura 4.

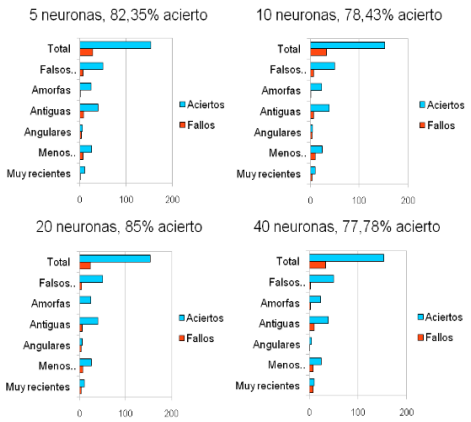


Figura 4: Resultados de la clasificación con distintas configuraciones del MLP.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El trabajo presentado en este artículo es una primera aproximación a la detección automática de sentinazos a partir de imágenes SAR de satélite por su forma.

Se trabajó con imágenes del Golfo de Méjico por tratarse de un entorno altamente estudiado en el que es sencillo obtener imágenes con emanaciones confirmadas. La similitud de éstas, en cuanto a forma y comportamiento, con los sentinazos provocados por los buques las hace adecuadas para una primera aproximación.

Se ha desarrollado un prototipo operacional cuyos resultados invitan a pensar en una línea de investigación prometedora. Queda pendiente el análisis estadístico para eliminar posibles redundancias de información entre las 88 características elegidas.

En un paso posterior se aplicarán los algoritmos desarrollados a imágenes del corredor de Finisterre, donde las emanaciones naturales son inexistentes y en las que se buscará detectar vertidos procedentes de buques, verdaderos sentinazos.

En la actualidad el equipo de trabajo ha iniciado una colaboración con Salvamento Marítimo (www.salvamentomaritimo.es), lo que permitió acceder a información de vertidos y falsos positivos confirmados de la costa Gallega. Esto permitirá prescindir de los falsos positivos sintéticos y trabajar sólo con datos reales.

Si los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos desarrollados a la nueva zona geográfica no fueran satisfactorios, se añadirá información contextual al vector de características. Por ejemplo podrá tenerse en cuenta la presencia de buques en las proximidades de una mancha o la velocidad del viento en la zona. Ambas datos pueden ser obtenidas de las propias imágenes SAR y pueden ser de gran relevancia a la hora de distinguir sentinazos de falsos positivos.

BIBLIOGRAFÍA

BALSEIRO C.F., CARRACEDO P., GÓMEZ B., LEITÃO P.C., MONTERO P., NARANJO L., PENABAD E. and PÉREZ-MUÑUZURI V., 2003: *Tracking the Prestige oil spill: An operational experience in simulation at Meteogalicia*. Weather, 58, 452-458.

CHUVIECO SALINERO E., 2002. *Teledetección ambiental*. Ed. Ariel.

FISCELLA B., GIANCASPRO A., NIRCHIO F., PAVESE P. and TRIVERO P., 2000: *Oil spill detection using marine SAR images*. International Journal of Remote Sensing, 21:18, 3561-3566.

GARCÍA-PINEDA O., ZIMMER B., HOWARD M., PICHEL W., LI X. and MACDONALD I.R., 2009: *Using SAR images to delineate ocean oil slicks with a texture-classifying neural network algorithm (TCNNA)*. Canadian Journal of Remote Sensing, 35:5, 411-421.

IMO, 1973. *International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL)*. International Maritime Organization (IMO).

SASEMAR, 2009. *Informe Anual*. Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR).

TOPOUZELIS K.N., 2008: *Oil spill detection by SAR images: dark formation detection, feature extraction and classification algorithms*. Sensors, 8, 6642-6659.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Consellería de Innovación e Industria de la Xunta de Galicia. Referencia: PGIDIT08SIN001236PR.

Segmentación difusa de imágenes MODIS de Temperatura Superficial del Mar y Clorofila en un sistema de recuperación de imágenes

B. Navarro, F. J. Martínez, J.A. Piedra y M. Cantón

Departamento de Lenguajes y Computación de la Universidad de Almería. Ctra. Sacramento s/n 04120 La Cañada de San Urbano (Almería/España). Tel: 950015482. Email: mcanton@ual.es

RESUMEN

La recuperación automática de imágenes oceánicas de interés almacenadas en bases de datos es crucial para los estudios de dinámica oceánica y Cambio Global. Este trabajo se centra en el reconocimiento de estructuras oceánicas mesoescalares. La alta variabilidad morfológica y contextual de las estructuras dificulta en gran medida la complejidad en el proceso de reconocimiento de las mismas. La segmentación es la etapa más importante a la hora de obtener una buena clasificación. En este trabajo se ha desarrollado una técnica de segmentación difusa que mejora la detección de estructuras y que permite agrupar regiones descartando el ruido debido a una mala recepción de la señal del sensor o a la presencia de zonas nubosas no conectadas.

Palabras clave: segmentación, lógica difusa, MODIS, estructuras oceánicas.

ABSTRACT

Automatic retrieval of images stored on interest ocean databases is crucial for studies of ocean dynamics and Global Change. This work focuses on the recognition of mesoscale oceanic structures. The high morphological and contextual variability of the structures greatly hinders the complexity in the process of recognition. Segmentation is the most important step in getting a good classification. In this work we have developed a fuzzy segmentation technique that improves the detection of structures and that group regions with noise due to poor reception by the sensor or to the presence of not connected cloudy areas.

Keywords: *segmentation, fuzzy logic, MODIS, oceanic structure.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el uso de los sistemas de teledetección por distintos motivos, como pueden ser el estudio del cambio climático, de fenómenos meteorológicos o de ecosistemas. El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar un sistema para la interpretación automática de imágenes de satélite oceánicas (Kulkarni, 2001) (Guindos et al., 2001).

En particular, se ha creado un sistema para la búsqueda de estructuras oceánicas mesoescalares a partir de las imágenes del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Sprectroradiometer*) a bordo de los satélites *Terra* (EOS AM) y *Aqua* (EOS PM). Lo novedoso de este sistema es la realización de la segmentación y la recuperación junto con el uso de la lógica difusa.

La lógica difusa (Kulkarni, 2001) facilita la comprensión para los usuarios de las características que se utilizan, ya que para éstos es más fácil tener un concepto como el de "región pequeña", "región grande" o "temperatura de agua fría" a tener que tratar de entender un conjunto de descriptores y/o valores matemáticos extraídos de las regiones de las imágenes.

Las imágenes de satélite del sensor MODIS que utilizaremos pueden representar la temperatura superficial del mar (**SST**: *Sea Surface Temperature*) o la cantidad de clorofila-A en el océano (**CHL**: *Chlorophyll*). Este sistema realiza la recuperación de las distintas regiones encontradas mediante las características difusas, de forma que se utilice un lenguaje amigable a la hora de que un usuario necesite extraer conclusiones de la información solicitada.

DATOS DE PARTIDA

La serie de imágenes utilizadas del sensor MODIS corresponden al periodo entre 2008 y 2010. La zona de estudio es el archipiélago de las Islas Canarias y el noroeste africano, así como las

costas de EEUU. El mayor problema para la selección de las imágenes es la nubosidad de la zona, de forma que no se sigue un patrón fijo en cuanto al periodo de tiempo en la selección.

Para la creación de las imágenes, se ha desencriptado la información de los archivos HDF que se pueden obtener del sensor, obteniendo de esta forma la localización de las zonas de agua y de las zonas que contienen nubes o tierra.

Una vez que se verifican los datos anteriores se procede a la creación de la imagen, para la cual usamos una escala de colores similar a la del CREPAD (Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de imágenes de observación de la Tierra), tanto para las imágenes de SST como para las de CHL. Dejamos el color blanco para indicar zonas nubosas y el marrón para indicar zonas terrestres.

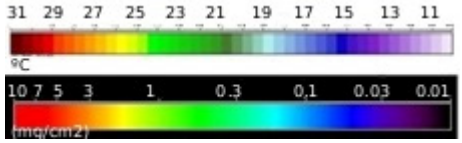


Figura 1: Escala de colores del CREPAD, para CHL por mg/m^3 (arriba) y para SST por grados centígrados (abajo).

METODOLOGÍA USADA

Preprocesado

El siguiente paso a seguir es pasar las imágenes a escala de gris y realizar un suavizado para eliminar el ruido que la imagen pueda contener. Para el suavizado hemos elegido realizar un doble filtro de mediana, ya que tras varias pruebas creemos que era con el que mejor resultado obteníamos. En la figura 2 podemos ver un ejemplo de cómo queda una parte de la imagen tras el preprocesado.

Segmentación

La segmentación se divide en dos partes, en la primera de ellas se utilizan técnicas clásicas de segmentación (Meinel and Neubert, 2004) y se le añade a las regiones información difusa. La segunda parte de la segmentación es un método que utiliza la información difusa (Lizarazo and Elsner, 2008), que denominamos algoritmo de fusión de regiones difusas.

Las técnicas normalmente utilizadas para la segmentación de imágenes suelen ser, el detectado de bordes, la utilización de umbrales y los métodos de crecimiento de regiones (Meinel and Neubert, 2004). En nuestro caso utilizaremos la combinación de dos de estas técnicas, la umbralización y la detección de bordes.

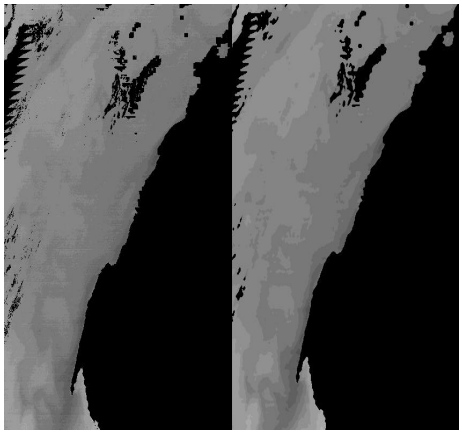


Figura 2: Antes y después del preprocesado.

La imagen se umbraliza entre un rango de valores de gris definidos, para conseguir una gama de grises que representan información homogénea. En nuestro caso, cada umbralización, tomara un rango de grises la cual representará un grado en la temperatura superficial del mar en el caso de imágenes SST y una cantidad definida de clorofila en mg/m^3 en el caso de imágenes CHL. Esta umbralización nos devolverá una imagen binaria, donde tendremos por una parte la zona de agua que queremos segmentar, y por otra el resto de la imagen.

Seguidamente, a cada uno de estos umbrales se le aplicará una operación morfológica como es la apertura con la que se difuminan los contornos, se eliminan las protuberancias y separa los objetos en puntos estrechos. Después se aplica una técnica de detectado de bordes, para obtener los contornos de las regiones de la imagen. Para el detectado de bordes hemos usado la función *cvFindContour* propia de la librería OpenCV (*Open Source Computer Vision*), la cual utiliza un algoritmo de aproximación poligonal para detectar el contorno. También se eliminan las zonas minúsculas que se consideren regiones, ya que estas serán pequeñas agrupaciones de pixeles que hayan sobrevivido al preprocesado y a la apertura anterior.

En la figura 3, vemos un ejemplo de uno de los 21 umbrales que se le han realizado a esta imagen, y como queda tras realizarle el detectado de bordes.

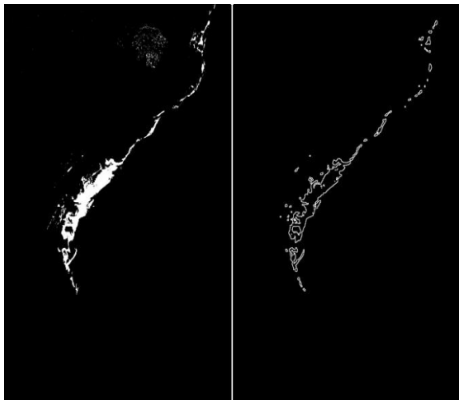


Figura 3: Un umbral de la imagen y su detectado de bordes.

Por último, a cada una de las regiones encontradas se le calculan sus descriptores. Algunos de estos descriptores, se calcularan mediante el uso de la lógica difusa, ya que necesitamos y queremos una información lo más fácil de entender para el usuario, para un posterior tratamiento. Estos descriptores son: temperatura del agua o cantidad de clorofila (que se compondrá de 5 grupos: muy fría o muy baja, fría o baja, templada o media, cálida o alta, muy cálida o muy alta), distancia a isla, distancia a continente (que se compondrán de 3 grupos: cerca, media, lejos) y tamaño de la región (que se compondrá de 3 grupos: pequeña, media y grande).

En la figura 4 se pude ver un ejemplo de función difusa, en este caso la de temperatura superficial del mar. Los ejes de coordenadas muestran los niveles de gris desde 0 al 254 y el grado de pertenecía de cada grupo.

Estos descriptores difusos ayudan a la hora de etiquetar una región según sus características, de forma que, según un valor de temperatura se nos indique a qué grupos puede permanecer y qué grado de pertenencia tiene a ese grupo. Por ejemplo si una zona con 11.9 grados debe pertenecer al grupo de agua "fría" y también debe pertenecer al grupo de agua "muy fría", pero aun estando en ambos, la región tiene un grado de pertenecía a cada uno de ellos. Así si el grado de pertenencia al grupo "fría" es de 0.6 y el grado al grupo "muy fría" es de 0.8, entendemos que se puede considerar agua "fría", pero que tendría más sentido considerarla agua "muy fría". Lo bueno es que no se excluye de un grupo por pertenecer a otro.

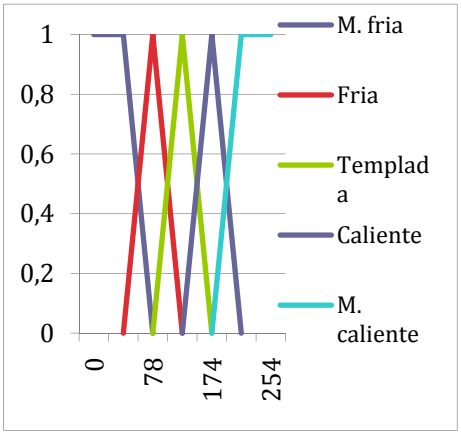


Figura 4: Función de fuzzification SST.

Terminado este paso obtenemos una serie de regiones por toda la imagen, con unas características y unos valores difusos calculados.

Fusión difusa de regiones

La fusión de las regiones de la imagen se realiza a través de una consulta difusa. Por ejemplo en la figura 5 podemos ver el resultado al buscar el afloramiento del noroeste de África con las siguientes características:

Agua "muy fría" con pertenencia a ese grupo superior o igual a 0.1 o agua "fría" con pertenecía al grupo superior o igual a 0.1 y además distancia a continente "cerca" con grado de pertenencia superior o igual a 0.1

Lo que traducido para el usuario que hace la consulta significa buscar regiones de agua fría o muy fría y que estén cerca del continente.

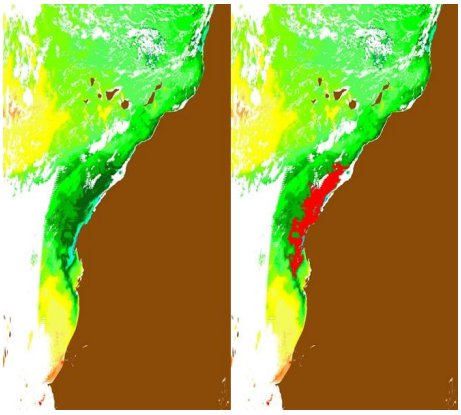


Figura 5: Imagen original e imagen con resultado.

Como se puede observar, aparece en color rojo casi por completo el afloramiento del noroeste africano que queríamos encontrar en esta imagen. Esta no es una región de la imagen, sino una nueva región creada al fusionarse 16 regiones de la imagen original. Todas estas regiones cumplen las características dadas en la consulta y se encuentran cercanas, así que se fusionan en una sola.

Para fusionar las regiones en una, partimos de las características difusas que usamos para describir cada región así como el grado de pertenencia de cada característica. El resultado de la fusión será de mayor o menor calidad según las características seleccionadas y sus grados de pertenencia.

El funcionamiento consiste en coger todas las regiones de la imagen que cumplan las condiciones dadas y proceder a comprobar si dos regiones pueden conformar una estructura. Para ello utilizaremos los ROI de las regiones (ROI: *Region of Interest*). El algoritmo toma una región como base de la fusión (normalmente la de mayor área), entonces comprueba para cada región que su ROI y el ROI de la región base tenga una intersección en algún punto. Si eso se produce procede a fusionar las dos regiones.

Tras fusionarlas procede a cambiar el tamaño del ROI base y adaptarlo para que recoja completamente las dos regiones, tras esto comprueba la siguiente región. Este proceso continuará hasta agotar todas las regiones de la consulta y tras esto repetirá el proceso con aquellas regiones que no fueron fusionadas en la pasada anterior. Si una región no puede fusionarse con ninguna otra se descarta, ya que uno de los requisitos de una región fusionada es que contenga al menos dos regiones básicas.

RESULTADOS

La precisión de los resultados depende en gran medida de lo que se pretenda buscar en la imagen. En la tabla 1 se observan los resultados de la segmentación por umbrales y con fusión difusa para la detección de posibles regiones de afloramientos. En este ejemplo hemos utilizado un conjunto de 20 imágenes del Sensor MODIS. El error cometido en la extracción de posibles regiones de afloramiento es mucho mayor en la segmentación basada en umbrales, debido principalmente a que la segmentación de fusión difusa es más precisa (conocimiento difuso) y flexible (eliminación de ruido) en la búsqueda de regiones.

	Número Medio de Regiones detectadas	**Error medio cometido (%)**
Seg Umbral	35	40%
Seg Fusión	17.3	10%

Tabla 1: Comparativa entre la segmentación mediante umbralizado (Seg Umbral) y con fusión difusa de regiones (Seg Fusion) para la detección de afloramientos.

CONCLUSIONES

El sistema ofrece unos buenos resultados en el análisis automático de imágenes de temperatura y clorofila. La segmentación basada en fusión de regiones difusas aporta ventajas sobre las segmentaciones clásicas: incrementa la precisión, permite trabajar con ruido provocado por las nubes o datos erróneos y facilita la búsqueda de regiones con la inclusión de parámetros difusos.

BIBLIOGRAFÍA

KULKARNI, A., 2001. *Computer Vision and Fuzzy-Neural Systems*. Prentice-Hall.

GUINDOS, F., TORRES, J., A., PERALTA, M. y CANTÓN, M., 2001. *Segmentación iterativa basada en conocimiento del afloramiento de aguas frías en la costa sahariana.* Revista de la AET, 16, 107-110.

MEINEL, G., y NEUBERT, M., 2004. *A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data*. XX Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 1-6.

LIZARAZO, I. y ELSNER, P., 2008. *Fuzzy regions for handling uncertainty in remote sensing image segmentation.* The International Conference on Computational Science and Applications (ICCSA), 724–739.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente soportado por el proyecto MICINN: TIN2008-06622-C03-03.

Estudio de la pluma de turbidez en el estuario del Guadalquivir a través de imágenes de satélite y datos in-situ

G. Navarro, I. Caballero y J. Ruiz

Departamento de Ecología y Gestión Costera. Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Avda. Republica Saharaui, s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España). Tel: 956832612, Fax: 956834701. E-mail: gabriel.navarro@icman.csic.es

RESUMEN

El procesamiento de las imágenes MODIS junto con el análisis de los datos *in-situ* recolectados en el estuario del Guadalquivir ha hecho posible el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la pluma de turbidez en la desembocadura del estuario. Los resultados han demostrado la conexión que existe entre el aumento de las descargas y la aparición de la pluma, sobre todo en épocas lluviosas. Una vez establecida la pluma de turbidez, esta es modificada en su forma dependiendo de las condiciones oceanográficas y meteorológicas que reinan en la cuenca. La aparición de esta pluma conlleva la entrada de importantes cantidades de sólidos en suspensión y nutrientes a la plataforma continental adyacente al estuario, lo que influye en las tasas de producción primaria registradas en la zona de mar abierto colindante al estuario.

Palabras clave: turbidez, color oceánico, estuarios.

ABSTRACT

The temporal variability of the turbidity river plume in the Guadalquivir river mouth have been analyzed trough MODIS images and in-situ data collected during several years. The results have shown a relationship between the increase in discharges and the appearance of the turbidity plume, especially during rainy seasons. Once is formed the turbid plume, the shape is modified depending on the oceanographic and meteorological conditions. The onset of the turbidity plume involves the entry of significant amounts of suspended solids and nutrients to the continental shelf adjacent to the estuary, which could influence primary production rates in the offshore area, hence the importance of studying these turbidity events.

Keywords: *turbidity, ocean color, estuaries.*

INTRODUCCIÓN

El estuario del Guadalquivir se encuentra situado en el suroeste de la Península Ibérica, y se caracteriza por ser un estuario mesomareal, con unas descargas desde la presa de Alcalá del Río, situada a 110 km aguas arriba de la desembocadura, que pueden superar los 3000 m^3/s en días muy lluviosos. Este aumento en las descargas coinciden con la aparición de una pluma de turbidez en la desembocadura del estuario de decenas de kilómetros cuadrados (Navarro et al, 2011), que tiene un impacto negativo en las actividades socio-económicas de la zona como son el turismo, la pesca, el marisqueo, etc.

Tradicionalmente, los estudios de estos eventos de turbidez se han realizado a partir de muestreos de campo, pero estos no cubren toda la variabilidad espacial y temporal que abarca la teledetección (Otero y Siegel, 2004; Hu et al, 2004; Nezlin y DiGiacomo, 2005; Nezlin et al., 2005; Valente y DaSilva, 2009). El uso conjunto de la teledetección con el análisis de los datos de campo, nos ha permitido establecer el patrón de variación espacio-temporal de la pluma de turbidez en la desembocadura, y su relación con procesos oceanográficos como son la marea, y procesos meteorológicos relacionados con la precipitación, que hacen aumentar las descargas desde la presa de Alcalá del Río.

El objetivo del estudio es analizar la respuesta de los eventos de turbidez a diferentes procesos meteorológicos y oceanográficos que la fuerzan, así como entender los patrones de variabilidad espacio-temporal. Para ello, se ha llevado a cabo un análisis de imágenes de satélite en conjunto con datos *in-situ* obtenidos en el estuario.

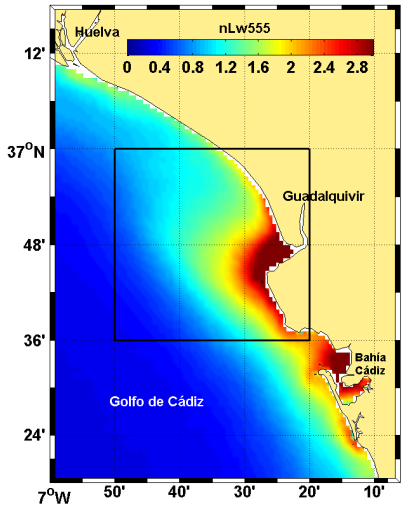


Figura 1: Climatología de nLw555 (en mW cm^{-2} mm^{-1} sr^{-1}) para la plataforma continental del Golfo de Cádiz. El cuadrado indica la Región de Interés (ROI) estudiada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Imágenes de satélite

La imágenes de satélite utilizadas en este estudio provienen del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y han sido descargas de la web de *http://oceancolor.gsfc.nasa.gov*. (MODIS-Aqua Reprocessing 2009.1). Las imágenes L2 han sido procesadas con SEADAS v6.2, y los flags incluidos han sido: ATMFAIL, LAND, HIGLINT, HILT, HISATZEN, CLDICE, HISOLZEN, LOWLW y CHLFAIL, cuya descripción detallada puede ser consultada en *http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/VALIDATION/flags.html*. La cobertura temporal del estudio ha abarcado desde 2003 hasta 2010. La resolución espacial de dichas imágenes ha sido de 1 km.

Para la estimación de la turbidez hemos utilizado la reflectancia (Rrs) en el canal de 555 nm (Valente y DaSilva, 2009). Para ello, hemos convertido la Rrs a radiancia normalizada (nLw) usando la irradiancia solar F_o de 186.09 mW cm^{-2} μm^{-1} para el canal de 555 nm de MODIS (Neckel y Labs, 1984; Hu et al, 2004). Para la cuantificación de la turbidez en la ROI, hemos catalogado como pixeles con turbidez aquellos que presentan un valor de nLw_{555} superior a 1.3 mWcm^{-2} μm^{-1} sr^{-1} (Otero y Siegel, 2004; Nezlin y DiGiacomo, 2005; Nezlin et al., 2005; Valente y DaSilva, 2009).

Datos in-situ

Además del procesamiento de las imágenes de MODIS, al análisis se han incorporado diferentes datos de campo como son los meteorológicos y oceanográficos. Con respecto a los primeros, se han descargado de la red de estaciones agroclimáticas los datos de precipitación diaria de la estación meteorológica de Sanlucar la Mayor, situada en el estuario del Guadalquivir y representativa de la precipitación en la zona. Además, se han analizado los datos de descarga diaria de agua dulce desde la presa de Alcalá del Río, situada aguas arriba de la desembocadura. Junto con estos datos, se han incorporado al análisis datos obtenidos por la boya oceanográfica fondeada en la desembocadura del estuario (Gutiérrez et al, 2009; Navarro et al, 2011). Esta boya estima entre otras variables, turbidez y fluorescencia de la clorofila a 1 metro de la superficie del mar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la distribución de la nLw_{555} para las climatologías mensuales entre 2003 y 2010.

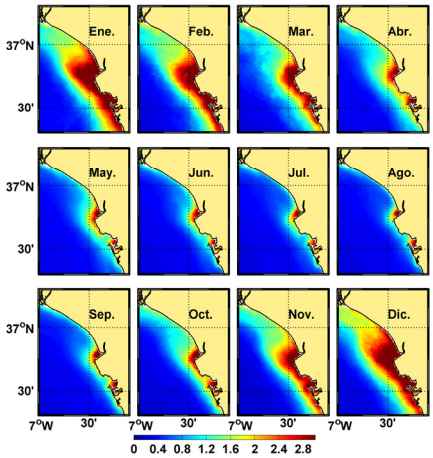


Figura 2: Climatología mensual de nLw555 (en mW cm^{-2} mm^{-1} sr^{-1}) desde 2003 hasta 2010.

Los valores más altos se encuentran en la desembocadura del Guadalquivir y bahía de Cádiz, sobre todo en la estación lluviosa (Figura 3). Los valores mínimos se producen durante la época estival, aunque siempre es en la desembocadura del Guadalquivir y en la bahía de Cádiz donde aparecen estos máximos climatológicos mensuales. La mayor precipitación está relacio-

nada con un aumento en la descarga de agua dulce de la presa de Alcalá del Río (Figura 3).

La variabilidad temporal de la turbidez en la desembocadura viene marcada por una señal anual, con máximos en invierno durante todos los años de estudio, coincidiendo con un aumento de la precipitación en el estuario, así como valores mínimos, tanto en el promedio como en cantidad de pixeles por encima del valor de 1.3 mW cm^{-2} mm^{-1} sr^{-1} para nLw555, coincidente con la estación seca y menores descargas desde la presa de Alcalá del Río (Figura 4).

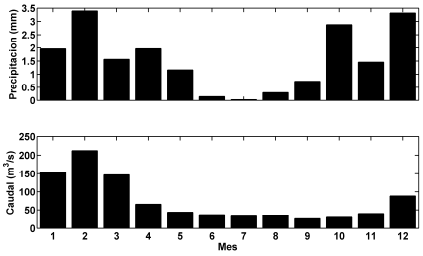


Figura 3: Climatología mensual para la precipitación (arriba, en mm) y caudal (abajo, en m^3/s) desde 2003 hasta 2010.

Por último, y gracias a los datos de la boya oceanografía fondeada en la desembocadura, se ha podido establecer la relación de las descargas de agua dulce desde la presa de Alcalá del Río con la aparición de la pluma de turbidez y su extensión geográfica. En la Figura 5 se observa como con ligeros aumentos de agua dulce desde la presa, aparece la pluma de turbidez en la desembocadura.

CONCLUSIONES

El estudio ha demostrado la potencialidad de la teledetección para estudiar los procesos relacionados con la variabilidad espacial y temporal de la pluma de turbidez en la desembocadura del Guadalquivir. Los resultados muestran la conexión que existe entre el aumento de la precipitación, y por consiguiente un incremento en las descargas desde la presa, y la aparición de la pluma de turbidez en la desembocadura. Una vez formada la pluma, esta es modificada en su forma dependiendo de las condiciones del viento y de marea. La aparición de esta pluma de turbidez conlleva la entrada de importantes cantidades de sólidos en suspensión y nutrientes a la plataforma continental adyacente al estuario (Prieto et al, 2009), lo que podría tener consecuencias antagónicas sobre la producción primaria, ya que la turbidez inhibe la producción primaria en la desembocadura debido a la disminución de radiación en la columna de agua, pero favorece el incremento en producción primaria debido al aumento de la entrada de nutrientes desde el estuario a la zona de plataforma continental.

BIBLIOGRAFÍA

GUTIERREZ, F.J., NAVARRO, G. and RUIZ, J, 2009. *Real time telemetry of hydrodynamic and hydrological variables: a high resolution network along the Guadalquivir River estuary*. Sea Technology, 50, 47-51.

HU, C., et al. 2004. *Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL.* Remote Sensing of Environment, 93(3), 423-441.

NAVARRO, G., et al., 2011. *Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: a challenge for real-time telemetry.* Ocean Dynamics, doi 10.177/s10236-011-0379-6.

NECKEL, H., and LABS, D., 1984. *The solar radiation between 3300 and 12.500 A*. Solar Physics, 90, 205-258.

NEZLIN, N.P. and DIGIACOMO, P.M., 2005. *Satellite ocean color observations of stormwater runoff plumes along the San Pedro Shelf (southern California) during 1997 to 2003.* Continental Shelf Research, 25, 1692-1711.

NEZLIN, N.P. et al., 2005. *Stormwater runoff plumes observed by SeaWiFS radiometer in the Southern California Bight.* Remote Sensing of Environment, 98, 494-510.

OTERO, M.P. and SIEGEL, D.A., 2004. *Spatial and temporal characteristics of sediment plumes and phytoplankton blooms in the Santa Barbara Channel.* Deep-Sea Research II, 51, 1129-1149.

PRIETO, L., et al. 2009. *Meteorological and oceanographic forcing on the pelagic ecosystem of the Gulf of Cadiz shelf (SW Iberian Peninsula).* Continental Shelf Research, 29, (17), 2122-2137.

VALENTE, AD. and DA SILVA, JC.B., 2009. *On the observability of the fortnightly cycle of the Tagus estuary turbid plume using MODIS ocean colour images.* Journal of Marine System, 75, 131-137.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a NASA por la disponibilidad de los datos de MODIS, así como a la Junta de Andalucía por los datos *in-situ*. Este estudio ha sido financiado por el proyecto de excelencia de la Junta de Andalucía P09-RNM-4853.

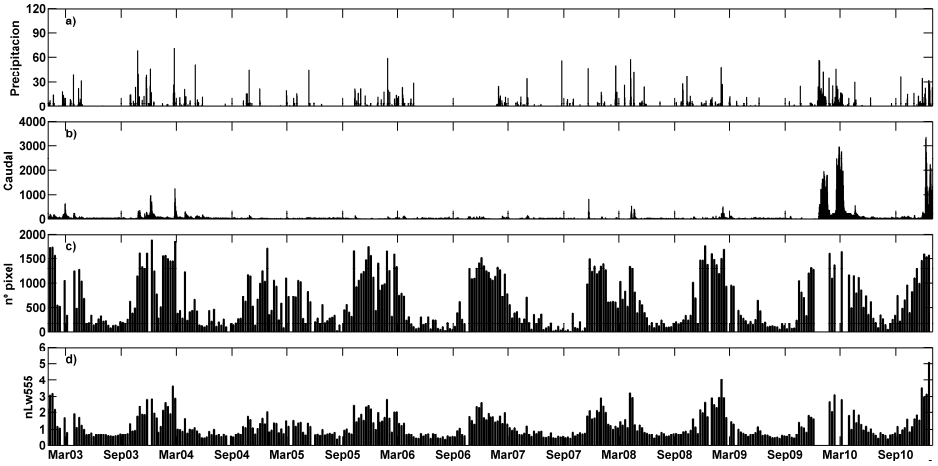


Figura 4. Serie temporal de: a) precipitación diaria en Sanlúcar la Mayor (en mm), b) descarga diaria desde la presa de Alcalá del Río (en m^3/s), c) número de pixeles por encima del valor de 1.3 mW cm^{-2} mm^{-1} sr^{-1} para la nLw_{555} y d) valor promedio de nLw_{555} (en mW cm^{-2} mm^{-1} sr^{-1}) para la ROI. c) y d) se corresponden con promedios de 8 días de las imágenes diarias y con un porcentaje de pixeles validos de al menos el 80%.

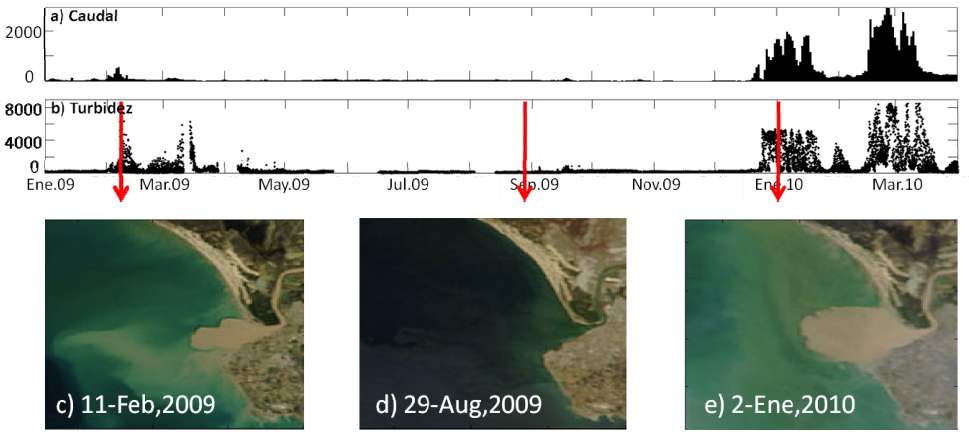


Figura 5. a) Caudal desembalsado desde la presa de Alcalá del Río (en m^3/s), b) serie temporal de la turbidez medida por la boya oceanográfica en la desembocadura (en FNU).c, d y e) Imágenes MODIS-RGB de la desembocadura para diferentes fechas (flecha roja).

Aplicación de algoritmos a partir de imágenes MERIS FR de índice de clorofila específicos para la costa gallega durante un ciclo de afloramiento

E. Spyrakos[1], L. González-Vilas[1], J. M. Torres Palenzuela[1] y E. D. Barton[2]

[1] Dep. de Física Aplicada. Fac. Universidad de Vigo. Lagoas Marcosende 36200, (Vigo, España). Correo electrónico: jesu@uvigo.es

[2] Instituto de Investigaciones Marinas, C/Eduardo Cabello, 6, E-36208, (Vigo, España).

RESUMEN

Este estudio utiliza algoritmos regionalmente específicos y características del Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) para obtener mapas de clorofila en el área costera de Galicia (aguas caso II), con una precisión mayor que la obtenida por otros algoritmos ya existentes. Los algoritmos basados en la utilización de redes neuronales y técnicas de "fuzzy clustering" fueron probados utilizando los datos in-situ y el algoritmo que mostró la mejor eficacia fue aplicado en una serie de seis imágenes MERIS (FR) durante un ciclo de afloramiento que se observo en el área en Julio 2008. Los cambios principales en la concentración y distribución de clorofila a fueron captados claramente en las imágenes. Los mapas confirmaron que la estructura espacial de la distribución de fitoplancton en el área de estudio puede ser compleja. Las corrientes oceánicas y los vientos de superficie afectaron la distribución de clorofila a en las rías Gallegas. Este estudio mostró que un algoritmo regionalmente específico para un sensor de color de océano con las características de MERIS, en combinación con datos in situ, puede ser de gran ayuda en la monitorización de clorofila a y la detección de episodios de floraciones masivas de algas en un área afectada por afloramiento costero como en las Rias Bajas Gallegas.

Palabras clave: MERIS, afloramiento, clorofila.

ABSTRACT

This study takes advantage of the neural networks (NNs) technology and the characteristics of Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) in order to deliver accurate, detailed chlorophyll a (chla) maps of optically complex (Case 2) coastal waters. Fuzzy c-means clustering techniques (FCM) were applied to the satellite derived data to determine different spectral classes. The algorithms were applied to six MERIS images delivered from the area at July 2008, in order to create chla maps. The transport of high phytoplankton biomass areas during the upwelling cycle was clearly captured in the images. Relatively high biomass "patches" were detected in detail inside the rias. There was a significant variation in the timing and the extent of the chla peak areas related to the winds and surface currents. A local-based algorithm for the chla retrieval from an ocean colour sensor with the characteristics of MERIS can be a great support in quantitative monitoring of chla and study of harmful algal events in Galician rias.

Keywords: *MERIS, coastal upwelling, chlorophyll a.*

INTRODUCCIÓN

Entre los productos derivados de los sensores del color del océano, la concentración de clorofila *a* es el más utilizado ya que permite estimar de una forma precisa la biomasa de fitoplancton, ya que este pigmento es común a casi todos los grupos taxonómicos. Además, las poblaciones de fitoplancton responden rápidamente a cambios ambientales provocando cambios en la concentración de clorofila.

Se han desarrollado varios algorítmicos empíricos, como el tradicional cociente entre las bandas azul y verde, así como diferentes modelos semi-analíticos para la estimación de la clorofila a partir de sensores de color. Sin embargo, con este tipo de modelos o algoritmos no se obtiene una estimación precisa para aguas costeras de tipo II, con altas concentraciones de otros componentes como detritus o sustancias amarillas, los cuales absorben la radiación en la banda azul (Torres *et al*., 2008).

Se ha demostrado que las técnicas basadas en redes neuronales (NN) son más apropiadas para

trabajar con datos complejos y no lineales, por lo que pueden ser muy útiles para estimar de una forma más precisa las concentraciones de los diferentes componentes del agua en aguas ópticamente complejas.

Las rías gallegas (noroeste de España, Figura 1) se caracterizan por su alta productividad y son muy importantes en la economía de la región, ya que en ellas se desarrolla un cultivo intensivo de mejillón en bateas y sustentan significativas pesquerías locales. La productividad se debe a los eventos periódicos de afloramiento de aguas profundas más frías y ricas en nutrientes que se producen principalmente entre mayo y septiembre, bajo condiciones de viento del noreste y gracias a la particular morfología y orientación de las rías (Torres et al. 2005).

En el presente trabajo se aplicó un algoritmo de clorofila basado en una red neuronal y desarrollado previamente para las aguas de las rías gallegas (González-Vilas *et al*., 2011) a un conjunto de 6 imágenes MERIS FR durante un ciclo de afloramiento. Los resultados se compararon con las medidas in situ y con otros algoritmos que se utilizan habitualmente para imágenes MERIS (CR2). Finalmente, se analizó la distribución temporal y espacial de los patrones de clorofila obtenidos a partir de las imágenes en relación con las condiciones meteorológicas y oceanográficas observadas en la zona.

FUENTES DE DATOS

MERIS es un sensor óptico a bordo del satélite ENVISAT que permite obtener imágenes con 15 bandas espectrales en un rango entre 412 nm y 900 nm y con un tiempo de revisita de 3 días. En este estudio se utilizaron 6 imágenes MERIS de alta resolución (300 m) adquiridas en el mes de Julio de 2008 (Tabla 1).

Además, se llevaron a cabo dos campañas de muestreo en la ría de Vigo los días 9 y 22 de Julio del 2008, coincidentes con sendas imágenes. En estas campañas se tomaron muestras de agua por triplicado en 12 estaciones, desde la superficie hasta tres metros de profundidad, para la determinación de pigmentos mediante cromatografía líquida de alta resolución (CLAE) y de las partículas en suspensión utilizando gravimetría. También se estableció la profundidad de la zona eufótica con un disco de Secchi.

Finalmente, se utilizaron los datos de velocidad y dirección del viento y de la corriente obtenidos con la boya oceanográfica Seawatch localizada frente a Cabo Silleiro (42 ° 7.8 'N, 9 ° 23.4' W; Figura 1). A partir de estos datos se estimó el índice diario de afloramiento utilizando el método de Bakun (1973).

Fecha de la Imagen	Hora de la adquisición (UTC)	Angulo cenital (º)
03-07-08	10:59	13.5
09-07-08	11:10	13.0
16-07-08	10:50	20.7
19-07-08	10:56	15.3
22-07-08	11:02	11.7
29-07-08	10:42	20.7

Tabla 1: Imágenes MERIS utilizadas, con indicación de la fecha, hora de la adquisición y ángulo cenital medio desde el oeste.

METODOLOGÍA

Las imágenes utilizadas son del nivel 2 de procesamiento, es decir, se distribuyen con los valores de reflectancia ya calculados para cada pixel. En un primer paso, se les aplicó la corrección radiométrica para corregir el efecto "smile" implementada en BEAM-4.6 y se llevó a cabo la corrección atmosférica mediante la aplicación del algoritmo basado en una red neuronal desarrollado por Doerffer and Schiller (2008).

El segundo paso fue la aplicación a los datos de reflectancia del clasificador no supervisado basado en la teoría de agrupación por lógica difusa, en concreto en la técnica FCM (Fuzzy c-Means Clustering), propuesto por Gonzalez *et al*. (2011). Según en este trabajo, las reflectancias de MERIS en la zona de Galicia se clasifican en tres categorías (#1, #2, #3), que son las que se observan en las imágenes de clasificación obtenidas (Figura 2).

El siguiente paso fue la aplicación a los datos de reflectancia de las tres redes neuronales (NNRB#1, NNRB#2, NNRB#3) desarrollas en el trabajo anterior (González et al, 2011) para la estimación de la clorofila. Las redes solo se aplicaron a los píxeles previamente clasificados dentro de la categoría #1, ya que la estimación utilizando los otros grupos no sería fiable, y nos permitió obtener mapas de clorofila (Figura 4).

Posteriormente, se compararon las concentraciones de clorofila obtenidas para las estaciones de muestreo con los valores correspondientes en los mapas de clorofila derivados de las redes neuronales, y se calculó el coeficiente de correla-

ción (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE) para evaluar las redes. La comparación con los datos in situ se extendió también al algoritmo desarrollado por Doerffer and Schiller (2008) para aguas de caso II (C2R).

Finalmente, los mapas derivados de la red con la que se obtuvieron los mejores resultados en la comparación con los datos in situ (mayor R^2 y menor RMSE) se utilizaron para analizar la distribución espacial y temporal de la clorofila en relación con los datos de vientos, corrientes e índices de afloramiento.

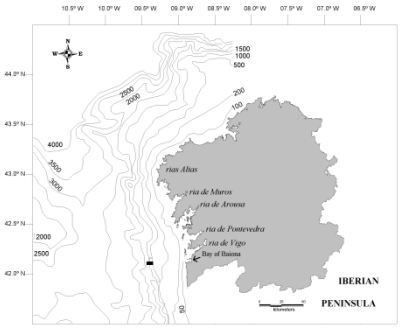


Figura 1: Costa gallega y batimetría de la zona. La boya Seawatch se muestra con un rectángulo negro.

RESULTADOS

Datos in-situ

La concentración de la clorofila en las muestras del agua no mostró una amplia variación. La concentración de la clorofila determinada por CLAE varió de 0.03 mg m^{-3} a 2.72 mg m^{-3} durante los dos muestreos.

Clasificador FCM

La categoría #1, en la cual se pueden aplicar los algoritmos de clorofila, es claramente predominante en la serie de las imágenes para la zona de estudio. Así, considerando las 6 imágenes, al menos el 72%, 71% y 65% de los pixeles corresponden a esta categoría en las rías de Vigo, Pontevedra y Arousa, respectivamente. La categoría #2 es predominante en la ría de Pontevedra y la ría de Arousa en la imagen del 29 de julio. La categoría #3 es la menos abundante en la mayoría de las imágenes, ya que supone menos de 3,25% de los píxeles en todos los casos. La Figura 2 muestra un ejemplo de imagen de clasificación, en la cual se observa como la categoría #1 es predominante en todas las Rías Baixas y el área adyacente

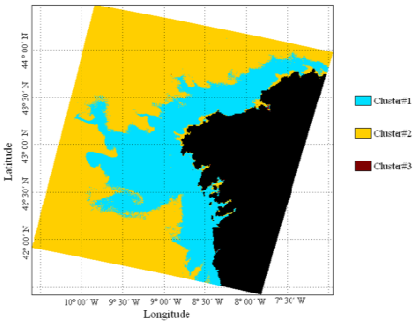


Figura 2: Clasificación de una imagen de MERIS (22-07-08). Se muestran las tres clases identificadas por el clasificador FCM.

Algoritmos para la estimación de clorofila

En general, las tres redes neuronales mejoraron significativamente los resultados obtenidos con el algoritmo C2R (R^2 = 0.04 y RMSE = 0.9 mg m^{-3}), mostrando mayores valores de R^2 y valores más bajos de RMSE. Los mejores resultados se obtuvieron para la red NNRB#3 (R^2 = 0.70 y RMSE = 0.46 mg m^{-3})

Ciclo de afloramiento

Se identificaron tres periodos meteorológicos y oceanográficos diferentes con una duración de entre nueve y once días (Figura 3).

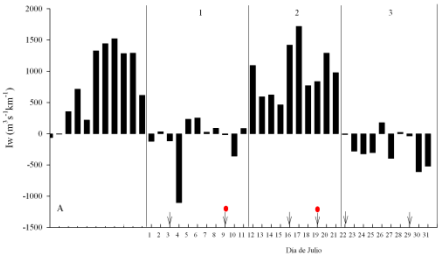


Figura 3: Índice diario de afloramiento, que representa el flujo de Ekman en la capa superficial. Las flechas indican los días que había imágenes de MERIS FR disponibles, los números los diferentes periodos identificados durante el mes estudiado y los circulos los días de muestreo.

Debido a la limitación de espacio, en este estudio se muestra tan solo uno de los mapas de clorofila obtenidos de la aplicación del algoritmo en la zona (Figura 4). El resto de las imágenes se

describen en relación con las condiciones meteorológicas y oceanográficas.

A principios de Julio (periodo 1), los vientos y las corrientes superficiales restringen la concentraciones altas de clorofila en el interior de las rías. Durante el período 2, las imágenes MERIS mostraron la primera respuesta de la distribución de clorofila a los fuertes vientos favorables al afloramiento que soplaban en la zona. Con el desarrollo de fuertes corrientes, la clorofila aumenta rápidamente, y después de un período de seis días de afloramiento continuo, se observaron concentraciones de clorofila superiores a 1 mg m^{-3} en toda el área a través de los datos de MERIS. El periodo 3 comienza con la aparición de un evento de elevada biomasa de algas (Figura 4) que coincide con el final de un afloramiento fuerte. Los vientos débiles hacia el norte al inicio de este período permiten que el agua con alta concentración de clorofila se transfiera hacia las rías. El hundimiento continuo que caracterizó al período 3 tuvo como resultado la descomposición de la zona de alta concentración de clorofila y el hundimiento de las aguas superficiales en las rías lo cual coincide con la disminución de la clorofila superficial observada en la última imagen de MERIS.

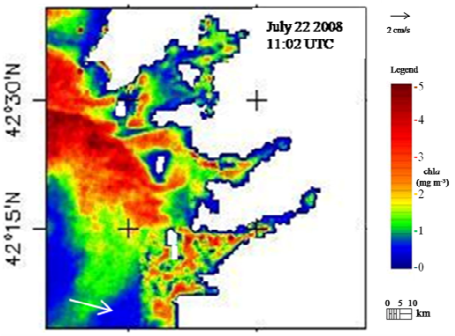


Figura 4: Mapa de clorofila durante el ciclo de afloramiento de julio de 2008 en el área de estudio. La tierra y las nubes estaban enmascarados y aparecen en color blanco.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que las imágenes MERIS de alta resolución son una herramienta muy potente para el análisis detallado de la distribución de la clorofila en las rías de Galicia y en la plataforma adyacente durante un ciclo de afloramiento.

La aplicación de un algoritmo especialmente desarrollado para el área de estudio nos permite obtener mapas precisos de clorofila con una resolución nunca antes lograda para esta zona. Los mapas muestran que la estructura espacial de la distribución del fitoplancton en el área de estudio puede ser compleja. Algunas de estas áreas de alta concentración de clorofila que se pueden identificar en las imágenes de satélite podrían incluso no ser detectadas por los programas de monitorización in situ.

BIBLIOGRAFÍA

BAKUN, A., 1973: *Coastal upwelling indeces, west coast of North America*. In: NOAA Tech. Rep. (p.103). Seattle, US Dept. Commerce.

DOERFFER, R. and SCHILLER, H. 2008. *MERIS Regional Coastal and Lake Case 2 Water Project-Atmospheric Correction ALTBD.* GKSS Research Center 21502, Geesthacht Version 1.0, 18 May 2008.

GONZÁLEZ VILAS, L., SPYRAKOS, E. and TORRES PALENZUELA, J. M., 2011. *Neural network estimation of chlorophyll a from MERIS full resolution data for the coastal waters of Galician rias (NW Spain)*. Remote Sensing of Environment, 115, 524-535.

TORRES, J., LAGO, R., MARTÍNEZ, G. y GONZÁLEZ, L., 2005. *Utilización de imágenes Meris en la detección de blooms de Pseudo-nitzschia spp. en costas de Galicia*. Revista de Teledetección, 24, 73-77.

TORRES, J., MOSQUERA, Á. and GONZÁLEZ, L., 2008: *Ocean Colour measured by remote sensing and applications*. In: Ocean Remote Sensing: Recent Techniques and Applications: 9-29. Kerala, India.

AGRADECIMIENTOS

Las imágenes MERIS utilizadas en este trabajo han sido cedidas por la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del proyecto AO623. Las campañas de barco y la investigación se desarrollaron en el marco del proyecto Marie Curie ECOSUMMER.

Detección de vertidos en aguas costeras de Galicia con LIF/LIDAR para embarcación

Nina V. Yarovenko, Mª del Carmen Martín, L. Rodríguez Domínguez y Jesús M. Torres Palenzuela

Dep. de Física Aplicada. Fac. de Ciencias del Mar. Universidad de Vigo. Lagoas Marcosende 36310, (Vigo, España). Correo electrónico: yarovka@uvigo.es, jesu@uvigo.es

RESUMEN

La contaminación de petróleo es uno de los problemas más importantes con los que se enfrentan los sistemas de prevención de catástrofes en el medio ambiente marino. Los datos de contaminación detectados en tiempo real son una herramienta eficaz para la prevención temprana de accidentes ecológicos posibles y una manera conveniente de vigilancia de la calidad del agua. En este trabajo se ha utilizado la tecnología basada en el método de fluorescencia inducida por láser LIF/LIDAR consistente en la detección y análisis de los espectros de fluorescencia inducida por la iluminación de láser ultravioleta. Los resultados conseguidos e implementados en la web-SIG desarrollada, pueden ser base para el sistema de clasificación de los contaminantes marinos de hidrocarburos y sus derivados en el agua de mar.

Palabras clave: contaminación, LIF, LIDAR, SIG.

ABSTRACT

Oil pollution is one of the most important problems that facing the disaster prevention systems in the marine environment. Pollution data detected in a real-time are is an effective tool for early prevention of potential ecological accidents and a convenient way of water quality monitoring. In this work was used a technology LIF/LIDAR based on the detection and analysis of fluorescence spectra induced in the target object by ultraviolet laser light. The results achieved and implemented in the web-based GIS can be developed for the classification system of marine pollutants of hydrocarbons and their derivatives in sea water.

Keywords: *Contamination, LIF,LIDAR, GIS.*

INTRODUCCIÓN

Cada año, se producen alrededor de 20 accidentes, con miles de toneladas del petróleo extendiéndose en el mar. De acuerdo con la estimación de empresas de limpieza de derrames de petróleo, la recolección de 1 kg de petróleo en el mar abierto cuesta aproximadamente 1 euro. En las aguas costeras, el coste es 10 veces mayor y cuando el petróleo llega a la costa los gastos ascienden hasta 100 euros por kg. Por lo tanto, la detección temprana de las manchas de hidrocarburos no sólo protege la naturaleza, sino también reduce los costes necesarios para paliar los daños ocasionados por el accidente.

Existen muchos métodos de teledetección y delimitación de las manchas de vertidos de petróleo y sus derivados en la superficie del agua. La interacción de los vertidos de hidrocarburo marinos con la radiación electromagnética depende de la longitud de onda de estudio. Esto hace posible el uso de diferentes tipos de sensores, desde la utilización de radares y radiómetros de microondas hasta cámaras multiespectrales en el rango de ultravioleta, visible o infrarrojo.

En este campo, el sensor de fluorescencia láser tiene la capacidad única para identificar los hidrocarburos en superficie o bajo la misma. La principal ventaja de la detección por fluorescencia es la posibilidad de obtención de la información en el tiempo real, su alta sensibilidad, su bajo coste, y todo ello sin necesidad de contacto directo con la muestra. Cuando se detecta una mancha de hidrocarburo mediante un laser UV, la radiación electromagnética incidente se absorbe y una porción de su energía es remitida como fluorescencia en longitudes de onda mayores a la de excitación. La señal de florescencia espectral

es característica de cada tipo de hidrocarburo, y por lo tanto, es posible discriminar entre ciertas clases de contaminación. El análisis de los espectros de fluorescencia para los diversos productos de hidrocarburos muestra una clara diferenciación entre las señales de emisión.

En este trabajo fueron realizados distintos experimentos en las aguas costeras de Galicia (España) con un prototipo de LIF/LIDAR.

Descripción del prototipo LIF/LiDAR

FLS®-SUV (Figura 1, izquierda) es un sistema LiDAR (Light Detection and Ranging), compacto e hiperespectral, basado en el método LIF (Figura 1, derecha). El dispositivo a bordo de un buque o plataforma fija es utilizado para la detección de vertidos de hidrocarburos y la contaminación orgánica. Es capaz de medir la concentración de petróleo en el agua con un gran rango de sensibilidad.

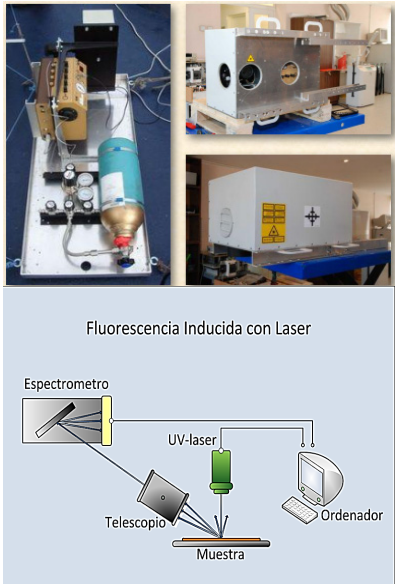


Figura 1: *Imagen superior*: prototipo de LiDAR. *Im. inferior*: Tecnología LIF para la detección de los vertidos en agua marina.

El LiDAR se basa en láser ultravioleta (Excimer) y en un detector hiperespectral. Tras la excitación por laser se produce la fluorescencia y el resultado se recoge mediante un telescopio y se registra por el detector. La lectura del espectro por cada pulso de láser permite un análisis detallado de la signatura de fluorescencia utilizando el reconocimiento de determinados patrones espectrales de los productos del petróleo, sus derivados y otros productos químicos en el agua.

PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo de todas las experiencias ha sido la detección y localización espacial de la contaminación en las zonas costeras de la ría de Vigo. El seguimiento se realizó durante unos 5 meses. De marzo a septiembre de 2010 se realizaron cinco experimentos en el campo con el prototipo LIF®-LIDAR en la Ría de Vigo. Los experimentos se realizaron en colaboración con el Servicio de Guardacostas de Galicia. Se utilizaron contaminantes artificiales mediante colorantes inocuos Rodamina y Fluoresceína, en colaboración con el CEDRE (Centro de Documentación, Investigación y Experimentación en la Contaminación Accidental del agua, Francia) e INTECMAR (Centro para el control de la calidad del medio marino) de la Xunta de Galicia.

Durante las operaciones el LIDAR se instaló a bordo de distintos buques guardacostas. Las especificaciones del LIDAR se muestran en la Tabla 1.

Operacionales	
Distancia de detección	menos de 25 m
Condiciones de operación	Día y Noche
Modo de operación	Continuo, en marcha
Sensibilidad para los productos de petróleo: Min. concentración en agua Min. espesor de petróleo en agua	 1 ppm 1 µm
Repetición de los pulsos	Más de 90 Hz
Técnicas	
Láser Excimer	308 nm
Detector hyperspectral	256/512 channels
PC interface	LAN
General	
Consumo	200 W
Dimensiones	70 x 50 x 40 cm
Peso	52 kg

Tabla 1: Características del prototipo de LiDAR.

Las rutas llevadas a cabo variaron en cada experimento, y en su totalidad han cubierto una amplia área de toda la Ría de Vigo. Todas las salidas se realizaron en horas de la mañana, con

condiciones climáticas adecuadas para la navegación. La velocidad máxima recogida por el buque durante las mediciones fue de 35 nudos náuticas o 64,82 km/h. Los colorantes fueron disueltos en agua y formaron manchas con un diámetro de 5-10 metros aproximadamente. Se realizaron mediciones adicionales en el puerto de Vigo en la zona de astilleros.

RESULTADOS

El objetivo principal alcanzado en el estudio fue la obtención y demostración de los resultados en tiempo real. El operador fue capaz de detectar si el barco atravesaba la contaminación sin ningún tipo de análisis preliminar. Por otro lado, después de cada experimento los datos fueron procesados de nuevo en el laboratorio de Teledetección y GIS del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo.

Los contaminantes artificiales rodamina y fluoresceína se han detectado con precisión, incluso después de dos horas de ser vertidos, aún cuando los colorantes no eran visibles desde superficie.

Durante una de las operaciones se hizo una prueba del fondo con un material orgánico (algodón). La medida fue interrumpida debido a la fuerte corriente obteniendo como resultado preliminar unos 4 metros de profundidad.

La Figura 2 muestra una serie de espectros típicos del agua, de rodamina y fluoresceína y también de la contaminación real registrada por LIDAR en la Ría de Vigo.

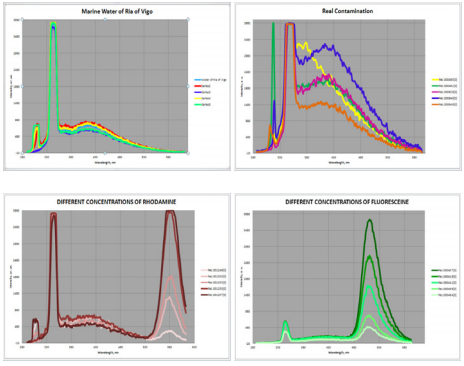


Figura 2: Los espectros obtenidos en los experimentos. *De arriba abajo y de izquierda a derecha*: **a)** Agua del Mar en Ria de Vigo; **b)** Contaminación real descubierto en el Puerto de Vigo; **c)** Rodamina; **d)** Fluoresceína.

El conjunto de los datos en la Figura 2 muestran claramente la variación de los picos entre los diferentes materiales detectados en las aguas de la ría de Vigo. Con la misma longitud de onda de excitación del láser (308 nm), la longitud de onda de la señal de emisión obtenida para Rodamina fue de cerca de 580 nm; para la Fluoresceína, cerca de 510 nm, y para contaminación real detectada en el puerto en torno a 370 nm.

A la longitud de onda de la excitación es de 308 nm (láser XeCl) según las características técnicas de LiDAR la señal de Raman de una masa de agua se puede observar en 344nm (ver Figura 3).

Esta señal es útil para la calibración del espectrómetro del LiDAR en funcionamiento, pero también se utiliza para la estimación del espesor del contaminante debido a que la fuerte absorción del hidrocarburo en la superficie reduce la señal Raman del agua proporcionalmente al espesor de la mancha (Figura 3, a, b).

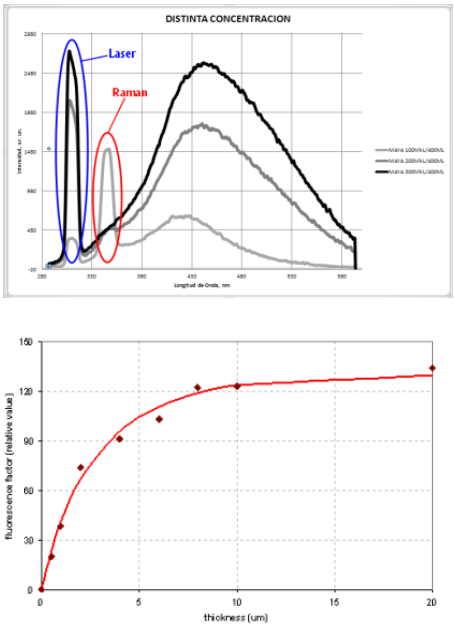


Figura 3: *De arriba abajo:* **a)** Señal espectral obtenida por el LIF/LIDAR en el laboratorio sobre una muestra de hidrocarburo con distinta concentración; **b)** Relación entre el factor de fluorescencia y el grosor de la muestra de hidrocarburo medido en laboratorio.

En la Figura 3b se muestra la relación logarítmica entre el factor de fluorescencia dado por el ratio entre la máxima señal de fluorescencia y la señal de Raman, frente a el espesor de la muestra de contaminante.

VISUALIZACIÓN

Para la demostración de los resultados fue diseñado un web-interface basado en las aplicaciones de código abierto usando un motor de Google Earth, java script Open Layers y Servidor de Mapas MapServer 5. El sistema tiene por objeto visualizar en tiempo real la posición de la ruta de muestreo, así como la presencia o ausencia de vertidos y su intensidad. Por último se trabaja actualmente en un clasificador basado en un algoritmo de mínima distancia a la media (Minimum Distance to Mean) para la clasificación del tipo del vertido detectado.

La Figura 4 muestra una implementación de los resultados de los experimentos en el interface web-SIG. Los círculos rojos y verdes de diferentes tamaños indican los puntos de contaminación con la concentración variable.

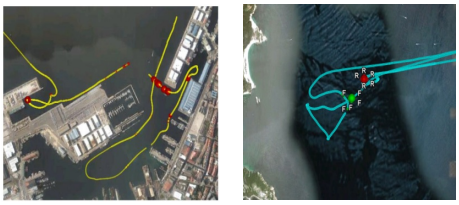


Figura 4: Distribución de la contaminación a lo largo de la ruta del barco. *De izquierda a derecha*: **a)** en el Puerto de Vigo; **b)** en la Ría con colorantes artificiales.

CONCLUSIONES

El presente estudio llevado a cabo por el Laboratorio de Teledetección y SIG de la Universidad de Vigo se enmarca dentro del proyecto DEOSOM (AMPERA), en colaboración con LDI (Laser Diagnostic Instruments, Tallin – Estonia), INTECMAR y CETMAR estos últimos dentro del proyecto DRIFTER (AMPERA) y con la cooperación de los Guarda Costas de Galicia .
Los resultados obtenidos demuestran que la utilización del LiDAR basado en la fluorescencia inducida por láser a bordo de embarcaciones es una herramienta de gran utilidad para la detección de vertidos de hidrocarburos tanto en superficie marina como bajo la misma. Por otro lado y debido a la respuesta espectral de la señal de fluorescencia característica de cada tipo de vertido de hidrocarburo, la utilización de este tipo de técnicas LIF/LIDAR nos permite identificar y clasificar los hidrocarburos y sustancias de origen orgánico con propiedades fluorescentes. Por último la utilización de la dispersión Raman en la columna de agua puede ser utilizada como criterio de la estimación del espesor de la película del petróleo como se observa en la Figura 4.

BIBLIOGRAFÍA

BABICHENKO, S., 2008. *Laser Remote Sensing of the European Marine Environment: LIF Technology and Applications*. Remote Sensing of the European Seas.

KARPICZ, R., DEMENTJEV, A., KUPRIONIS, Z., PAKALNIS, S., WESTPHAL, R., REUTER, R., GULBINAS, V., 2006. *Oil spill fluorosensing lidar for inclined onshore or shipboard operation.*Applied Optics, Vol. 45, No. 25.

SAMBERG, A., BABICHENKO, S., LISIN.A., 2005. *A production of oil pollution maps in the seawater by the 3-D imaging scanning FLS-AM LIDAR*. ASPRS Annual Conference "Geospatial Goes Global: From your Neighborhood to the Whole Planet", Baltimore, Maryland, March 7-11.

FADEEV, V. y CHUBAROV, V., 1981. *Quantitative determination of petroleum products in water by laser spectroscopy.* Sov.Phys. Dokl., 26 (11).

BROWN, C., FINGAS, M.,1997. *Review of Oil Spill Remote Sensing.* Spill Science & Technology Bulletin, 4.4, 199-208.

GRÜNER, K., REUTER. R., SMID, H., 1991. A *New Sensor System for Airborne Measurements of Maritime Pollution and of Hydrographic Parameters*. Geojournal, 24.1, 103-117.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de laboratorio LDI (Tallin, Estonia) por colaboración y facilitación del prototipo FLS®-Lidar dentro del proyecto DEOSOM. Un agradecimiento especial a Guarda Costas de Galicia por el apoyo logístico, así como a la inestimable ayuda de CETMAR e INTECMAR en el desarrollo de los experimentos.

ÍNDICE DE AUTORES

Abajo, A.....125, 261, 457, 493
Aceñolaza, P.G.....141
Afán, I.....465
Aguado, I.....213
Aguirre, R.....457
Aibar, J.....9
Alarcón, J.J.....33
Albizua, L.....21, 269, 277, 305, 481
Allende, C.....273, 461
Almonacid, J.....129
Alonso, A.....137, 153
Alonso-Benito, A.....69, 197, 237
Álvarez, G.....601
Álvarez, M.A.....125, 217, 313
Álvarez-Mozos, J.....21, 177
Álvarez-Taboada, M.F.....49
Amezketa, E.....277, 305
Ameztoy, I.....329
Amorós, J.....417
Amorós-López, J.....13, 65
Anadón, S.....345
Anaya, J.A.....141
Anderson, M.C.....321, 357, 441
Antes, M.E.....561
Aragonés, D.....329, 465
Arbelo, M.....17, 69, 73, 197, 225, 237
Arellano, I.....5
Argüelles, R.J.....181
Armenteras, D.....229, 233
Arquero, A.....469, 493, 529
Arroyo, L.A.....17, 197
Artigao, M.M.....433
Azqueta, D.....213
Azuela, J.A.....281, 289
Bachmann, M.....285
Balcells, D.....77
Barberà, M.J.....449
Barinagarrementeria, I.....269, 277, 305
Barrachina, M.....1
Barreto, A.....73, 237
Barrios, W.....353
Barton, E.D.....613
Barón, A.....385
Bastarrika, A.....213
Baños, I.....33
Bea, M.....385

Bello-García, A.....157
Bellot, J.....389
Belmonte, M.....5, 477
Bennouna, Y.S.....437, 453
Berjón, A.....437, 453
Berkane, Y.....277, 305
Bernardino, T.....489
Blanco, P.D.....141
Boira, H.....109
Bosch-Lluis, X.....41
Bota, G.....29
Brotons, L.....29
Burgos, M.A.....501
Bustamante, J.....329, 417, 465
Buzzi, J.....285, 401
Caballero, I.....577, 609
Cabello, A.....81, 581
Cabo, C.....201, 217
Cachorro, V.E.....437, 453
Calado, T.....209
Calera, A.....5, 65, 477, 505
Calle, A.....205, 473, 557
Camacho, A.....325
Campos, I.....5, 477, 505
Camps, A.....41, 393
Camps-Valls, G.....13, 65
Canepa, M.....281, 289
Cantón, M.....605
Cardozo, C.R.....209
Caride, C.....141
Carpintero, I.R.....189, 293, 425
Carrara, A.....373
Carrère, V.....285, 401
Casanova, J.L.....205, 473, 557
Caselles, E.....297, 301
Caselles, V.....61, 297, 301, 325, 449, 501
Castedo-Dorado, F.....85
Casterad, M.A.....9, 277, 305, 513
Castillejo-González, I.L.....89, 537
Castillo-López, E.....585
Castro-Fernández, M.....173
Chao-Rodríguez, Y.....309
Checa, M.J.....113
Chiesi, M.....97
Chuvieco, E.....209, 213, 221, 257
Cipollini, P.....593

Ciriza, R.....481
Colditz, R.R.....141
Colina, A.....313
Coll, C.....501
Colubi, A.....201
Corti, D.....209
Cotos, J.M.....601
Covián, E.....165
Crespo, J.....337, 345
Cristiano, P.M.....485
Cristóbal, J.....1, 317, 321, 441, 541
Cruz-López , I.....141, 249
Cuenca, J.....361, 377
Curos-Mata, S.....597
Cáceres, F.....189, 293, 425
De Abelleyra, D.....233
De Frutos, A.M.....437, 453
De Jesús, S.C.....141, 253
De La Riva, J.....213
De La Vega, R.....405
De Miguel, D.....489
De Miguel, E.....349, 489, 589
Del Valle, H.F.....141
Delgado, S.....493
Di Bella, C.M.....0, 233, 485
Domenech, E.....169, 549
Domingo, C.....317
Domingo, F.....357
Dominguez-Durán, M.A.....549
Domínguez, J.....25
Domínguez, J.A.....0, 309, 365, 581, 585
Donamayor, C.....349, 589
Doña, C.....325
Díaz-Delgado, R.....321, 329, 417, 465
Echavarría, M.P.....373
Echeverría, M.....213
El Anjoumi, A.....309
Erena, M.....33, 37
Estornell, J.....149
Estrela, M.J.....449
Eugenio, F.....333, 525
Faba-Fernández, M.....85
Fernández, J.E.....469
Fernández, L.....385
Fernández-Alonso, M.....341, 345, 421
Fernández-Bustamante, C.....313

Fernández-De Sevilla, T.....145
Fernández-Iglesias, E.....341, 345, 421, 429
Fernández-Iglesias, J.C.....337
Fernández-Manso, A.....245
Fernández-Martínez, M.....313
Fernández-Menéndez, S.....217
Fernández-Renau, A.....349, 549, 589
Fernández-Sarría, A.....93, 129, 149
Fernández-Zamudio, R.....465
Ferri, A.....325
Finat, A.....313
Fischer, A.....141
Franch, B.....361, 377, 445, 497
Franco, C.....229
Frieyro, J.E.....81, 105, 121, 581
Fuentes-García, C.....153
Fuertes, D.....437, 453
Fédèle, E.....497
Gajardo, J.....221, 373
Gallardo, M.....373
García, M.....221
García, R.....405
García-Cortés, S.....157, 165
García-Ferrer, A.....89, 117, 537
García-Lázaro, J.R.....225
García-López, S.....281, 289
García-Manteca, P.....201
García-Meléndez, E.....285, 381, 401
García-Murillo, P.....465
García-Santos, V.....501
Garrido, J.....65, 505
Gavilán, P.....25, 357
Gil, J.....521
Gil-Yepes, J.L.....37, 93, 129
Gilabert, M.A.....97, 101, 133
Gimeno, C.....373
Giménez-Azcarate, F.....189, 293, 425
Giner, C.....101
Giralt, D.....29
Godino, M.....129
Goitia, C.....353
Gomez-Enri, J.....577, 593
Gommenginger, C.....593
González de Audícana, M.....177, 481
González, C.....385
González, O.....541

González-Alonso, F.....229, 233, 253, 261
González-Calvo, A.....69, 73, 197, 237
González-Cascón, R.....373
González-Catón, R.....437, 453
González-Dugo, M.P.....25, 357
González-Fernández, A.B.....49
González-Jarraiz, A.....89
González-Matesanz, J.....65
González-Moradas, M.R.....241
González-Pumariega, P.....181
González-Vilas, L.....597, 613
Gonzalo-Martín, C.....397, 493, 509
Granado, L.....81, 189, 293, 425, 581
Guillamón, C.....265
Guillén, M.....513
Gutierrez-Barceló, A.D.....585
Gutiérrez-de la Cámara, O.....349, 589
Gómez, I.....373
Gómez, R.....117
Gómez-Calero, J.A.....45
Gómez-Chova, L.....13, 65
Gómez-Sánchez, J.A.....349, 589
Hantson, S.....209
Hardtke, L.A.....141
Hassan, M.....429
Hayas, A.....81, 105, 121, 581
Hermosilla, T.....37, 93, 109, 129, 149
Hernán, C.....245
Hernández-Clemente, R.....81, 105, 117, 121
Hernández-Leal, P.....69, 73, 197, 237
Hidalgo, V.....361, 377, 445
Huesca, M.....253
Hurtado, P.....265
Ibarra, P.....213
Ibañez, J.C.....269
Iglesias, L.....405
Intrigliolo, D.S.....37
Isla, R.....9
Izquierdo-Verdiguier, E.....13
Jiménez, M.....349, 589
Jiménez, M.A.....37
Jiménez-Alfaro, B.....125
Jiménez-Muñoz, J.C.....361, 377, 417, 445
Jorge, J.....161, 517
Juarez, L.....29
Julien, Y.....361, 377, 445

Jurado, S.....213
Kustas, W.P.....321, 357
Labrador-García, M.....17
Larrañaga, A.....21
Latron, J.....317
Legido-Soto, J.L.....573
Lerner, M.....113
Lillo-Saavedra, M.....141, 397, 509
Llorens, P.....317
Lozano, F.J.....521
Lozano-Arango, J.G.....365
Luaces, S.....185
López-García, J.....369
López-Pérez, E.....109
López-Saldaña, G.....141, 249
López-Urrea, R.....61
M. Infante, J.....321
Maas, S.....25
Malpica, J.A.....533, 553
Manzo-Delgado, L.....249
Marcello, J.....333, 525
Marcos, J.L.....437, 453
Mari, N.....141, 233
Martín, L.....437, 453
Martín, M.C.....617
Martín, M.P.....373
Martín-Alfageme, S.....381
Martín-Fernández, S.....213
Martín-Serrano, A.....381
Martínez, B.....97, 101, 133
Martínez, E.....469, 493, 529
Martínez, L.....149
Martínez, S.....213
Martínez-Beltrán, C.....5, 477
Martínez-Casasnovas, J.A.....57, 77
Martínez-De Agirre, A.....533
Martínez-Martínez, F.J.....605
Martínez-Martínez, J.A.....433
Martínez-Pérez, J.A.....65, 185
Martínez-Vega, F.J.....213, 373
Maselli, F.....97
Masó, J.....169
Mattar, C.....361, 377, 445
Maturano, M.....9
Mauro, F.....129
Medina, A.....525

Méndez, E.....81, 189, 293, 425, 581
Mendiguren, G.....373
Menéndez, R.....217, 345, 429
Mera, D.....601
Merino-De Miguel, S.....229, 233, 253
Mesas-Carrascosa, F.J.....89, 537
Millán, R.....409
Mínguez, A.....381
Miralles, J.J.....433
Moclán , C.....521
Molina, I.....469
Molina, J.L.....281, 289
Molina, S.....65
Monerris, A.....393
Montesinos, S.....53, 385, 413
Montorio, R.....513
Montoya, G.....81, 189, 293, 425, 581
Moral, F.....113
Morales, M.....229
Moreira, J.M.....189, 293, 425
Morelli, F.....141, 253
Moreno, A.....97, 133
Moreno, J.....65
Moreno-Ruiz, J.A.....225
Moro, V.....345
Moré, G.....169, 541
Moutahir, H.....389
Muñoz, F.....349, 589
Müller, A.....401
Navarro, B.....605
Navarro, G.....577, 609
Navarro-Cerrillo, R.M.....81, 105, 117, 121
Niclòs, R.....449
Nieto, H.....373
Nieto, J.M.....401
Núñez, L.....225
Obeso, J.R.....125
Odi, M.....477
Oliva, P.....209, 257
Oltra-Carrió, R.....361, 377, 445, 545
Opazo, S.....141
Ordóñez, C.....157, 165
Ortiz de Galisteo, J.P.....437, 453
Ortiz-Serrano, P.....357
Pacheco-Labrador, J.....373
Padilla, F.L.M.....25, 357

Padilla-Parellada, M.....209
Park, H.....41
Pecci, J.....265
Peces, J.J.....65, 169, 185, 549
Pendás, E.....457
Pesquer, L.....65, 169, 541
Pettinari, L.....213
Peón, J.J.....241, 261, 457
Peón-Fernández, J.F.....173
Piedra, J.A.....605
Piles, M.....393
Pino, I.....81, 189, 293, 425, 581
Pitarch, C.....297, 301
Pizarro, A.....489
Piñeiro, M.....573
Pla, M.....29
Plaza, N.....65, 505, 549
Pons, X.....65, 169, 193, 541, 565
Porcuna, A.....65
Portero, C.....277, 305
Posse, G.....485
Prado, E.....349, 589
Prieto, R.....189, 293, 425
Pérez, I.....349, 589
Pérez, M.....29
Pérez-Cabello, F.....373, 513
Pérez-Cutillas, P.....33, 37
Quintana-Sotomayor, C.....397
Quintano, C.....245
Quílez, D.....9
Ramos, M.C.....57, 77
Ramos-Perez, I.....41
Recio, J.A.....37, 129, 149
Recondo, C.....125, 213, 241, 261, 457, 493
Rey-Moure, R.Y.....173
Reyes, A.....161
Riaza, A.....285, 401
Riaño, D.....221, 373
Rico, C.....409
Rico, E.....309
Rincones, M.....405
Robles, C.....489
Rodrigues-Mimbrero, M.....213
Rodríguez, B.....553
Rodríguez, J.....409
Rodríguez, R.....349, 589

Rodríguez, V.....489
Rodríguez-Álvarez, N.....41
Rodríguez-Domínguez, L.....617
Rodríguez-Esparragón, D.....525
Rodríguez-González, J.....45
Rodríguez-Pérez, D.....309
Rodríguez-Pérez, J.R.....49, 85
Rodríguez-Quevedo, A.....261
Rodríguez-Rastrero, M.....409
Romero, M.....53
Román, M.V.....213
Rubio, E.....61
Ruiz, A.....349, 589
Ruiz, J.....609
Ruiz, L.A.....37, 93, 109, 129
Saavedra, J.P.....281, 289
Sajdak, M.....149
Salas, J.....213, 373
Salgado, V.....229, 233, 261
Salvador, P.....205, 473, 557
Santín, C.....217
Sarmiento, A.....401
Schmid, T.....409
Serafini, M.C.....561
Serra, P.....565
Setzer, A.....253
Sierra, M.J.....409
Silio-Calzada, A.....585
Simón, M.....549
Sione, W.F.....141
Sirvent, C.....413
Sobrino, J.A.....361, 377, 417, 445, 497, 545
Sola, I.....177
Solaní, A.....57
Spyrakos, E.....573, 613
Suárez, J.A.....181
Suárez, L.....105
Suárez-Quirós, J.....153
Sánchez, B.....113
Sánchez, C.....133
Sánchez, D.....33
Sánchez, J.....529
Sánchez, J.M.....61, 325
Sánchez-De La Orden, M.....89, 117, 537
Sòria, G.....361, 377, 417, 445, 545
Tarruella, R.....161

Tejeiro, J.A.....65, 185, 549
Toledano, C.....437, 453
Topham, R.....333
Torno, S.....273
Torres, B.....437, 453
Torres, J.L.....177
Torres, W.....569
Torres-Palenzuela, J.M.....173, 573, 597, 613, 617
Touhami, I.....389
Tulla, A.F.....1
Urdánoz, V.....277, 305
Valderrábano-Luque, J.....421
Valencia, E.....41
Valentín, F.....9
Valenzuela, R.....489
Vales, J.J.....189, 293, 425
Valiente, J.A.....449
Vall-llossera, M.....393
Valor, E.....501
Varela, M.R.....165
Velázquez-Martí, B.....149
Vermote, E.....497
Vicente, M.....265
Vidal, A.....181
Vignudelli, S.....593
Vilar, L.....373
Villa, G.....65, 505, 549
Villanueva , S.....561
Villares, P.....593
Villarroya, S.....601
Viñals, M.J.....365
Vázquez, D.....345, 429
Yarovenko, N.V.....597, 617
Yepéz, S.....353
Zabala, A.....193
Zamboni, P.....141
Zapico, E.....213, 457
Zapico, H.....137
Zarco-Tejada, P.J.....45, 105

TELEDETECCIÓN

Bosques y cambio climático

Este libro contiene las comunicaciones presentadas en el XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET), celebrado en Mieres del Camino (Asturias) entre el 21 y el 23 de septiembre de 2011. El congreso fue organizado por la Universidad de Oviedo, a través del INDUROT (Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio) y del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. El lema elegido fue "Bosques y cambio climático", dada la importancia de la cubierta forestal en Asturias y su vulnerabilidad.

Organizadores

Indurot 25 Aniversario
Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio

UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

AET

Colaboradores

EPM Escuela Politécnica de Mieres – Universidad de Oviedo

esa

Unión Europea – Fondo Europeo de Desarrollo Regional

Ministerio de Ciencia e Innovación

INIA – Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria

Gobierno del Principado de Asturias – Consejería de Educación y Ciencia

PCTI Asturias – Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación de Asturias 2006-2009

cajAstur

Turismo Gijón – Ayuntamiento

RNTA – Red Nacional de Teledetección Ambiental

Instituto Geográfico Nacional

Gobierno de España – Ministerio de Fomento

Gobierno de España – Ministerio de Defensa – INTA

Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía – Principado de Asturias

Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Asturias

Colegio de Ingenieros de Montes

Grupo de Óptica Atmosférica – Universidad de Valladolid – GOA-UVA

GEOSYS SL – Sistemas de Información de la Tierra

dimap – digital image processing

infoterra

seresco

tracasa

tecnogeo

esri España

elecnor deimos

indra

Tragsatec – Grupo Tragsa