

Revista de Teledetección

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN



SUMARIO

Consejo de Redacción y Junta Directiva de la AET.....	1
Editorial.....	2
Información y Normas para los autores.....	3

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

• Estudio de la dependencia angular de la emisividad de los suelos sin vegetación en el infrarrojo térmico. <i>V. García-Santos, E. Valor, V. Caselles, M. A. Burgos y C. Coll.....</i>	5
• Caracterización multiescala de objetos como herramienta para la clasificación de imágenes de alta resolución espacial. <i>C. Gonzalo-Martín y M. Lillo-Saavedra</i>	19
• Análisis de la respuesta de la temperatura de superficie al crecimiento urbano utilizando series temporales MODIS. <i>L. Paolini</i>	28
• Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. <i>C. Mattar, A. Santamaría-Artigas y C. Durán-Alarcón</i>	36
• Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009). <i>C. Giner, B. Martínez, M. A. Gilabert y D. Alcaraz-Segura</i>	51
• Propuesta metodológica para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe: estado de situación y avances. <i>P. Blanco, G. López Saldaña, R. Colditz, L. Hardtke, N. Mari, A. Fischer, C. Caride, P. Aceñolaza, H. del Valle, S. Opazo, W. Sione, M. Lillo-Saavedra, P. Zamboni, I. Cruz López, J. Anaya, F. Morelli y S. de Jesús ...</i>	65
• Validación del método de Nanni y Dematte para obtener mapas de propiedades del suelo en una isla del Danubio. <i>E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles</i>	71

CASOS PRÁCTICOS

• Contribution to the management of the sensitive spaces by the geographical information systems and remote sensing: the case of the basin of the Gharb (Morocco). <i>A. Amrani, M. El Wartiti, M. Zahraoui, A. Calle and J-L. Casanova</i>	77
• Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú. <i>E. García y M. A. Lleellish</i>	92
• Síntesis de la evolución histórica de la teledetección en España (1889-2012). <i>G. Casal y J. Freire</i>	109
• TESIS DOCTORAL: Análisis de la estructura de una población de Piruétano (<i>Pyrus bourgaeana</i>) basado en técnicas de teledetección y SIG	121
• TESIS DOCTORAL: Análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) y aprendizaje automático para la obtención de mapas de coberturas del suelo a partir de imágenes de muy alta resolución espacial. Aplicación en la Unidad de Demanda Agraria n.º 28, Cabecera del Argos.....	124
• TESIS DOCTORAL: Assessment of passive optical remote sensing for mapping macroalgae communities on the galician coast	126

Director

José Antonio SOBRINO

Dep. de Física de la Tierra i Termodinámica. Facultat de Física. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia). Tel.: 96 354 31 15. Fax: 96 354 30 99. director.revista@aet.org.es

Secretario

Juan Carlos JIMÉNEZ MUÑOZ

Unidad de Cambio Global Dep. de Física de la Tierra i Termodinámica. Facultat de Física. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia). Tel.: 96 354 37 81. Fax: 96 354 32 02. cjjm@uv.es

Consejo de Redacción

Luis Ángel RUIZ-FERNÁNDEZ. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia

Carlos PÉREZ. Universidad de Salamanca. Salamanca.

Alfonso CALERA. Universidad de Castilla La Mancha. Albacete.

Federico GONZÁLEZ. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA). Madrid.

Xavier PONS. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Barcelona.

José MORENO. Universitat de València. Valencia.

Massimo MENENTI. Universidad de Delft. Holanda

Jean-Pierre LAGOUARDE. INRA Burdeos. Francia

Leo PAOLINI. Laboratorio de Investigaciones Ecológicas de las Yungas. Argentina.

Comité Científico

Fernando CAMACHO. Earth Observation Laboratory Spin-off Universidad de Valencia. Fernando.camacho@eolab.es

Eduardo DE MIGUEL. Laboratorio de Teledetección INTA. demiguel@inta.es

Arnon KARNIELI. The Remote Sensing Laboratory. Jacob Blaustein Institute for Desert Research.

Ben Gurion Univ. of the Negev. Sede Boker Campus 84990, ISRAEL. karnieli@bgu.ac.il

Agustín LOBO. Institut de Ciències de la Terra «Jaume Almera». CSIC. Agustín.lobo@ija.csic.es

Luis MORALES. Dpto. de Ciencias Ambientales y Recursos Renovables. Universidad de Chile. lmorales@uchile.cl

Ismael MOYA. LMD-CNRS. Ecole Polytechnique. moya@lmd.polytechnique.fr

Françoise NERRY. LSII/TTRIO. Louis Pasteur University. nerry@lsiit.u-strasbg.fr

Albert OLIOSO. INRA-Avignon. olioso@avignon.inra.fr

Antonio PLAZA. Dpto. Tecnología Computacional y Comunicaciones. Universidad de Extremadura. aplaza@unex.com

Jean-Louis ROUJEAN. Météo-France. jean-louis.roujean@meteo.fr

Alain ROYER. Département de géomatique appliquée. Université de Sherbrooke. Alain.Royer@USherbrooke.ca

Jiancheng SHI. Institute for Computational Earth System Science. University of California. shi@icess.ucsb.edu

Wout VERHOEF. Dept. of Water Resources. ITC. verhoef@itc.nl

Raúl ZURITA-MILLA. Laboratory of geo-information science and remote sensing. Wageningen University.

Raul.zurita@wur.nl

Junta Directiva

Presidente: **Dr. Federico GONZÁLEZ ALONSO.** Coordinador del Departamento de Protección Forestal.

Centro de Investigación Forestal (CIFOR). Jefe del Laboratorio de Teledetección. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Ministerio de Ciencia e Innovación. Carretera de la Coruña km 7.

28040 Madrid. ESPAÑA. Tel: 91 347 68 28. e-mail: alonso@inia.es. www.inia.es/teledeteccion

Vicepresidente: **Abel CALLE MONTES.** Laboratorio de Teledetección LATUV. Universidad de Valladolid.

Edificio I+D Paseo de Belén, 1 47011-Valladolid. Tel: 983 423 952. e-mail: abel@latuv.uva.es

Secretario: **Juan José PECES MORERA.** Servicio de Teledetección. Instituto Geográfico Nacional.

General Ibáñez Ibero, 3, 28003, Madrid. Tel: 91 597 95 85. Fax: 91 597 95 85. e-mail: jjpeces@fomento.es

Tesorero: **Antonio RUIZ VERDU.** Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Carretera de Ajalvir, km 4, 28850, Torrejón de Ardoz, Madrid. Tel: 91 520 15 13. e-mail: tesorero@aet.org.es

Vocal: **Dr. José A. SOBRINO.** Unidad de Cambio Global - Laboratorio de Procesado de Imágenes.

Universidad de Valencia. Parc-Científic. C/ Catedrático Agustín Escardino n.º 9. 46980 Paterna (Valencia).

Tel: 34 96 354 31 15. Fax: +34 96 354 31 15. e-mail: sobrino@uv.es

Vocal: **Carmen RECONDO GONZÁLEZ.** Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

(Dpto. de Explotación y Prospección de Minas) e INDUROT. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres.

C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n. 33600 Mieres (Asturias). Tel: 985 458 034 (despacho) - 985 458 118 (Secretaría INDUROT).

Móvil: 666 075 878. Fax: 985 458 110 (INDUROT). e-mail: mdrecondo@uniovi.es

Vocal: **Silvia MERINO DE MIGUEL.** Unidad Docente de Topografía. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica

Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid. Tel: 913 367 668.

Fax: 915 347 796. e-mail: silvia.merino@upm.es

Vocal: **Alix FERNÁNDEZ RENAU GONZÁLEZ ANLEO.** Área de Teledetección. Dpto. de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera. Sub. Gral de Investigación y Programas del INTA. Carretera de Ajalvir (km 4), 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, España. Tel: +34 91 520 19 91. Fax: +34 91 520 16 33. e-mail: fdezra@inta.es

Foto portada: Estimación del área quemada sobre una imagen falso color correspondiente a enero del 2005 (a) y febrero del 2012 (b). Se muestran además fotografías in-situ correspondientes a los distintos sitios siniestrados en c, d y e.

Editorial

Estimados socios y lectores,

En este número 38 de la Revista de Teledetección se publican un total de 7 artículos correspondientes a diversas temáticas, entre las que se encuentran el estudio de la dependencia angular de la emisividad, la caracterización multiescala de objetos para la clasificación de imágenes de alta resolución, el análisis de la temperatura de superficie como respuesta al crecimiento urbano, la estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine, el análisis de las tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en España, una metodología para la cartografía de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe, y la validación del método de Nanni y Dematte para obtener mapas de propiedades del suelo en una isla del Danubio.

Este número incluye también la publicación de tres casos prácticos, en los que se presentan aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección para la gestión de la cuenca del Gharb en Marruecos y para el cartografiado de bofedales en una cuenca altoandina del Perú, así como una síntesis de la evolución histórica de la teledetección en España.

En «Reseñas de Tesis» se incluyen un total de tres tesis doctorales: la primera de ellas desarrollada en el departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal de la Universidad de Córdoba y dedicada a la aplicación de las técnicas de teledetección y SIG para el análisis de la estructura de una población de Piruétano; la segunda realizada en el departamento de Geografía de la Universidad de Murcia y dedicada al análisis de imágenes basado en objetos y aprendizaje automático para la obtención de mapas de coberturas del suelo; y por último la tercera dedicada a la cartografía de comunidades de algas a partir de datos de teledetección óptica.

Para finalizar, sólo me resta seguir animando a los lectores a enviar sus trabajos a las diferentes secciones de la Revista de Teledetección.

José A. Sobrino
Director

Información y normas para los autores

Revista de Teledetección (ISSN: 1988-8740) es una publicación científico-técnica en la cual se publican artículos originales de investigación, relacionados con las diversas aplicaciones de la Teledetección y con su desarrollo metodológico. En secciones aparte, se presentan Casos Prácticos que describen experiencias prácticas en los que se ha utilizado la teledetección para desarrollar proyectos de análisis y gestión territorial o para desarrollar misiones, sensores o segmentos terrestres. También, se incluyen recensiones críticas de libros, programas y material docente relacionado con métodos o aplicaciones de la teledetección, así como resúmenes de tesis doctorales.

Revista de Teledetección es el órgano de expresión científica de la Asociación Española de Teledetección. Se publica ininterrumpidamente desde 1993, siendo la publicación de referencia en nuestro idioma en el ámbito de los desarrollos y aplicaciones de esta tecnología. Se edita semestralmente.

Los artículos originales de investigación son sometidos a un proceso de evaluación externa y anónima por pares, por parte de miembros especialistas de la comunidad científica nacional e internacional de teledetección, supervisado y coordinado por el Consejo de Redacción. *Revista de Teledetección* se compromete a comunicar a los autores la aceptación o rechazo de los manuscritos en un plazo de 3 meses.

Revista de Teledetección se encuentra indexada en el Catálogo LATINDEX (<http://www.latinindex.unam.mx/>) y en las bases de datos ISOC e ICYT (Instituto de Estudios Documentales sobre Ciencia y Tecnología, IEDCYT-CSIC). A través del portal de difusión electrónica de revistas científicas DIALNET de la Universidad de La Rioja (<http://dialnet.unirioja.es/>) y del sitio web de la Asociación Española de Teledetección (<http://www.aet.org.es/?q=numeros>) se puede acceder a los contenidos de la revista, en formato .pdf. *Revista de Teledetección* forma parte de *e-revist@s*, una Plataforma Open Access de Revistas Científicas Electrónicas españolas y latinoamericanas (<http://www.erevistas.csic.es/>). Por último, el sitio web de la Asociación Española de Teledetección (<http://www.aet.org.es/>) dispone de una herramienta de búsqueda que puede apli-

carse a la selección de los contenidos de los números publicados de la revista.

PRESENTACIÓN DE ORIGINALES

1. ARTÍCULOS

Los artículos deberán ser obligatoriamente originales e inéditos. Se enviarán en soporte digital (preferentemente Word o compatible). El trabajo no excederá de 25 páginas (DIN-A4) incluidos resúmenes, figuras, tablas y referencias. Los trabajos deberán ir precedidos de resúmenes en español e inglés, finalizando con las palabras clave. Para facilitar la edición se recomienda escribir los artículos utilizando la plantilla Word disponible en el siguiente enlace:

<http://www.aet.org.es/plantillas/plantilla.doc>

El Consejo de Redacción seleccionará los artículos en función de su calidad y originalidad. Para desarrollar esta tarea de supervisión, contará con la colaboración de especialistas de la comunidad científica nacional e internacional de teledetección quienes, de forma anónima, informarán sobre la conveniencia o no de la publicación de los artículos evaluados o, en su caso, sobre las modificaciones que el autor deberá incluir en el trabajo. La maquetación final del artículo se realizará desde la secretaría de la revista, una vez que se haya recibido la versión final del mismo, aprobada por el consejo de redacción.

En cualquier caso, es recomendable ajustarse a los siguientes criterios:

- **Título** en Mayúsculas, centrado. Además del título en español, los autores indicarán el título del artículo en inglés.
- A continuación, **autores** e institución en la que trabajan, dirección y correo electrónico para el autor principal.
- **Resumen / Abstract** y palabras clave (mínimo de 5).
- **Texto principal**: los epígrafes principales irán, sin numerar, en mayúsculas y negritas y los subepígrafes en minúsculas negritas.
- Las líneas vendrán numeradas correlativamente desde el inicio hasta el final del texto.
- **Referencias. Tablas. Pies de figura y figuras**, insertadas en el documento.

- Las **citas** de autor, en el texto, irán en minúscula (ej. Fernández, 2006 ó Fernández *et al.*, 2005).

- Las **tablas y figuras** deberán llevar un título y estar numeradas consecutivamente. Se indicará su inserción en el texto con el texto: «Insertar fig. XX». Las figuras pueden insertarse en el texto para la versión de evaluación, pero se requerirá posteriormente remitirlas en ficheros gráficos (tif, jpg), con suficiente resolución (**300 ppp o superior**). Se debe prestar especial atención a la rotulación, para que sean legibles al tamaño final de reproducción. Se pueden incluir figuras en color, aunque conviene considerar que sólo se reproducirán en color para la edición electrónica de la revista, mientras serán en blanco y negro para la versión impresa. **Las tablas se enviarán en un archivo de Microsoft Excel, evitando insertar figuras en ellas.**

- Se intentará evitar la inclusión de **notas a pie de página**. En caso necesario, la numeración será correlativa. Se indicarán en el texto como superíndices.

Las referencias irán al final del texto del artículo y sólo se incluirán las citadas en el texto. Estará dispuesta por orden alfabético por el apellido del autor o autores, en mayúscula y nombre o nombres propios con inicial, seguido de la fecha, título en cursiva, lugar de edición, editorial y número de páginas (ej: CHUVIECO, E. 2002. *Teledetección Ambiental*, Barcelona, Ariel, 586 pags). Los artículos de revista habrán de redactarse como sigue: apellidos del autor o autores con las iniciales de sus nombres propios, fecha de edición, título del trabajo, nombre de la revista en cursiva, número del volumen y/o del fascículo, primera y última página (ej. VENTURINI, V., RODRÍGUEZ, L. y ISLAM, S. 2007. Metodología para la estimación de la fracción evaporable y la evapotranspiración con productos MODIS. *Revista de Teledetección*. 27: 44-52).

2. PRESENTACIÓN DE CASOS PRÁCTICOS

La revista incluirá una sección que describa experiencias prácticas en las que se haya utilizado la teledetección para desarrollar un proyecto de gestión o análisis territorial, desarrollo de misiones, sensores, segmentos terrestres, etc. Su objetivo es mostrar ejemplos de cómo la teledetección se emplea en situaciones prácticas.

Estos artículos no se incluirán en el proceso de revisión estándar de la revista, sino que serán evaluados por el director de la misma o persona en quien delegue. Seguirán, por lo demás, la misma estructura formal de los artículos, aunque las referencias bibliográficas serán más sucintas.

3. CRÍTICAS DE LIBROS O PROGRAMAS

Se incluirán reseñas críticas de libros, programas o material docente relacionados con métodos o aplicaciones de la teledetección, así como resúmenes de tesis doctorales. Se incluirá en las mismas los datos completos de la obra reseñada: ficha bibliográfica del libro, datos de referencia del programa (incluyendo versión, coste, dirección de contacto), o de la página web comentada (incluyendo último acceso), así como los del autor de la crítica.

Todos los trabajos se enviarán a la siguiente dirección: director.revista@aet.org.es

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN

La Asociación Española de Teledetección (AET) se inscribió en el Registro de Asociaciones del Ministerio del Interior el 8 de Septiembre de 1988 con el número nacional 81537.

Los fines son fomentar, facilitar, aunar y difundir los trabajos de investigación interdisciplinar en todos los aspectos de la Teledetección en España mediante:

- a) Organización de reuniones, periódicas o no, para la exposición y discusión de trabajos científicos.
- b) Revista, actas, boletines y servicios de información bibliográfica.
- c) Organización de cursillos, conferencias y publicaciones para la difusión de la investigación científica en la relación de la Teledetección.
- d) Creación de Grupos temáticos de trabajo para el estudio de problemas concretos.
- e) Fomento de las enseñanzas y estímulo de la investigación en relación con las ramas de la ciencia vinculadas con Teledetección.
- f) Y la ejecución de cualesquiera otros fines en relación con la actividad principal, siempre que sean compatibles con las disposiciones legales y con las normas dictadas al efecto por los organismos competentes.

e-revist@s

Estudio de la dependencia angular de la emisividad de los suelos sin vegetación en el infrarrojo térmico

V. García-Santos, E. Valor, V. Caselles, M. A. Burgos y C. Coll

*Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de Valencia,
C/ Dr. Moliner, 50, Brujassot (Valencia)*

Resumen

En el dominio espectral infrarrojo térmico (IRT) la emisividad (ϵ) de los suelos inorgánicos (SI) sin vegetación, puede sufrir variaciones debido a tres factores: el intervalo espectral de medida, la composición (macroscópica y microscópica) de la superficie y la geometría de observación de ésta. Uno de los parámetros de superficie afectado por la variación de su ϵ es la temperatura (TST), parámetro clave en estudios como el balance de energía entre la atmósfera y la superficie, la prevención del riesgo de incendios o la medida de la humedad del suelo. Dadas las escasas publicaciones existentes en lo referente a la medida experimental de la anisotropía de la ϵ en SI, el presente estudio llevó a cabo una campaña de medida de la variación angular de la ϵ en doce SI, clasificados según su composición granulométrica en el triángulo textural definido por el United States Department of Agriculture. Para ello se diseñó un dispositivo goniométrico capaz de medir la radiancia angular de un SI mediante el uso de un radiómetro multispectral operando en seis canales del IRT situados entre 8 y 14 μm . Los resultados mostraron que la ϵ es independiente del ángulo de visión acimutal, y presenta poca dependencia con el ángulo cenital para valores inferiores a 30° . No obstante, las medidas de radiancia o temperatura realizadas a ángulos cenitales superiores a 60° , deben ser corregidas del efecto angular en la ϵ del SI. Se pueden observar diferencias en emisividad de hasta 0,083 entre el nadir y 70° cenitales para un SI arenoso con un alto contenido de cuarzo. Esta diferencia implicaría, si fuera ignorada, sobreestimar la TST del suelo en unos 5°C para un SI con una TST de 40°C .

Palabras clave: emisividad angular, infrarrojo térmico, temperatura, medidas experimentales, suelos desnudos inorgánicos.

Abstract

Study of the angular dependence of the emissivity on non vegetated soils in the thermal infrared

Within the thermal infrared (TIR) spectral domain, 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. One of the surface parameters affected by possible variations of ϵ is the temperature (LST), which is in turn a key parameter in several studies such as atmosphere-surface energy budget, wildfire risk prevention or soil moisture estimations. Given the few publications on experimental measurements concerning anisotropy in ϵ of IBS, a field campaign was carried out with the aim of measuring the angular variation of ϵ in twelve 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 . Results showed that ϵ is azimuthally independent and also with zenith angle from nadir up to 30° . Nevertheless radiance or temperature measurements made on IBS at zenith angles upper to 60° , must be corrected due to angular effects of ϵ . Differences up to 0.083 in ϵ can be found between nadir and 70° for a sandy IBS with high quartz content. These differences involve, if ignored, overestimating LST around 5°C for IBS with a ϵ value at nadir of 0.94 and a LST of 40°C .

Key words: angular emissivity, thermal infrared, temperature, experimental measurements, inorganic bare soils.

* Autor para la correspondencia: vicente.garcia-santos@uv.es

Recibido: 04-11-11; Aceptado: 03-07-12.

Introducción

La aparición en las dos últimas décadas de sensores, a bordo de satélites espaciales que observan la superficie terrestre desde ángulos de visión elevados [$\pm 55^\circ$ para MODIS en la plataforma EOS Terra/Aqua (Barnes *et al.* 2002), $\pm 55.4^\circ$ para AVHRR/3 a bordo de NOAA 17/18 (NOAA, 2001), visión biangular 0° - 55° para el sensor AATSR a bordo del satélite ENVISAT (Llewellyn-Jones *et al.* 2001) o hasta $\pm 72^\circ$ del sensor geostacionario SEVIRI-MSG (Merchant *et al.* 2006)], supone un interesante campo de estudio en la teledetección en el infrarrojo térmico (IRT). Prueba de ello es la aparición de trabajos en los que se pone de manifiesto la importancia de las medidas angulares en el IRT. Por ejemplo, Lagouarde *et al.* (2000, 2004) encontraron un efecto angular en la medida de la temperatura de la superficie terrestre (TST) sobre un bosque y sobre la ciudad de Marsella, respectivamente, Niclòs *et al.* (2007) mostraron la mejora obtenida al determinar la temperatura de la superficie marina mediante un algoritmo split-window, cuando se tenían en cuenta aspectos angulares en las medidas de radiancia para dos canales espectrales térmicos (31 y 32) del sensor MODIS, Chehbouni *et al.* (2001) obtuvo una relación entre la humedad del suelo y la diferencia de la temperatura de dicho suelo a dos ángulos distintos, Ball & Pinkerton (2006) demostraron la utilidad de las medidas angulares en volcanología.

La obtención de la TST es indispensable en multitud de estudios relacionados con procesos de la superficie terrestre tales como el transporte de energía en la interfase superficie-atmósfera, prevención de incendios o medida de la humedad del suelo y del índice de vegetación, por ejemplo. Una precisa obtención de la TST desde satélite pasa por una necesaria corrección sobre la medida del efecto atmosférico y de la emisividad de la superficie, ϵ . Por tanto el conocimiento de su comportamiento respecto al ángulo de visión es de importancia al tratar datos obtenidos por sensores como los mencionados anteriormente, pues imprecisiones en la obtención de la emisividad conllevan errores sistemáticos en la obtención de la TST.

Existen diversos estudios sobre la variación angular de la emisividad térmica, $\epsilon(\theta, \varphi)$, con el ángulo de observación para distintos tipos de superficie: Agua (Rees & James, 1992 y Niclòs *et al.*, 2005), nieve (Dozier & Warren, 1982 y Hori *et al.*, 2006), vegetación (McAtee *et al.*, 2003) o lava (Ball & Pinkerton, 2006). El presente estudio se centra en un tipo de superficie, suelos inorgánicos sin vegetación (SI), los cuales ocupan una gran extensión en la superficie terrestre en forma y textura diversa tales como desiertos, playas o suelos preparados para el cultivo. Relativamente pocos trabajos se pueden encontrar relacionados con la variación de la emisividad angular en SI, los más significativos se enumeran a continuación: Barton & Takashima (1986) y Takashima & Masuda (1987) tomaron medidas de $\epsilon(\theta, \varphi)$ para un suelo arenoso con un alto contenido en cuarzo en el intervalo espectral 7-13 μm . Becker *et al.* (1985) ampliaron el espectro de muestras añadiendo medidas de $\epsilon(\theta, \varphi)$ para limo y un suelo con un alto contenido de Al_2O_3 . Labed & Stoll (1991) abordaron el estudio del valor relativo de la $\epsilon(\theta, \varphi)$, aparte de para un suelo arenoso y otro limoso, para tres suelos agrícolas con diferente composición textural. Snyder *et al.* (1997) estudiaron la $\epsilon(\theta, \varphi)$ de un suelo orgánico, uno limoso y otro arenoso, junto a un suelo con vegetación y un suelo de grava. Sobrino & Cuenca (1999) y Cuenca & Sobrino (2004) añadieron a los trabajos previos una muestra de arcilla y otra de césped.

El presente estudio pretende investigar en profundidad el comportamiento angular de la emisividad térmica para una amplia colección de SI representativa de la mayor parte de los tipos de suelos existentes en la Tierra desde un punto de vista textural, prestando especial atención a aspectos estructurales tales como rugosidad, tamaño del grano o porosidad. Para ello se llevó a cabo una campaña experimental mediante la construcción de un goniómetro, que junto a dos radiómetros térmicos multiespectrales, permitió realizar medidas simultáneas de los SI en dos configuraciones angulares distintas.

En la siguiente sección se expone la teoría en que se basó la obtención de $\epsilon(\theta, \varphi)$ para los SI estudiados. La sección 3 presenta en detalle la metodología propuesta para la obtención de las medidas. La sección 4 muestra los

resultados obtenidos y la discusión que de ellos se deriva. Finalmente las conclusiones más relevantes se exponen en la sección 5.

Teoría

Para un sensor térmico operando en la ventana atmosférica 8-14 μm , que mide la radiación procedente de una superficie a una distancia entre ambos lo suficientemente pequeña para ignorar el efecto de la atmósfera existente entre ambos, la radiancia que recibe consta de dos términos de contribución: (i) la emisión de radiación directa desde la superficie hacia el sensor, y (ii) la reflexión de la radiación incidente en la superficie procedente de la atmósfera y posibles objetos circundantes (Norman & Becker, 1995):

$$L_i(\theta, \varphi) = \varepsilon(\theta, \varphi) B_i(TST) + \rho_i(\theta, \varphi) L_i^\downarrow \quad [1]$$

donde $L_i(\theta, \varphi)$ es la radiancia espectral en la dirección angular cenital θ y acimutal φ , medida directamente por el sensor procedente de la muestra, a la que considera comportamiento de cuerpo negro, $L_i(\theta, \varphi) = B_i(T_b)$, donde T_b es la temperatura de brillo de la muestra, $B_i(TST)$ es la función Planck de radiación de cuerpo negro a una temperatura real de la muestra TST, L_i^\downarrow es la radiancia espectral hemisférica descendente compuesta por la contribución atmosférica y posibles elementos circundantes, $\rho_i(\theta, \varphi)$ es la reflectividad hemisférico-direccional (Nicodemus *et al.* 1977), y $\varepsilon_i(\theta, \varphi)$ es la emisividad absoluta de la superficie. El subíndice i representa la banda espectral en que se realizan las medidas.

La relación entre la emisividad de superficie y la reflectividad hemisférico-direccional para una superficie opaca a la radiación y en equilibrio térmico, se relaciona mediante la Ley de Kirchhoff (Nicodemus, 1965) como:

$$\varepsilon_i(\theta, \varphi) = 1 - \rho_i(\theta, \varphi) \quad [2]$$

Esta relación puede ser aplicada en dos casos concretos, o bien se tiene una radiación anisótropa incidente sobre una superficie Lam-

bertiana o en la situación inversa la superficie no-Lambertiana recibe radiación incidente isótropa.

De las expresiones [1] y [2] se deduce fácilmente una expresión de la emisividad:

$$\varepsilon_i(\theta, \varphi) = \frac{L_i(\theta, \varphi) - L_i^\downarrow}{B_i(TST) - L_i^\downarrow} \quad [3]$$

Sin embargo llevar a cabo el cálculo de la emisividad absoluta según la Ec. [3] es una tarea más complicada de lo que parece *a priori*. Conocer con exactitud el valor de la TST es extremadamente complicado dado que dicho valor corresponde a la capa del medio cuyo grosor es igual a la profundidad de penetración de la radiación electromagnética a una longitud de onda dada, siendo en el caso del IRT de unos 8-10 μm , y en el presente estudio no se dispuso de termómetros capaces de medir la TST en esos primeros 10 μm de profundidad.

La solución a este problema pasa por calcular valores relativos de la $\varepsilon_i(\theta, \varphi)$ respecto a su valor absoluto a nadir (Labeled & Stoll, 1991). Siempre y cuando se consiga realizar dos o más medidas, una de ellas a nadir y el resto en una configuración angular arbitraria, simultáneas o en un periodo de tiempo tal que la TST y la L_i^\downarrow permanezcan estables, de la Ec. [3] se puede obtener una expresión de la emisividad espectral relativa sin más que dividir la Ec. [3] por su misma expresión en visión nadir:

$$\varepsilon_{ri}(\theta, \varphi) = \frac{L_i(\theta, \varphi) - L_i^\downarrow}{L_i(0,0) - L_i^\downarrow} \quad [4]$$

donde ε_{ri} es la emisividad espectral relativa y $L_i(0,0)$ es la radiancia medida por el sensor en el caso particular de visión nadir.

Dado que esta expresión es el cociente entre la emisividad absoluta a un ángulo dado y a nadir, previo conocimiento de este último valor de emisividad, se puede obtener su valor absoluto en cualquier dirección según:

$$\varepsilon_i(\theta, \varphi) = \varepsilon_{ri}(\theta, \varphi) \varepsilon_i(0,0) \quad [5]$$

La expresión [5] será la empleada en el presente estudio para obtener el valor de emisividad espectral.

Tabla 1. Características texturales y mineralógicas de los 12 de SDI seleccionados. Más información se puede encontrar en Mira et al. 2007 y 2010

Notación	Textura según USDA	Clasificación textural (%)			Clasificación mineral (%)					
		Arena	Limo	Arcilla	Cuarzo	Feldespatos	Filosilicatos	Hematita	Calcita	Gipsita
B	arenoso	99	0.9	0.1	95.3	2.9	—	—	—	—
BR3	arenoso	92	2	6	100	—	—	—	—	—
LW03	Franco-arenosa	77	18	5	53.7	46.3	—	—	—	—
BR2	Areno-francosa	69	15	16	82.3	16.8	0.8	—	—	—
E	Areno-francosa	67	20	13	72	21.4	3.2	—	—	—
LW52	Areno-arcillo-francosa	62	15	23	58.4	32.2	9.4	—	—	—
LW13	Franca	51	35	14	76	16.7	4.8	2.6	—	—
F	Franca	50	30	20	19.9	4.5	4.1	8.7	62.9	—
BR1	Arcillosa	40	6	54	37.9	—	—	13.1	—	49.0
LW45	Limo-francosa	29	54	17	72.4	23.4	4.2	—	—	—
C	Arcillo-Francosa	20	43	37	29.4	5.5	9.0	—	56.1	—
D	Limo-arcillo-francosa	14	50	35	19.3	3.5	6.0	8.9	62.3	—

Metodología

Clasificación de SI

Con la finalidad de obtener resultados lo más generales posibles, se usaron unas 12 muestras representativas de 9 de los 12 tipos de suelo clasificados según su composición granulométrica de acuerdo a la clasificación hecha por el United States Department of Agriculture (USDA). Dichas muestras fueron recolectadas en diferentes zonas (todas las BR proceden de Brasil, las LW de Estados Unidos, también hay muestras de Argentina y de España, etc.). En la Tabla 1 se puede observar las características de los 12 SI disponibles para el estudio experimental llevado a cabo.

Según Lagouarde *et al.* (1995), SI con un radio del grano inferior a 4-5 cm y superior a 200 μm , sufre variaciones de la temperatura de brillo a medida que se aumenta el ángulo cenital de observación, como consecuencia de la variación angular de su emisividad térmica. Los suelos presentados en la Tabla 1, se encuentran dentro de este intervalo granulométrico. Para más información sobre las características de estas muestras se remite al lector a ver los trabajos de Mira *et al.* (2007 y 2010).

Instrumentación

Las medidas de radiancia angular para los SI propuestos en la Tabla 1 fueron llevadas a cabo en la terraza de la Facultad de Física de la Universitat de Valencia ($13^{\circ}30'25''\text{N}$, $0^{\circ}25'13''\text{W}$) para determinar el comportamiento angular de la emisividad térmica mediante el cálculo de la Ec. [5].

Las radiancias fueron medidas con un radiómetro térmico multispectral CE 312-2 de la casa CIMEL Electronique, el cual opera en 6 bandas espectrales distintas. Una banda amplia abarcando el intervalo 7,7-14,3 μm (canal 1) y 5 bandas más estrechas situadas a lo largo de la banda ancha: 8,2-8,7 μm (canal 6), 8,4-8,9 μm (canal 5), 8,9-9,4 μm (canal 4), 10,1-11,1 μm (canal 3) y 10,9-11,9 μm (canal 2). Este radiómetro fue calibrado frente a una fuente térmica con comportamiento cercano al de cuerpo negro, Landcal Blackbody Source (P80P). Dicha fuente a su vez, fue calibrada frente a un radiómetro IRT de referencia en una campaña de comparación de instrumentos IRT organizada por el Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) en el National Physical Laboratory (NPL, London) en Abril de 2009 (Theocarus & Fox, 2010) ofreciendo una precisión de $\pm 0,19^{\circ}\text{C}$. La temperatura de cuerpo negro que medía el CE 312-2, comparada con aquella ofrecida por la fuente P80P, para

un intervalo de temperaturas desde -5 hasta 50 °C, presentaba una precisión de $\pm 0,03$ °C en todos sus canales, lo que concluyó que el CE 312-2 tiene una precisión de $\pm 0,19$ °C.

La medida de L_i^\perp en la Ec. [4] se obtuvo mediante el uso de un panel de reflectividad difusa en el IRT, Infragold Reflectance Target (IRT-94-100) de la casa Labsphere. Se trata de una superficie de oro rugosa, de dimensiones $25,4 \times 25,4$ cm², caracterizada por una alta reflectividad cuyo valor filtrado espectralmente a los 6 canales del radiómetro es: 0,926 (canal 1), 0,927 (canal 2), 0,926 (canal 3), 0,920 (canal 4), 0,917 (canal 5) y 0,918 (canal 6), con un error promedio de $\pm 0,009$ en todos los canales. No obstante las medidas directas realizadas sobre el panel deben ser convenientemente corregidas dado el efecto radiativo del pequeño valor de emisividad de la superficie dorada, cuyo valor se puede obtener sin más que aplicar a la Ec. [2] los valores de reflectividad previos. La expresión final de L_i^\perp calculada a partir de medidas del panel es:

$$L_i^\perp = \frac{L_{panel,i} - \varepsilon_{panel,i} B_i(T_{panel,i})}{1 - \varepsilon_{panel,i}} \quad [6]$$

donde $L_{panel,i}$ es la medida directa de radiancia hecha sobre el panel, $\varepsilon_{panel,i}$ es la emisividad espectral del panel y $T_{panel,i}$ es la temperatura real de la superficie dorada del panel medida mediante un termómetro de contacto con una precisión de ± 1 °C. Dicha imprecisión implica cometer un error en temperatura de brillo de la atmósfera y entorno de $\pm 0,3$ °C, al determinar L_i^\perp para los 6 canales del radiómetro.

Se eligió la alternativa de usar un panel de reflectividad difusa dadas las ventajas que presentaba comparado con otros métodos conocidos (García-Santos *et al.*, 2011): rápida adquisición de medidas, puede ser utilizado bajo condiciones de nubosidad variable y lo más importante, tiene en cuenta la contribución radiativa de elementos circundantes a la superficie, ajenos a la atmósfera.

Método de medida

Con la finalidad de poder calcular el valor relativo a nadir de la emisividad térmica espectral



Figura 1. Fotografía del montaje experimental en el momento de medir simultáneamente un SDI a nadir (CE1) y a un ángulo cenital (CE2).

a diferentes ángulos de observación, propuesto por la Ec. [4], se decidió realizar medidas simultáneas de la radiancia espectral procedente de un SI, fijando en un goniómetro, un radiómetro a nadir y un segundo radiómetro en una combinación angular (θ, ϕ), pudiéndose desplazar éste último a lo largo del arco del goniómetro variando el ángulo de observación. De esta forma se consigue fácilmente que permanezcan constantes TST y L_i^\perp , siendo apropiado el uso de la Ec. [4]. Se puede ver el montaje experimental en la Figura 1, donde se aprecia una configuración de medida simultánea de la radiancia de una muestra a nadir, radiómetro etiquetado como CE1 y a una dirección angular (θ, ϕ), radiómetro CE2.

La obtención de las medidas angulares se llevó a cabo mediante un barrido acimutal dentro de uno cenital. El principal barrido es el cenital, variando CE2 desde $\theta = 10^\circ$ hasta $\theta = 70^\circ$ en intervalos de 10° . Dentro de este barrido cenital, para cada combinación cenital de radiómetros, CE1(0°)- CE2(θ), se realizó un barrido acimutal de la muestra girándola a intervalos de 90° , obteniéndose por tanto 4 medidas en dicha combinación. Por último, el barrido cenital se realizó 3 veces midiéndose, en resumen, la radiancia para una combinación angular (θ, ϕ) dada, con un espacio temporal de 60 minutos.

La decisión de evaluar acimutalmente la muestra girando ésta, y no el goniómetro, se basó en que aparte de ser un método rápido y cómodo, permitía evaluar la muestra a distin-

tas orientaciones acimutales con exactamente las mismas condiciones de entorno (elevación solar, contribución atmosférica, contribución de elementos circundantes, etc.). De esta forma cualquier variación de la emisividad con el acimut puede ser achacada exclusivamente a la muestra en estudio.

L_i^\downarrow es medida antes y después de cada barrido cenital colocando el panel de reflectividad difusa en el FOV del CE1(0°). El lapso de tiempo entre ambas medidas es de 30 minutos, lo que conlleva a una fluctuación media del valor de L_i^\downarrow respecto a su promedio en torno al 7%, para todos los barridos en todas las muestras. Esta fluctuación, tomada como error de precisión, supone cometer un error en el cálculo de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ de $\pm 0,0003$, en torno a un 0,03% de su valor, por tanto a todos los efectos dicha fluctuación es mínima y se puede tomar el valor promedio de L_i^\downarrow como el apropiado en la Ec. [4].

Conocida la metodología e instrumentación empleada para obtener la $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ mediante Ec. [4] la obtención de su valor absoluto es inmediata atendiendo a la Ec. [5]. Tan solo se necesita el valor absoluto a nadir de la emisividad de la superficie. Existen muchas técnicas para obtener dicho valor, pero en el presente estudio se ha recurrido al método TES propuesto por Gillespie *et al.* (1998), y adaptado al caso de nuestra instrumentación para ser utilizado en medidas de campo (Payan and Royer, 2004).

El error asociado a la $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ es el mayor entre: (i) el obtenido por propagación de errores, a partir del error en la radiancia medida según la Ec. [4], y (ii) la desviación estándar de los tres valores de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ calculados según Ec. [4] para una configuración angular (θ, φ) dada.

El error asociado a la $\epsilon_i(\theta, \varphi)$ se obtiene al aplicar nuevamente la propagación de errores, esta vez en la Ec. [5] obteniendo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \delta\epsilon_i(\theta, \varphi) &= \\ &= \sqrt{\left[\epsilon_{ri}(\theta, \varphi) \delta\epsilon_i(0,0)^2 + \epsilon_i(0,0) \delta\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)^2 \right]} \quad [6] \end{aligned}$$

Resultados y discusión

En la Figura 2 se representa la variación angular de la emisividad absoluta, para cada uno

de los 12 SI seleccionados para este estudio, en los 6 canales del radiómetro térmico. El error mostrado es el obtenido a partir de la Ec. [7].

Como se observa en dicha figura, sólo está representada la variación cenital, no así la acimutal. La explicación se encuentra analizando los resultados: para todos los SI medidos, la variación cenital de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$, era bastante mayor que la acimutal. De hecho, la variación acimutal promedio de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ para cada ángulo cenital ofrece una desviación estándar por debajo de $\pm 0,01$. Esta incertidumbre, en el caso de los valores absolutos de la emisividad, supone cometer un error al obtener T_b de $\pm 0,5$ °C mediante la Ec. [1], calculado usando un valor promedio de la emisividad en el nadir obtenido de todas las muestras de: 0,943, 0,967, 0,960, 0,897, 0,900 y 0,893, del canal 1 a 6 del radiómetro, respectivamente, y para una TST de 40 °C y una temperatura atmosférica de -50 °C. Por lo tanto, a partir de estos resultados se puede deducir que todos los SI presentan anisotropía frente a la variación cenital, siendo muy reducida así en la visión acimutal.

Por último, el valor de $\epsilon_{ri}(\theta, \varphi)$ que se utiliza en la Ec. [5] para obtener el valor absoluto en un ángulo cenital dado, ha sido el valor acimutal promedio para este ángulo cenital. El error asociado a esta emisividad relativa promedio, $\epsilon_{ri}(\theta)$, ha sido el mayor entre la desviación estándar del promedio acimutal y los errores descritos en la sección 3.3. En resumen, el error promedio en la emisividad para los 12 SI de $\epsilon_{ri}(\theta)$ en cada ángulo cenital, desde $\theta = 10^\circ$ a 70° (en intervalos de 10°), es el siguiente: $\pm 0,003$, $\pm 0,003$, $\pm 0,003$, $\pm 0,004$, $\pm 0,005$, $\pm 0,006$ y $\pm 0,007$, respectivamente.

Características espectrales de $\epsilon_i(\theta, \varphi)$ y su efecto sobre TST

Analizando la diferencia entre el valor de $\epsilon_i(\theta)$ en el nadir y a otros ángulos cenitales, los resultados muestran que las variaciones angulares más notables se producen en suelos arenosos con un alto contenido en cuarzo. Ningún SI presenta variación angular para ángulos cenitales menores de 30° , independientemente de su composición, en cambio para ángulos superiores a 60° se supera el valor umbral de 0,01

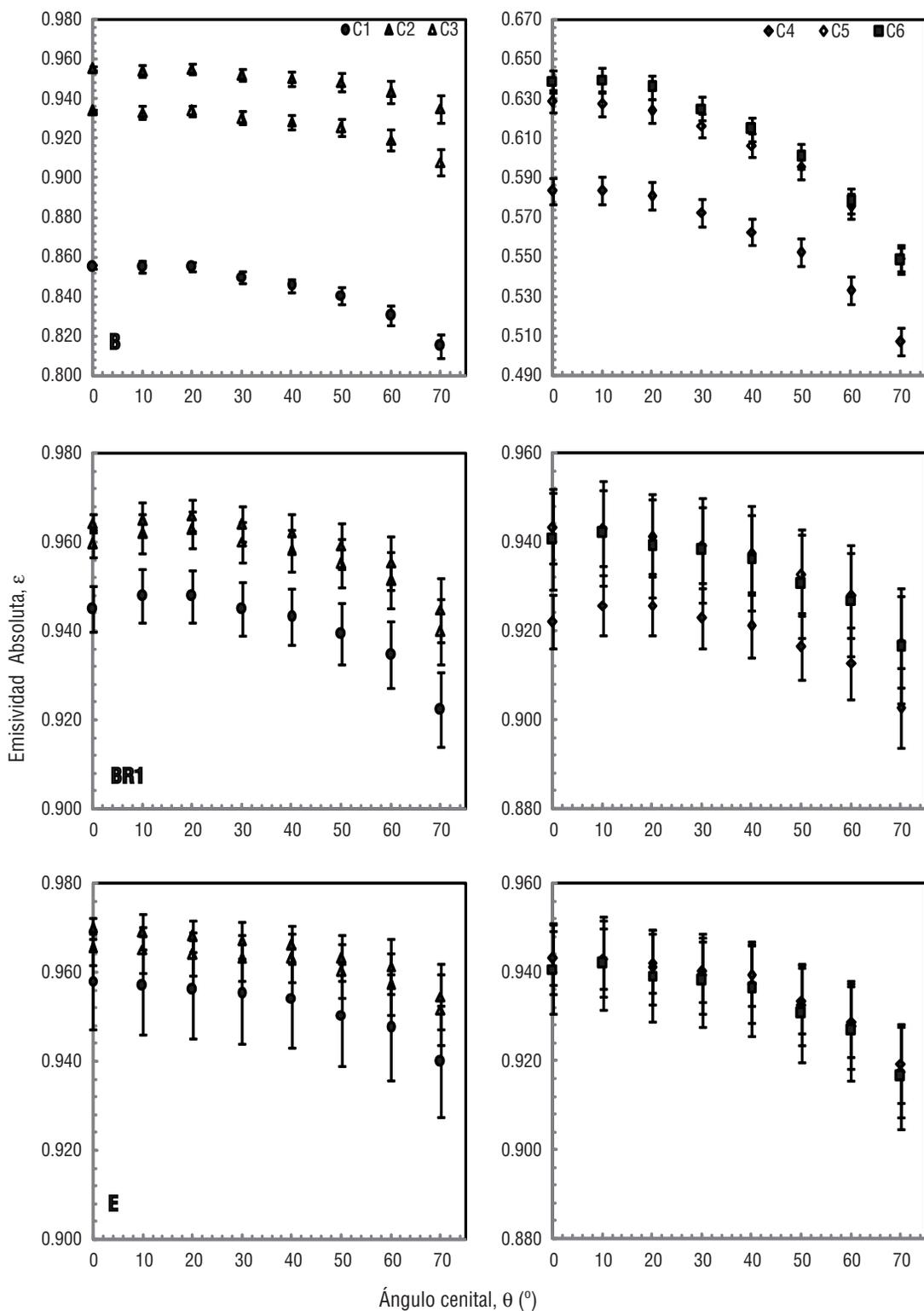


Figura 2. Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

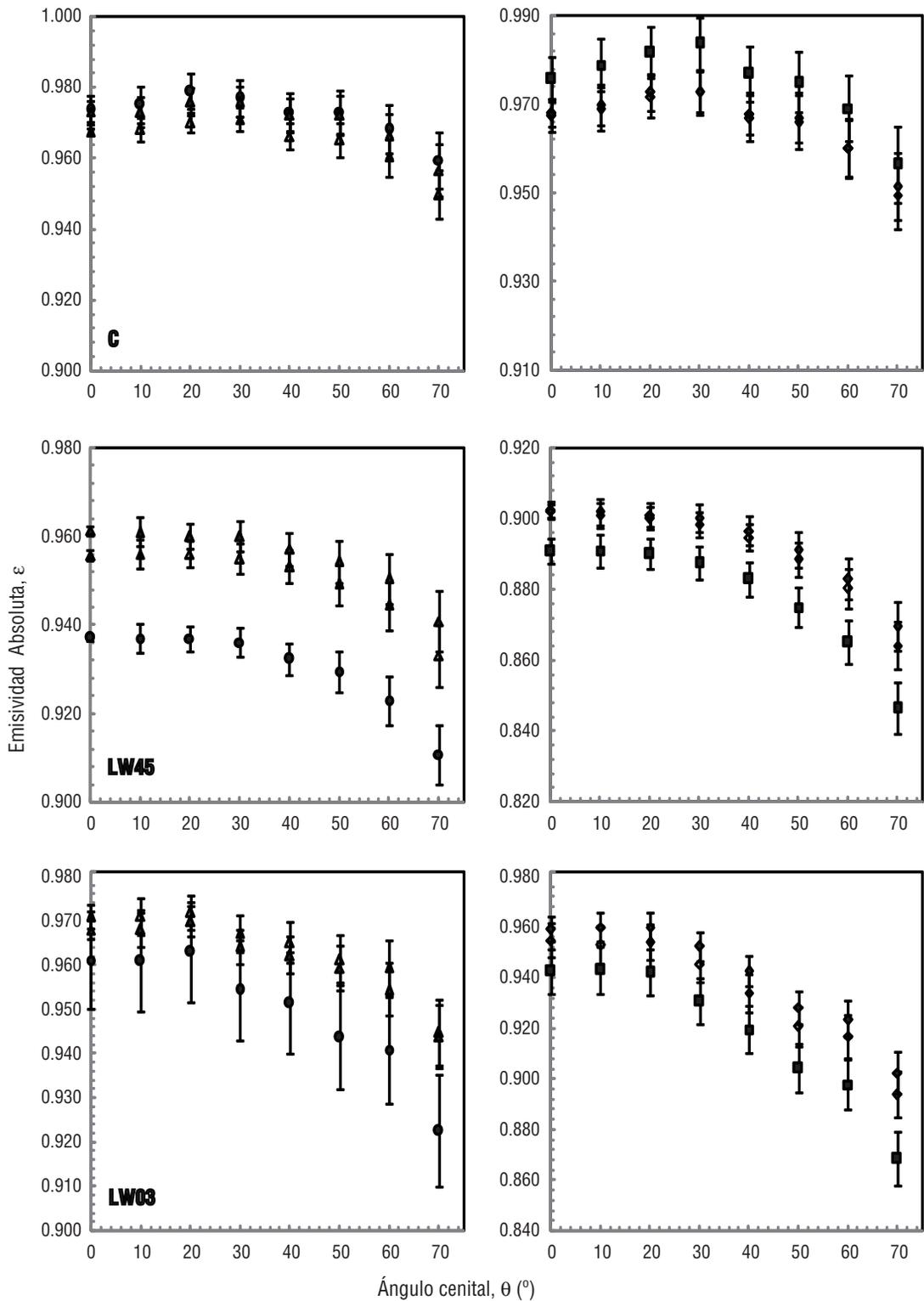


Figura 2 (cont.). Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

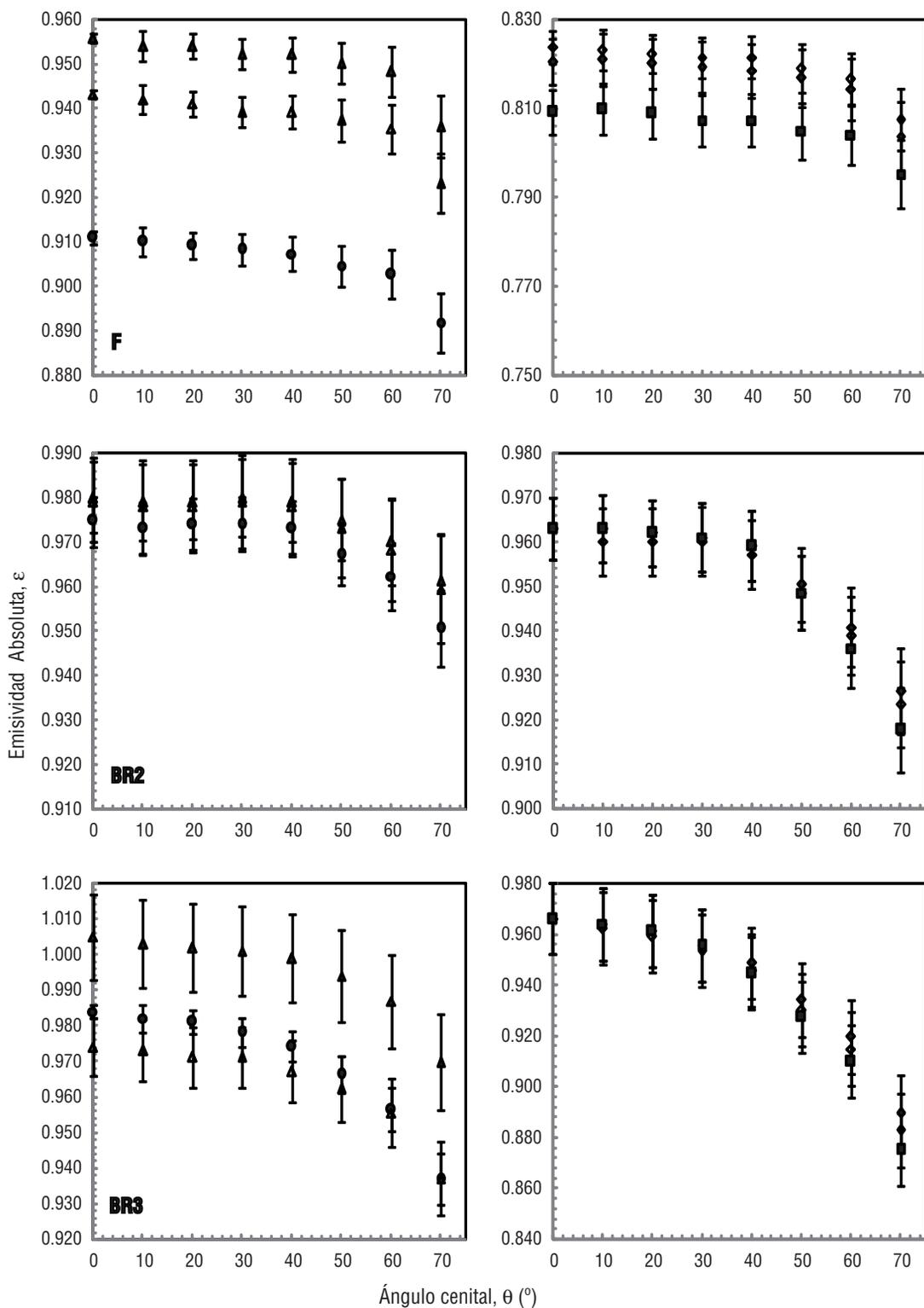


Figura 2 (cont.). Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μm) 2 y 3 (asignados en 10-12 μm) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μm). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

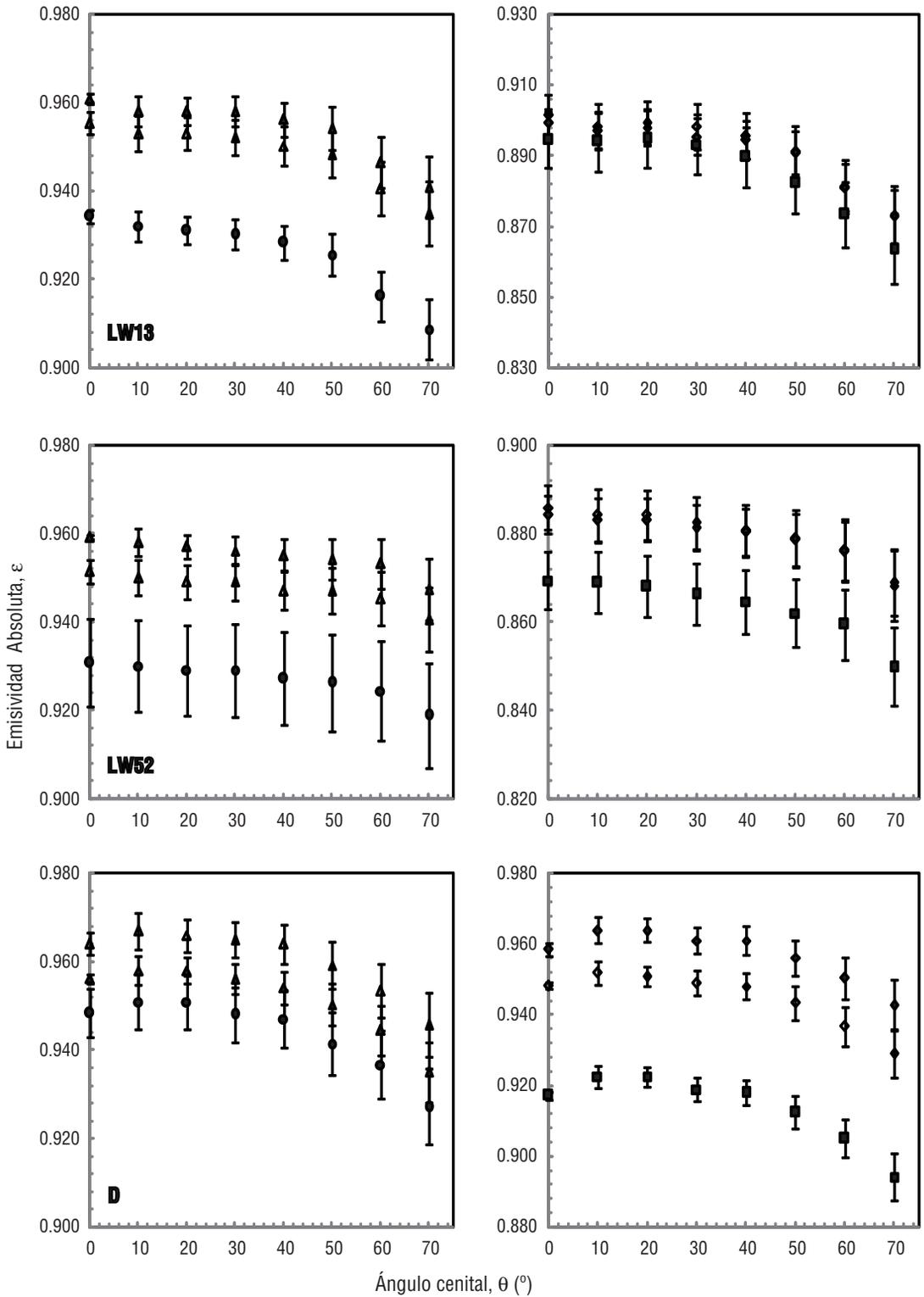


Figura 2 (cont.). Valores absolutos de emisividad angular en función del ángulo cenital, obtenidos para los 12 SI seleccionados. Se presentan los resultados en los 6 canales espectrales del radiómetro CE 312-2. Partiendo de izquierda en dirección horizontal, el primer gráfico corresponde a los canales 1 (8-14 μ m) 2 y 3 (asignados en 10-12 μ m) y el segundo gráfico corresponde a los canales 4, 5 y 6 (8-9,5 μ m). Se incluye el error de emisividad absoluta, calculado según Ec. [7].

establecido como cambio significativo (error máximo obtenido según el criterio estipulado en el párrafo anterior). Al evaluar la variación angular de la $\epsilon_s(\theta)$ respecto a estos dos parámetros (arenas con alto contenido en cuarzo), se llega a conclusiones interesantes que a continuación pasan a ser explicadas desde un punto de vista espectral.

Intervalo 8-14 μm

La variación angular en la ventana atmosférica (canal 1), llega a ser significativa para el SI con un contenido de arena superior al 80% y de cuarzo superior a 90%, para ángulos cenitales superiores a 50°. El efecto angular debe ser tenido en cuenta, inevitablemente, para ángulos cenitales superiores a 60° para cualquier SI, independientemente de su composición mineral o textural. En este amplio intervalo espectral, la variación angular máxima de la emisividad absoluta se produce entre el valor a nadir y a $\theta = 70^\circ$, para el caso de un suelo arenoso con alto contenido en cuarzo. La diferencia entre ambos es de +0,047, lo que significa cometer una sobreestimación de la T_b de +2,6 °C si no se tiene en cuenta dicha variación angular de la emisividad, para un suelo cuyo valor a nadir de la emisividad es de 0,93 y para una TST de 40 °C, siendo la temperatura atmosférica de -50 °C. Esta sobreestimación de la temperatura se reduce para $\theta = 70^\circ$ a medida que disminuye, a su vez, el porcentaje de arena y cuarzo en el SI. No obstante la variación mínima de la emisividad obtenida a dicho ángulo cenital es de +0,012, lo que equivale a una sobreestimación de T_b de 0,7 °C. A $\theta = 60^\circ$, solo los SI con un porcentaje de arena y cuarzo alto deben tener en cuenta efectos angulares en su emisividad, situándose las diferencias, respecto el valor a nadir, entre +0,014 y +0,028, lo que significa sobreestimar la T_b entre +0,8 y +1,7 °C.

Intervalo 11-12 μm

Los efectos angulares en este intervalo espectral, representado por los canales 2 y 3 del radiómetro, son muy pequeños hasta ángulos

cenitales de 60°; a partir de este punto las medidas de la TST sobre SI con un contenido de arena superior al 80% y con un alto contenido de cuarzo, deben ser corregidas debido a un significativo efecto angular de la emisividad, situándose las diferencias entre su valor a nadir y a 60° entre +0,013 y +0,018, lo que equivale a sobreestimar T_b entre +0,8 y +1,1 °C, para una emisividad del SI de 0,96, en dicho intervalo espectral, y para las mismas condiciones de temperatura en superficie y atmósfera del apartado anterior. Nuevamente a $\theta = 70^\circ$, el efecto angular de la emisividad es significativo para todos los SI aunque afecta en mayor medida a superficies con alto contenido de arena y cuarzo, disminuyendo la diferencia entre la emisividad a nadir y a dicho ángulo, a medida que se reduce el contenido de arena y cuarzo. Dicha diferencia se sitúa entre +0,011 y +0,036, equivalente a sobreestimar el T_b entre +0,7 y +2,1 °C.

En este intervalo espectral se sitúan las bandas 31 y 32 de MODIS y las dos bandas térmicas del AATSR, ambos sensores midiendo la superficie con ángulos de visión de hasta $\pm 55^\circ$. Las medidas realizadas sobre SI por estos sensores se verán afectadas, entre otros factores como pueden ser la humedad del suelo, por el efecto angular de su emisividad en suelos arenosos con un alto contenido en cuarzo. Las diferencias entre emisividad a nadir y a 55° se sitúan entre +0,011 y +0,015, estimadas para los SI en el presente estudio que cumplan la condición anterior. Dichas diferencias supondrían sobreestimar la T_b entre +0,7 y +0,9 °C, aunque la diferencia podría ser inferior dada la transmisividad de la atmósfera existente entre sensor y superficie.

Intervalo 8-9,5 μm

Según los resultados de la figura 2, en el canal 4, 5 y 6, el efecto angular se ve fuertemente afectado por la textura y composición de cuarzo, siendo muy significativo nuevamente para SI con contenidos de arena y de cuarzo superiores al 90%, a partir de ángulos cenitales iguales o superiores a 30°. Si dichos contenidos son superiores al 50%, el efecto angular es importante a partir de 50°, donde se obtuvie-

ron diferencias entre la emisividad a nadir y a dicho ángulo entre +0,01 y +0,035, a $\theta = 60^\circ$ dichas diferencias aumentaron, situándose entre +0,014 y +0,051, lo que equivale a una sobreestimación de T_b entre +0,8 y +3,0 °C para un SI con un valor de emisividad a nadir de 0,87 en este intervalo espectral. La máxima variación angular de la emisividad se registra a $\theta = 70^\circ$ para un suelo arenoso con alto contenido cuarzo, cuyo valor respecto al nadir es de -0,083, lo que equivale a una sobreestimación de T_b de +4,8 °C, siendo el mínimo en torno a -0,016, para un suelo limo-arcilloso.

Conclusiones

Los efectos angulares implícitos en las medidas de radiación por parte de sensores a bordo de satélites pueden tener consecuencias importantes en parámetros como la TST. En el caso particular del SI, con un contenido de materia orgánica inferior al 8% y una baja rugosidad (diámetro del grano menor de 4-5 cm y superior a 200 μm), los efectos angulares son debidos fundamentalmente a la emisividad del SI según Lagouarde *et al.* (1995). En el presente estudio se estudió la dependencia angular de la emisividad térmica espectral de doce suelos diferentes que representan, desde un punto de vista textural, una parte apreciable de los SI existentes en la superficie terrestre. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

La emisividad de un SI es casi independiente de la orientación acimutal, y también de la cenital para valores cercanos al nadir (0°) y hasta 30° , con diferencias observadas siempre inferiores a 0,01 lo que implica cometer un error en TST en torno a 0,5 °C. Para ángulos de visión mayores, la emisividad comienza a decrecer con el aumento del ángulo cenital y dicha disminución es observada en todos los SI estudiados aquí. La variación angular de la emisividad es muy significativa a ángulos cenitales superiores a 60° . La diferencia entre los valores de emisividad a ángulos cenitales superiores a 30° y los valores a nadir, varían en función del tipo de composición de la muestra y del intervalo espectral en que se realicen las medidas.

En el intervalo 8-9,5 μm la variación angular de la emisividad sufre los descensos más

pronunciados, especialmente para muestras arenosas (contenido de arena superior al 80%), y con un alto contenido en cuarzo (superior al 90%). Para dicho intervalo espectral y en dichos suelos, la variación angular de la emisividad empieza a ser notable a partir de los 30° (diferencia respecto a nadir de -0,013) llegando a alcanzar las mayores diferencias registradas, en torno a -0,083 (a $\theta = 70^\circ$), lo que equivale a cometer una sobreestimación de la temperatura medida de +4,8 °C, en caso de ignorar dicho efecto. Para el resto de SI, el efecto angular empieza a ser importante a partir de 60° , independientemente del contenido textural y de cuarzo del SI.

Los efectos sobre la TST debidos a la variación angular de la emisividad en el intervalo 10-12 μm son despreciables hasta un ángulo cenital de 60° . A partir de este ángulo, la medidas de la TST sobre SI con un contenido de arena superior al 80% y con un alto contenido de cuarzo (> 90%), debe ser corregida a causa de un significativo efecto angular en la emisividad, situándose las diferencias entre su valor a dicho ángulo y a nadir entre -0,013 y -0,018, lo que equivale a sobreestimar T_b en la Ec. [1] entre +0,8 y +1,1 °C, para una emisividad en nadir del SI de 0,96. A $\theta = 70^\circ$, el efecto angular es significativo para todos los SI aunque afectando en mayor o menor medida a las superficies con mayor o menor contenido de arena y cuarzo, respectivamente, apreciándose diferencias entre la emisividad a nadir y a 70° entre +0,011 y +0,036, equivalente a sobreestimar la T_b entre +0,7 y +2,1 °C.

Los resultados ofrecidos en el presente estudio muestran la necesidad de atender aspectos angulares en la medida de la temperatura. En caso contrario se pueden producir sobreestimaciones en su medida desde +1 °C hasta +5 °C.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MICINN (beca FPI de V. García, y Proyectos CGL2007-64666/CLI, CGL2007-29819-E/CLI y CGL2010-17577/CLI, cofinanciados con fondos FEDER), y por la Conselleria d'Educació de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2009/086).

Referencias

- BALL, M., & H. PINKERTON. 2006. Factors affecting the accuracy of thermal imaging cameras in volcanology, *Journal of Geophysical Research*, 111, B11203, DOI:10.1029/2005JB003829.
- BARNES, W. L., PAGANO, T. S., & SALOMONSON, V. V. 1998. Prelaunch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1088-1100.
- BARTON, I. J., & TAKASHIMA, T. 1986. An AVHRR investigation of surface emissivity near Lake Eyre, Australia, *Remote Sensing of Environment*, 20(2), 153-163, ISSN 0034-4257, DOI: 10.1016/0034-4257(86)90020-9.
- BECKER, F., RAMANANTSIZEHENA, P., & STOLL, M. P. 1985. Angular variation of the bidirectional reflectance of bare soils in the thermal infrared band, *Applied Optics*, 24(3), 365-375, DOI:10.1364/AO.24.000365.
- CHEHBOUNI, A., NOUVELLON, Y., KERR, Y. H., MORAN, M. S., WATTS, C., PREVOT, L., GOODRICH, D. C., & RAMBAL, S. 2001. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site, *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 360-372, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00183-3.
- CUENCA, J., & SOBRINO, J. A. 2004. Experimental Measurements for Studying Angular and Spectral Variation of Thermal Infrared Emissivity, *Applied Optics*, 43, 4598-460, DOI:10.1364/AO.43.004598.
- DOZIER, J., & WARREN, S. 1982. Effect of Viewing Angle on the Infrared Brightness Temperature of Snow, *Water Resources Research*, 18(5), 1424-1434.
- GARCÍA-SANTOS, V., VALOR, E., MIRA, M., COLL, C., GALVE, J. M., & CASELLES, V. 2011. Evaluación de distintos métodos de medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico, *Revista de Teledetección*, 35, 23-31.
- GILLESPIE, A., ROKUGAWA, S., MATSUNAGA, T., COTHERN, J. S., HOOK, S., & 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(4), 1113-1126, DOI: 10.1109/36.700995.
- HORI, M., AOKI, T., TANIKAWA, T., MOTOYOSHI, H., HACHIKUBO, A., SUGIURA, K., YASUNARI, T. J., EIDE, H., STORVOLD, R., NAKAJIMA, Y., & TAKAHASHI, F. 2006. In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8-14 μm atmospheric window, *Remote Sensing of Environment*, 100(4), 486-502, DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.001.
- LABED, J., & STOLL, M. P. 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.
- LAGOUARDE, J. P., KERR, Y. H., & BRUNET, Y. 1995. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils, *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation, 167-190, DOI: 10.1016/0168-1923(95)02260-5.
- LAGOUARDE, J. P., BALLANS, H., MOREAU, P., GUYON, D., & CORABOEUF, D. 2000. Experimental Study of Brightness Surface Temperature Angular Variations of Maritime Pine (*Pinus pinaster*) Stands, *Remote Sensing of Environment*, 72(1), 17-34, DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00085-1.
- LAGOUARDE, J. P., MOREAU, P., IRVINE, M., BONNEFOND, J. M., VOOGT, J. A., & SOLLIEC, F. 2004. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France), *Remote Sensing of Environment*, 93(4), 443-462, DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.011.
- LLEWELLYN-JONES, D., EDWARDS, M. C., MUTLOW, C. T., BIRKS, A. R., BARTON, I. J., & TAIT, H. 2001. AATSR: Global-change and surfacetemperature measurements from ENVISAT. *ESA Bulletin*, 11-21.
- McATEE, B. K., PRATA, A. J., & 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, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1060:TABOET>2.0.CO;2.
- MERCHANT C. J., EMBURY O., LE BORGNE P., & BELLEC B. 2006. Saharan dust in nighttime thermal imagery: Detection and reduction of related biases in retrieved sea surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, 104, 15-30.
- MIRA, M., VALOR, E., BOLUDA, R., CASELLES, V., & COLL, C. 2007. Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils: Implication for land surface temperature determination, *Journal of Geophysical Research*, 112, F04003, DOI:10.1029/2007JF000749.
- MIRA, M., VALOR, E., CASELLES, V., RUBIO, E., COLL, C., GALVE, J. M., NICLOS, R., SANCHEZ, J. M., & BOLUDA, R. 2010. Soil Moisture Effect on Thermal Infrared (8-13 μm) Emissivity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5), 2251-2260, DOI: 10.1109/TGRS.2009.2039143.
- NICODEMUS, F. E. 1965. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface, *Applied Optics*, 4, 767-773, DOI:10.1364/AO.4.000767.
- NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C., HSIA, J. J., GINSBERG, I. W., & LIMPERIS, T. 1977.

- Geometrical considerations of nomenclature for reflectance, National Bureau Standards Monograph 160. *US Department of Commerce*, Washington DC, 52.
- NICLOS, R., VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., & SANCHEZ, J. M. 2005. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity-Validation of models, *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 83-93, DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.002.
- NICLOS, R., CASELLES, V., COLL, C., & VALOR, E. 2007. Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation, *Remote Sensing of Environment*, 111(1), 107-121, DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.014.
- National Oceanic Atmospheric Administration. 2001. NOAA KLM User's Guide. G. Goodrum, K. B. Kidwell, and W. Winston.
- NORMAN, J. M., & BECKER, F. 1995. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces, *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation, 153-166, DOI: 10.1016/0168-1923(95)02259-Z.
- PAYAN, V., & ROYER, A. 2004, Analysis of Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm applicability and sensitivity, *Int. J. Remote Sensing*, 25(1), 15-37, DOI: 10.1080/0143116031000115274.
- REES, W. G., & JAMES, S. P. 1992. Angular variation of the infrared emissivity of ice and water sea surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2873-2886.
- SNYDER, W. C., WAN, Z., ZHANG, Y., & FENG, Y. Z. 1997. Thermal Infrared (3-14 μm) bidirectional reflectance measurements of sands and soils, *Remote Sensing of Environment*, 60(1), 101-109, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00166-6.
- SOBRINO, J. A., & CUENCA, J. 1999. Angular Variation of Thermal Infrared Emissivity for Some Natural Surfaces from Experimental Measurements, *Applied Optics*, 38, 3931-3936.
- TAKASHIMA, T., & MASUDA, K. 1987. Emissivities of quartz and Sahara dust powders in the infrared region (7-17 μm), *Remote Sensing of Environment*, 23(1), 51-63, DOI: 10.1016/0034-4257(87)90070-8.
- THEOCHAROUS, E., & FOX, N. P. 2010, CEOS comparison of IR brightness temperature measurements in support of satellite validation. Part II: Laboratory comparison of the brightness temperature of blackbodies, *NPL Report*, ISSN: 1754-2944.

Caracterización multiescala de objetos como herramienta para la clasificación de imágenes de alta resolución espacial

C. Gonzalo-Martín¹ y M. Lillo-Saavedra²

¹ Dpto. de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, Campus de Montegancedo, Boadilla del Monte, 28660 Madrid

² Dpto. de Mecanización y Energía, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chile

Resumen

En este trabajo se presenta una nueva metodología, sencilla y asequible, para la definición y caracterización de objetos en imágenes de alta resolución espacial a diferentes escalas. La obtención de los objetos se ha llevado a cabo mediante la integración de segmentos textural y espectralmente homogéneos. Los primeros se han obtenido a partir de la segmentación de los coeficientes Wavelet de la imagen pancromática. El carácter multi-escala de esta transformada ha permitido obtener segmentos texturalmente homogéneos de diferentes tamaños para cada una de las escalas. Los segmentos espectralmente homogéneos se han obtenido a partir de la segmentación de la correspondiente imagen multispectral clasificada. Mediante este proceso se han definido un conjunto de objetos caracterizados por diferentes atributos que dotan a los mismos de un carácter semántico, a partir del cual es posible determinar las similitudes y diferencias respecto al resto de los objetos. Para mostrar las capacidades de la metodología propuesta, se han llevado a cabo diferentes experimentos de clasificación no supervisada de una imagen Quickbird, utilizando distintos subconjuntos de atributos y un clasificador 1-D jerárquico ascendente. Los resultados obtenidos muestran la capacidad de la metodología propuesta para separar objetos semánticos a diferentes escalas, así como sus ventajas frente a una interpretación de la imagen basada en píxeles.

Palabras clave: Atributos de objetos, OBIA, clasificación basada en objetos, coeficientes Wavelet, segmentación.

Abstract

Objects Multiscale Characterization: a Tool for High Spatial Resolution Image Classification

This paper presents a new methodology, simple and affordable, for the definition and characterization of objects at different scales in high spatial resolution images. The objects have been generated by integrating texturally and spectrally homogeneous segments. The former have been obtained from the segmentation of Wavelet coefficients of the panchromatic image. The multi-scale character of this transform has yielded texturally homogeneous segments of different sizes for each of the scales. The spectrally homogeneous segments have been obtained by segmenting the classified corresponding multispectral image. In this way, it has been defined a set of objects characterized by different attributes, which give to the objects a semantic meaning, allowing to determine the similarities and differences between them. To demonstrate the capabilities of the methodology proposed, different experiments of unsupervised classification of a Quickbird image have been carried out, using different subsets of attributes and 1-D ascendant hierarchical classifier. Obtained results have shown the capability of the proposed methodology for separating semantic objects at different scales, as well as, its advantages against pixel-based image interpretation.

Key words: Object attributes, OBIA, object-based classification, Wavelet coefficients, segmentation.

* Autor para la correspondencia: consuelo.gonzalo@upm.es

Recibido: 13-03-12; Aceptado: 12-07-12.

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 mediante la percepción de puntos individuales (píxeles), caracterizados exclusivamente a partir de los valores digitales asociados a dichos puntos. Esta última estrategia de interpretación, es el origen de la mayoría de las debilidades detectadas en los métodos de procesado de imágenes digitales basados en píxeles, especialmente cuando estos se aplican a imágenes de alta y muy alta resolución espacial y baja resolución espectral (Baatz, 2000; Blaschke y Strobl, 2001; Carleer *et al.* 2005; Pesaresi y Benediktsson, 2001; Walter, 2004). Algunas de estas debilidades son el conocido como efecto «sal y pimienta», debido a la alta variabilidad entre píxeles vecinos de las imágenes y por otro lado, la dificultad para discriminar cubiertas con respuestas espectrales similares. 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; Mallinis *et al.* 2004; Mynt *et al.*, 2011; Peña-Barragán *et al.* 2011).

Este tipo de procesado, o análisis, de imágenes basado en objetos es conocido en la literatura como OBIA (Object Based Image Analysis) (Blaschke *et al.* 2008). Un paso crítico en estas metodologías es la identificación y caracterización de los objetos. La identificación de los mismos se lleva a cabo mediante un proceso de segmentación, que básicamente consiste en la agrupación de píxeles vecinos con atributos comunes, en áreas homogéneas y significativas desde el punto de vista del usuario final (Castilla y Hay, 2008; Blaschke 2006). En el caso de las cubiertas terrestres, dada su complejidad, este proceso de segmentación debe ser multiescala para así poder adaptarse al tamaño de los diferentes objetos presentes en ellas (Baatz 2000; Dungan,

2002; Hay y Marceau, 2004). En este contexto, el concepto multiescala se refiere a las diferentes dimensiones espaciales a las que las entidades, patrones y procesos se pueden observar y medir (Hay *et al.* 2005). Aunque existen diferentes formas de modelar este carácter multiescala una de las soluciones más comúnmente utilizadas son las transformadas multiresolución y entre ellas la transformada Wavelet (Mallat 1998). Esta transformada permite separar el detalle de las imágenes de su información de fondo, para diferentes escalas.

Para que los segmentos obtenidos tengan un carácter semántico es preciso caracterizarlos con una serie de atributos que permitan determinar su similitud o diferencia respecto a otros. Este proceso de caracterización es el que transforma los segmentos en objetos. En la literatura se presentan diferentes formas de llevar a cabo esta caracterización. Así por ejemplo, algunos autores utilizan el valor medio de cada una de las bandas espectrales (Mynt *et al.* 2011); en aplicaciones de agricultura se suelen incluir diferentes índices espectrales (Peña-Barragán *et al.* 2011). En (Mallinis *et al.* 2008) se propusieron un conjunto particular de características texturales derivadas de indicadores locales de determinadas asociaciones espaciales para la clasificación de cubiertas forestales.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología, sencilla y asequible, para la definición y caracterización de objetos multi-escala en imágenes de alta resolución espacial que permita la discriminación entre objetos semánticos a diferentes escalas.

Métodos y datos

La zona de estudio corresponde a un área rural con plantaciones de naranjo y aguacate. La escena que se ha utilizado en este trabajo fue registrada por el sensor de alta resolución (BGIS2000) a bordo del satélite Quickbird, el día 18 de febrero de 2005, en la región de O'Higgins, Valle de Peumo, Chile (34°18'6''S; 71°19'11''O). El área registrada es de 9.43 hectáreas, correspondiente a 512 × 512 píxeles en la imagen pancromática. En la Figura 1a), se muestra una composición color de la

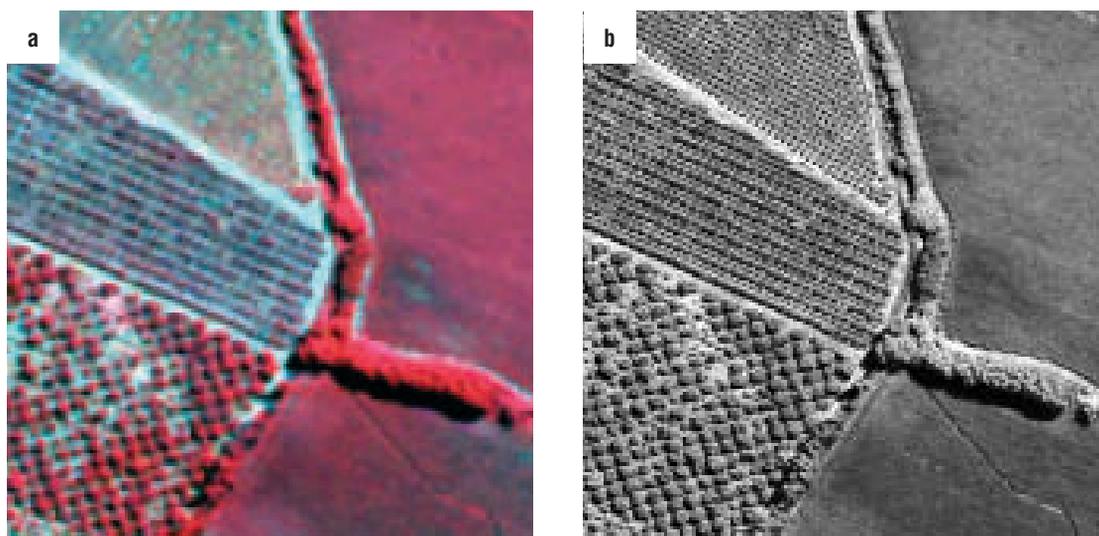


Figura 1. a) Composición NGB de la imagen multiespectral. b) Imagen pancromática.

Tabla 1. Características de las imágenes Quickbird

Resolución	Imagen pancromática	Imagen multiespectral
Espacial (m)	0.61	2.4
Esppectral (nm)	450-900	B1: 450-520 B2: 520-600 B3: 630-690 B4: 760-900
Radiométrica (bits)	11	11
Temporal (días)	16	16

escena multiespectral y en la 1b), la correspondiente imagen pancromática. Las características de este tipo de imágenes se resumen en la Tabla 1.

Con objeto de asegurar un correcto ajuste espacial entre la imagen pancromática y la imagen multiespectral, se ha llevado a cabo el co-registro entre las dos imágenes, utilizando para ello el módulo de georeferenciación de ENVI (Exelis, 2012). Dado que los productos QuickBird proporcionados a los usuarios ya están radiométricamente y geoméricamente corregidos, no se han llevado a cabo otro tipo de correcciones (<http://www.digitalglobe.com/products#mapping&standard-satellite-imagery>).

La Figura 2 incluye un esquema completo de la metodología de definición de segmentos y su caracterización para generar los objetos a clasificar. A continuación se detallan las diferentes etapas del proceso completo.

Generación de los segmentos multi-escala

La definición de los segmentos desde el punto de vista morfológico y textural se ha llevado a cabo a partir de la imagen de mayor resolución espacial, la imagen pancromática. Sin embargo, y con objeto de eliminar su información espectral, se propone realizar este proceso, no sobre la imagen directamente, sino sobre los coeficientes obtenidos mediante la transformada multiresolución Wavelet *à trous* (Dutilleux, 1987). La Figura 3 ilustra la obtención de dichos coeficientes para la imagen pancromática (PAN) (Gonzalo & Lillo, 2004). En esta figura h_j representa la función de escalamiento b3-spline y h_{j+1} la función que se obtiene al intercalar ceros entre las filas y las columnas de h_j , repitiendo este proceso, se obtienen los diferentes filtros para cada uno de los niveles de la transformada. Los coeficientes de

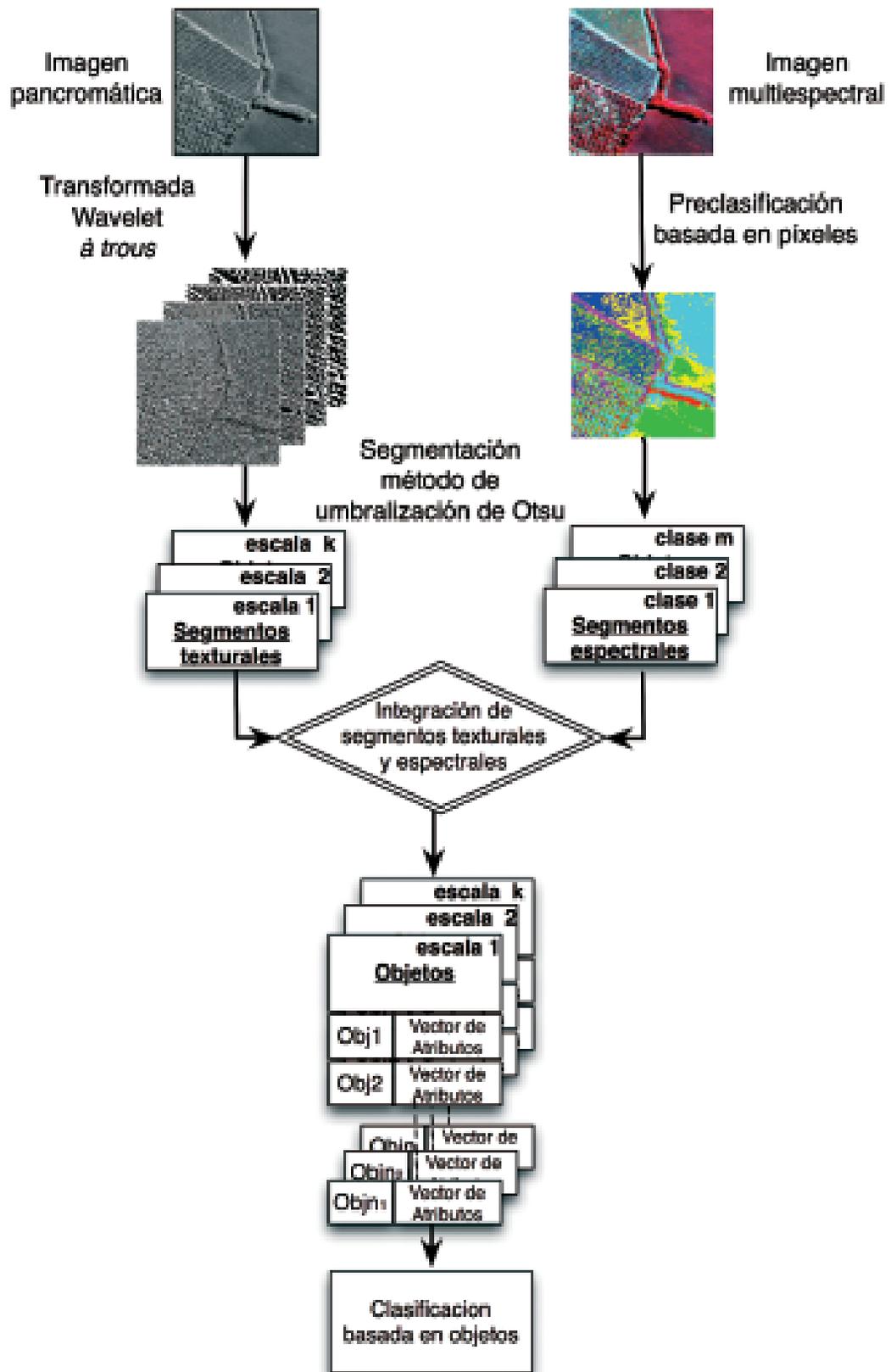


Figura 2. Esquema de la metodología propuesta para la obtención de los objetos.

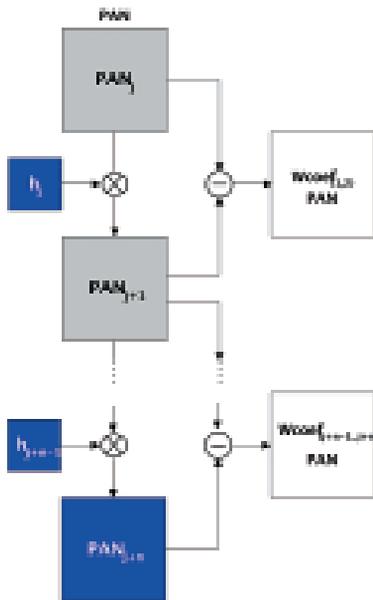


Figura 3. Esquema de la obtención de los coeficientes de la imagen pancromática mediante la transformada Wavelet *à trous*

esta transformada para la imagen a transformar, se obtienen como diferencia entre las imágenes escaladas mediante las funciones h_{j+i} , en dos niveles consecutivos. Ello permite definir segmentos a diferentes escalas. La escala a utilizar, dependerá de la imagen particular con la que se esté trabajando, así como el objetivo de la aplicación final.

Los segmentos texturalmente homogéneos se han obtenido aplicando a los coeficientes Wavelet de la imagen pancromática, el método de segmentación mediante umbralización de Otsu (1979). Este método permite elegir un umbral óptimo, maximizando la varianza entre clases mediante una búsqueda exhaustiva en toda la imagen.

Por otro lado y con objeto de disminuir la alta variabilidad espacial de imágenes de alta y muy alta resolución, se propone determinar los segmentos espectralmente homogéneos a partir de las clases encontradas en la imagen multispectral clasificada mediante el clasificador no supervisado basado en píxeles, k-means.

La integración de estos dos tipos de segmentos y su posterior caracterización permite obtener objetos con un patrón de comportamiento espectral y textural diferenciador. Como resultado de este proceso, se obtienen n_k (k = número de niveles de coeficientes Wave-

let utilizados) segmentos para cada escala o nivel.

Caracterización de los segmentos

La caracterización de los segmentos se lleva a cabo asociándole los atributos texturales y espectrales que se consideren más adecuados para la escena objeto de estudio. De esta forma, cada segmento identificado, en cada una de las escalas, pasa a estar caracterizado por un vector de atributos cuyo tamaño viene determinado por el número de atributos asociados, proporcionando una representación conjunta y simplificada de la información contenida en las dos imágenes fuente, así como de toda la información adicional (textural, contextual, morfológica, ...) que se utilicen para una aplicación en particular. Además es preciso asociar a cada objeto las coordenadas de los píxeles que lo definen, con objeto de poder realizar la espacialización de dichos objetos una vez sean procesados. De esta forma se genera una lista de objetos con sus correspondientes atributos que constituirán la entrada a un clasificador 1-D. El procesamiento de esta estructura de datos implica un coste computacional muy inferior al procesamiento de las imágenes basado en píxeles.

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 de la imagen pancromática para los tres primeros niveles de la transformada Wavelet (*à-trous*) (Figura 4). En esta figura se puede apreciar como dichos coeficientes contienen la información de detalle de la imagen pancromática a diferentes escalas.

La imagen multispectral se ha clasificado mediante el método k-means, conteniendo 5 clases espectrales diferentes. En este trabajo, la integración entre los segmentos espectrales y los texturales se ha llevado a cabo mediante su intersección. Dado que el método de segmentación utilizado permite seleccionar el tamaño mínimo de los objetos presentes en la

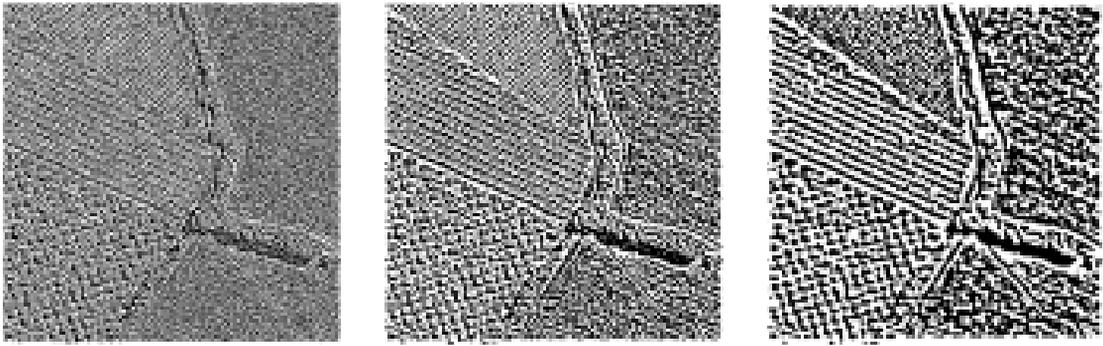


Figura 4. Coeficientes Wavelet (*à trous*) de la imagen pancromática Quickbird para los tres primeros niveles de la transformada.

Tabla 2. Número de objetos obtenidos en los experimentos de segmentación

Tamaño mínimo de los objetos en píxeles	Escala 1	Escala 2	Escala 3
5	3334	531	316
25	2782	350	260
50	2696	265	221

escena, se han realizado diferentes experimentos para valores de este parámetro: 5, 25 y 50 píxeles, respectivamente. La Tabla 2 incluye el número de objetos obtenidos para cada uno de estos valores y para cada escala.

A partir de estos segmentos, se han llevado a cabo diferentes experimentos de caracterización, utilizando distintos subconjuntos de atributos. Los resultados mostrados en este trabajo corresponden a los experimentos en los que se han eliminado los objetos con un tamaño inferior a 25 píxeles, para evitar efectos de sobresegmentación. Los segmentos resultantes han sido caracterizados por vectores de atributos definidos por el valor medio del nivel de gris de cada objeto en cada una de las bandas espectrales; y el valor medio y la desviación estándar de los valores de los coeficientes Wavelet, correspondientes a cada objeto en cada escala. La clasificación no supervisada de estos objetos se ha realizado utilizando un clasificador 1-D jerárquico ascendente mediante el método de Ward (librería disponible en el *statistical toolbox* de Matlab (R)), considerando la norma euclidiana como criterio de distancia para la agrupación de los elementos. Una vez obtenidos los resultados de clasificación de los

objetos, se ha procedido a la espacialización de los mismos, de ahí la necesidad de almacenar, junto con el resto de atributos de cada objeto, las posiciones de los píxeles que lo definen. En la Figura 5 a) se muestra la imagen multispectral clasificada usando el algoritmo clásico basado en píxeles k-means, considerando 5 clases espectrales diferentes. Las Figuras 5 b), c) y d) corresponden al resultado de la clasificación no supervisada basada en objetos, para 5 clusters y las tres escalas consideradas. En esta figura se puede observar como el efecto «sal y pimienta» presente en la imagen clasificada basada en píxeles no aparece en ninguna de las imágenes clasificadas con la metodología propuesta. Sin embargo, cabe mencionar que las zonas más homogéneas en la imagen espectral son clasificadas como zonas de texturas rugosas cuando se aplica esta metodología. Ello es debido a la rugosidad presente en estas zonas en la imagen pancromática y como consecuencia en sus coeficientes Wavelet. También se puede observar en las Figuras 5 b), c) y d), que en las zonas de cultivo caracterizadas por una textura regular, se obtiene una buena separación entre los diferentes cultivos y el suelo. Con objeto de mostrar con más detalle la capacidad

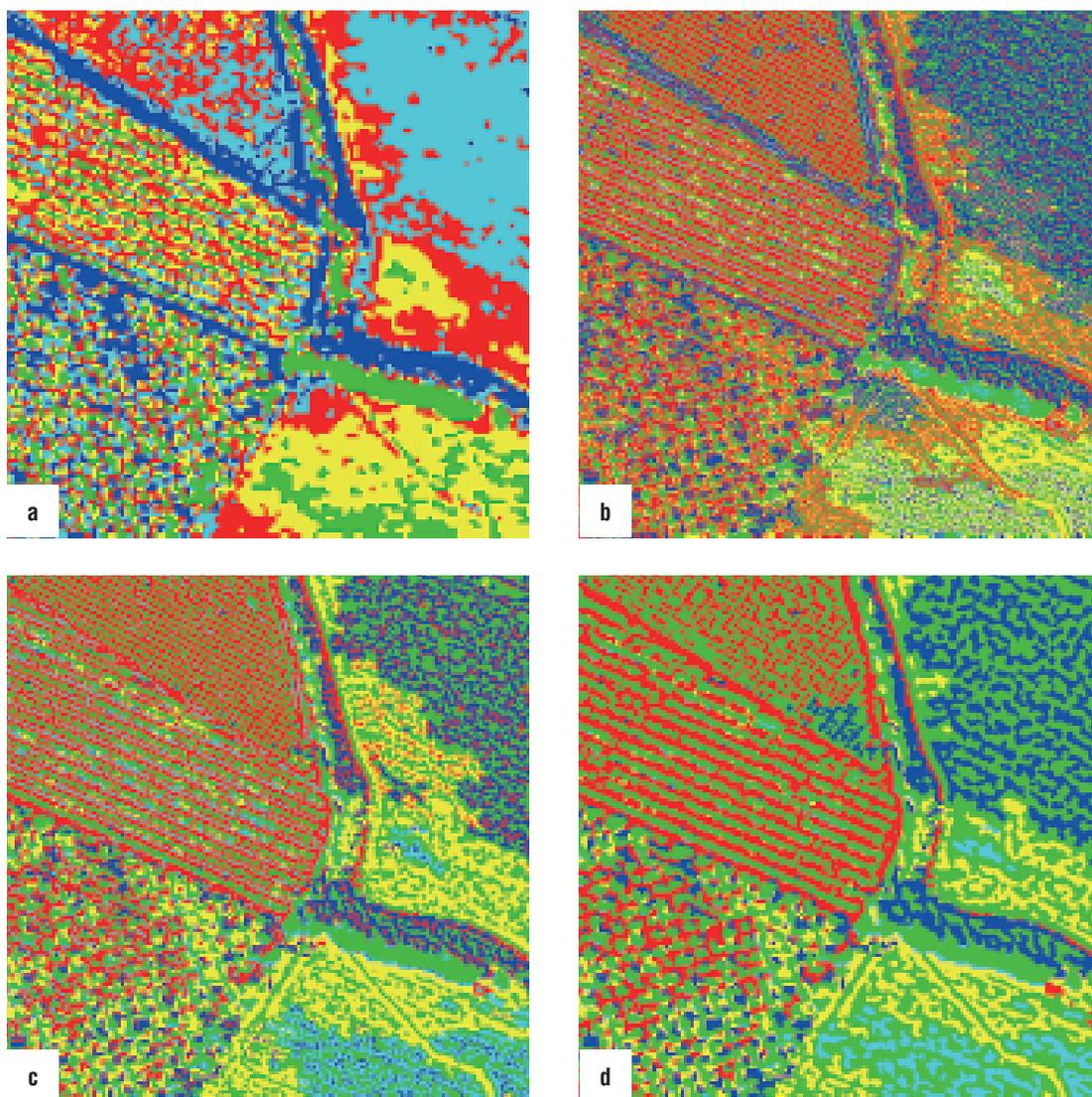


Figura 5. Resultados de clasificación de la imagen Quickbird. a) Basada en píxeles. b), c) y d) Basada en objetos para tres escalas diferentes

del método propuesto, se han incluido en la Figura 6 ampliaciones de las tres áreas de cultivo presentes en la escena, para la imagen pancromática, la imagen clasificada basada en píxeles y las imágenes clasificadas basadas en objetos para tres escalas diferentes. En esta figura, se puede apreciar con detalle, que la metodología propuesta permite en, la escala mas fina, 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, mostrando un comportamiento jerárquico.

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 multiespectral, 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.

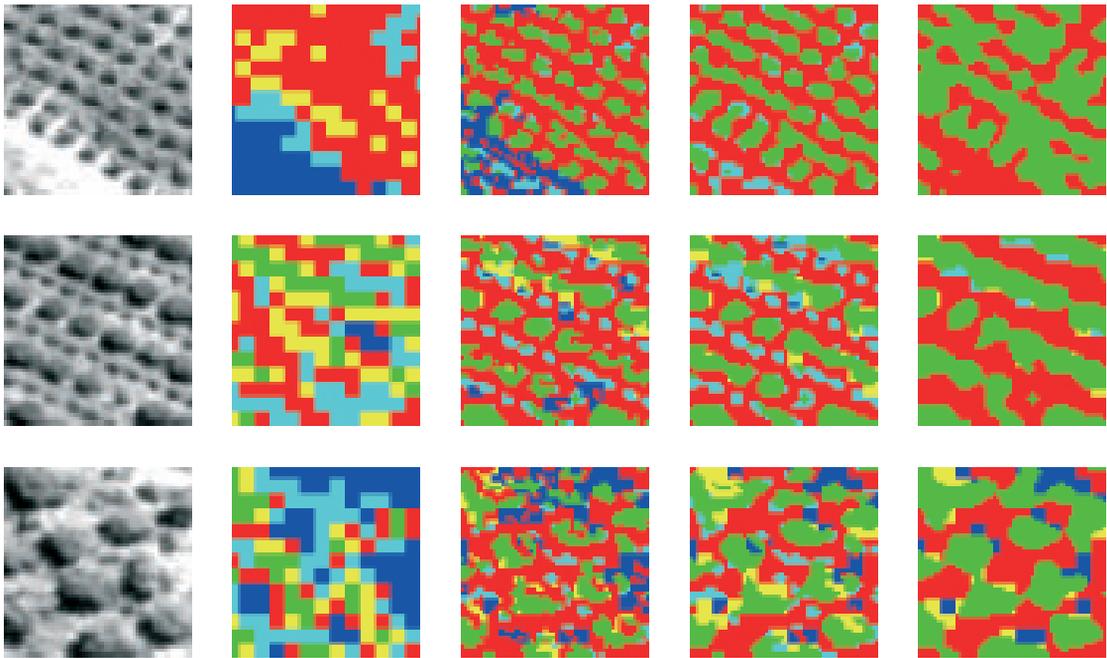


Figura 6: Ampliaciones de la escena para tres localizaciones diferentes. Columna 1ª: imagen pancromática. Columna 2ª: imagen clasificada basada en píxeles. Columnas 3ª-5ª: imágenes clasificadas basadas en objetos para tres escalas diferentes.

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran un mejor comportamiento de la metodología propuesta para zonas de cultivo con texturas regulares que para otras zonas más homogéneas y con patrones de texturas aleatorios.

Los atributos utilizados parecen ser adecuados para las zonas objeto de interés (cultivos y vegetación), pero no para el resto de las cubiertas presentes en la imagen. Ello se puede deber a la forma de caracterizar la textura de las imágenes a partir de valores asociados a los coeficientes Wavelet, por lo que si fuera preciso una adecuada caracterización de estas cubiertas, se debería llevar a cabo la determinación de otros atributos. De hecho, es preciso remarcar que la caracterización de los objetos en estos resultados preliminares se ha llevado a cabo mediante medidas sencillas de los valores espectrales de la imagen multiespectral y valores texturales de la imagen pancromática, por lo que cabe preveer que la utilización de un mayor número de atributos y sobre todo un análisis exhaustivo de los atributos (espectrales, texturales y/o morfológicos) que mejor caractericen la cubierta objeto de estudio en cada caso, mejorarán notablemente los resultados.

Finalmente, cabe señalar que la metodología propuesta define un marco de trabajo en el que es preciso investigar diferentes métodos de segmentación, en estudios futuros.

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-D0911069).

Referencias

- BAATZ, M. 2000, Multiresolution Segmentation : an optimization approach for high quality multiscale image segmentation, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (2000), 58, 3-4, 12-23 (Publisher: Herbert Wichmann Verlag).
- BLASCHKE, T., & STROBL, J. 2001. What's wrong with pixels? *Some recent developments interfacing remote sensing and GIS*. GIS, 6, 12-17.
- BLASCHKE, T. 2010, Object based image analysis for remote sensing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 2-16.

- BLASCHKE, T., STEFAN, L., & GEOFFREY, H. (Eds.). 2008. *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*, Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer.
- 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>)
- CARLEER, A. P., DEBEIR, O., & WOLFF, E. 2005. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations, *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 71, 11, 1285-1294.
- CASTILLA, G., & HAY, G. J. 2008, Images objects and geographic objects, *Object-Based Image Analysis. Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*, Lectures Notes in Geoinformation and Cartography, Springer.
- DUNGAN, J. L., PERRY, J. N., DALE, M. R. T., LEGENDRE, P. CITRON_POUSTY, S., FORTIN, M. J., JAKOMULSKA, A., MIRITI, M., & ROSENBERG, M. S., 2002. A balanced view of scale in spatial statistical analysis. *Ecography* 25 (5), 626-640.
- DUTILLEUX, P. 1987. An implementation of the algorithm à trous to compute the wavelet transform. En *Compt-rendus du congrès ondelettes et méthodes temps-fréquence et espace des phases*, J. Combes, A. Grossman and Ph. Tehanitchian (Eds), 298-304 (Marseille: Springer-Verlag).
- ENVI. http://www.exelisvis.com/portals/0/tutorials/envi/Georeferencing_Registration.pdf
- GONZALO-MARTÍN, C., & LILLO-SAAVEDRA, M. 2004, Control de la calidad espacial y espectral de imágenes de satélite fusionadas mediante el algoritmo wavelet à trous, *Revista de Teledetección*, 22, 47 -53.
- HAY, G. J., & MARCEAU, D. J. 2004, Multiscale object-specific analysis (MOSA): An integrative approach for multiscale landscape analysis. En S. M. Jong y F. D. van der Meer (Eds). *Remote Sensing and Digital Image Processing*, 4, Ch. 3 (Kluwer Academics).
- HAY, G. J., CASTILLA, G., WULDER, M. A., & RUIZ, J. R. 2005, An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, 339-359.
- LANG, S., & 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.
- MALLAT, S. 1998, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press.
- MALLINIS, G., KOUTSIAS, N., TSAKIRI-STRATI, M., & KARTERIS, M. 2008. Object-based classification using Quickbird imagery for delineating forest vegetation polygons in a Mediterranean test site, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 2, 237-250.
- MYNT, S. W., GOBERA, P., BRAZELA, A., GROSSMAN-CLARKE, S., & WENG, Q. 2011, Per-pixels vs object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery, *Remote Sensing of Environment*, 115, 5, 1145-1161.
- PESARESI, M., & BENEDIKTSSON, J. A. 2001. A New Approach for the Morphological Segmentation of High-Resolution Satellite Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 2, 309-320.
- OTSU, N. 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, 62-66.
- PEÑA-BARRAGÁN, J. M., NGUGI, M. K. PLANT, R. E., & SIX, J. 2011. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology, *Remote Sensing of Environment*, 115, 6, 1301-1316.
- WALTER, W. 2004. Object-based classification of remote sensing data for change detection, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, 3-4, 225-238.

Análisis de la respuesta de la temperatura de superficie al crecimiento urbano utilizando series temporales MODIS

Leonardo Paolini

Instituto de Ecología Regional, UNT-CONICET, CC 34, 4107, Tucumán Argentina

Resumen

El crecimiento urbano modifica drásticamente los patrones espaciales de cobertura natural. El remplazo de estas coberturas por superficies impermeables alteran los flujos de energía, generando la formación de «Islas de calor» en las áreas con mayor densidad de edificaciones. En la actualidad la dinámica del crecimiento urbano está asociada a procesos de expansión de las ciudades hacia áreas periféricas. Esto produce cambios significativos y acelerados de la cobertura del suelo, incrementando la superficie impermeable con posibles efectos sobre el clima local.

El objetivo de este trabajo es determinar la respuesta de la temperatura de superficie (TS) ante los procesos de crecimiento urbano, tomando como modelo el conglomerado urbano del Gran San Miguel de Tucumán en el Noroeste de Argentina. Mediante el análisis de series temporales de TS, derivada de imágenes MODIS, se reconstruyó la variación de temperatura entre 2000 y 2010 (diurna y nocturna) asociada a los procesos de densificación y expansión urbana. El aumento de la TS diurna se encuentra más fuertemente asociada con los procesos de expansión urbana, mientras que el aumento de la TS nocturna está asociado más fuertemente con los procesos de densificación urbana. Estos resultados muestran el gran impacto que tienen los procesos de expansión urbana sobre los flujos de energía y la fuerte asociación que existe entre densidad de construcciones y la temperatura nocturna, una característica típica de la formación de «islas de calor urbanas». Debido a que la TS responde de forma directa e inmediata a los cambios en los patrones espaciales de cobertura del terreno, representa un dato central en los análisis de crecimiento urbano y cambio climático asociado a las ciudades. El acelerado proceso de urbanización de la población mundial necesita de este tipo de análisis para poder comprender las relaciones entre urbanización, cambio de uso del suelo y cambio climático con el objetivo de planificar el futuro de las ciudades bajo diferentes escenarios.

Palabras clave: urbanización, temperatura de superficie, MODIS, análisis de series temporales, expansión.

Abstract

Land surface temperature response to urban growth using modis time series analysis

Urban growth drastically changes the spatial patterns of natural cover. Replacement of natural land cover by impervious surfaces alters the energy flows, promoting «heat islands» formation in the areas with the highest density of buildings. At present, urban growth dynamic is associated with sprawl into outlying areas. This produces significant and rapid changes in land cover, increasing impervious surface with possible effects on the local climate.

The objective of this paper is to determine the response of the surface temperature (ST) to urban growth processes, using Gran San Miguel de Tucumán metropolitan area, in Northwestern Argentina, as a study case. By analysing time series ST, derived from MODIS images, I have reconstructed temperature variation between 2000 and 2010 (day and night) associated with the processes of densification and urban expansion. Increase in daytime ST is more strongly associated with urban expansion, while the increase in nocturnal ST is associated more strongly with urban densification processes. These results show the great impact of urban expansion processes of energy flows and the

* Autor para la correspondencia: leopaolini@gmail.com

Recibido: 11-09-12; Aceptado: 19-11-12.

strong association between building density and night temperatures, a typical characteristic of the formation of «urban heat islands». Because ST responds directly and immediately to changes in the spatial patterns of land cover and represents a central factor in the analysis of urban growth and climate change associated with cities. The rapid urbanization of the world population needs this type of analysis in order to understand the relationships between urbanization, land use change and climate change in order to plan the future of cities under different scenarios.

Key words: urbanization, surface temperature, MODIS, time series analysis, sprawl.

Introducción

El cambio climático y el cambio de uso del suelo son los dos principales componentes del cambio ambiental global en ecosistemas terrestres (Vitousek *et al.* 1997, Sala *et al.* 2000). Dentro de estos procesos, la urbanización es una de las formas más extremas de alteración del uso del suelo y una de las modificaciones más persistentes de los cambios producidos por el hombre (Palomino y Carrascal 2006, Shochat *et al.* 2006, McKinney 2006). En general, la expansión urbana provoca la remoción total de la cobertura preexistente y su reemplazo por nuevas superficies, típicamente impermeables, lo que altera los flujos de materia y energía y modifica las tasas de intercambio de calor sensible (calor transferido a la atmósfera) y calor latente (empleado por el agua en la evaporación para cambiar de estado) (Weng *et al.* 2003). De esta manera se forman áreas de mayor temperatura conocidas como «islas de calor urbano (ICU)», características del centro de las ciudades, directamente relacionadas con una mayor densidad de edificaciones (Oke 1982, Oke 1997, Pickett *et al.* 2001, Jenerette *et al.* 2007).

En la actualidad, la población humana está experimentando un cambio significativo hacia una forma de vida predominantemente urbana (Grimm *et al.* 2008). Desde el año 2008 más del 50% de la población mundial (3,2 mil millones de personas) vive en zonas urbanas. Para el año 2030, se estima que unas cinco mil millones de personas (60% de la población mundial) vivirán en zonas urbanas (Mills 2007). La mayor parte de este incremento ocurrirá en las áreas urbanas de tamaño intermedio (1-3 millones de hab.) de países en vías de desarrollo (UNFPA 2011). La cobertura global de áreas urbanas se incrementará desde 605.000 km² en 2000 a poco más de 1.900.000

km² en 2050 (Angel *et al.* 2010, Angel *et al.* 2011), lo que significa la triplicación del área urbana a nivel mundial en solo 50 años. Este crecimiento urbano, presenta una dinámica de uso de la tierra caracterizada por una expansión de las áreas urbanas hacia áreas agrícola-ganaderas periféricas y una disminución en la densidad de construcciones como consecuencia del aumento del poder adquisitivo de los sectores sociales medios y altos, lo que genera un patrón de ocupación urbana del suelo de baja densidad (Glaeser 2011). Esta nueva dinámica de urbanización puede iniciar ciclos de retroalimentación positiva a través del reemplazo de la cobertura natural por nuevas superficies impermeables. Esto puede producir cambios sensibles en los flujos de energía, modificar el clima a escala local y producir un aumento en el consumo energético para refrigeración, lo que aumentaría la emisión de calor, y llevaría a los habitantes a buscar nuevos lugares de vivienda en la periferia, retroalimentando el proceso. El sistema podría entrar en un ciclo de expansión urbana-calentamiento-consumo energético-más calentamiento-más expansión urbana, con consecuencias poco predecibles para los habitantes de las ciudades.

Aunque el área urbanizada cubre menos del 2% de la superficie de las masas terrestres del planeta, y los procesos de urbanización son más evidentes a escala local (reemplazo de la vegetación por superficies impermeables y formación de las «islas de calor urbana») el impacto de las ciudades es global, ya que se apropián de buena parte de la productividad de los ecosistemas naturales y emiten desechos producto de su «metabolismo» (Alberti 2005). Las ciudades son responsables directa e indirectamente, de gran parte de las emisiones de CO₂, por industria, transporte y consumo energético (Glaeser 2011).

La temperatura de superficie (TS) responde de forma directa a los cambios en los patrones espaciales de cobertura del suelo (Oltra-Carrió *et al.* 2010). Los registros de TS derivados de sensores remotos pueden ser de gran utilidad para analizar los patrones de expansión urbana y su impacto sobre la dinámica térmica, de forma espacialmente explícita. En general, los estudios de este tipo analizan la relación entre los cambios de cobertura y la TS a partir de datos satelitales puntuales en el tiempo (una o pocas imágenes por año) (Oltra-Carrió *et al.* 2010, Jenerette *et al.* 2007). Si bien esta es una aproximación valiosa en cuanto a la información que aporta y con una relación costo/beneficio óptima, no contempla las variaciones temporales intra-anales en los patrones de TS o eventos climáticos puntuales (vientos, lluvia, sequías cortas), que pueden afectar particularmente a nuestras escasas muestras de TS. El objetivo de este estudio es analizar la dinámica de los patrones espaciales de temperatura de superficie como consecuencia de los procesos de crecimiento urbano, utilizando series temporales de imágenes satelitales de alta resolución temporal como una forma de integrar las mediciones de TS anuales y disminuir los efectos de eventos extremos puntuales en el tiempo.

Los análisis del impacto de la expansión urbana sobre la temperatura de superficie pueden ayudar a comprender los efectos de los actuales y futuros modelos de crecimiento urbano, no sólo sobre los habitantes de las ciudades sino también sobre la dinámica de la vegetación y la biodiversidad animal asociada. Las relaciones entre urbanización y dinámica de las comunidades vegetales están asociadas a procesos de retroalimentación con características complejas y muchas veces no lineales. En general, se propone que el sobrecalentamiento de las áreas urbanas alteran la fenología (ciclos de crecimiento) de las plantas asociadas, alargando su estación de crecimiento y volviéndolas, posiblemente, más productivas en comparación con los ambientes naturales circundantes. En este sentido, los cambios climáticos generados por los procesos de urbanización (principalmente el aumento de temperatura) son considerados análogos a los cambios sufridos por el clima a escala global

(Neil y Wu 2006, Ziska *et al.* 2003). Es por esto que se pueden utilizar los ecosistemas urbanos como experimentos a pequeña escala o modelos del cambio climático global.

Métodos

El presente trabajo se llevó a cabo tomando como modelo el área metropolitana del Gran San Miguel de Tucumán (GSMT), en el Noroeste de Argentina (25° 50' S, 65° 13' O). La dinámica de crecimiento urbano del GSMT es representativa de las principales ciudades de Argentina, y puede ser extrapolado a otros núcleos urbanos de tamaño intermedio que estén experimentando simultáneamente una densificación de edificaciones en el área central y una expansión urbana de baja densidad en la periferia. Durante las últimas cuatro décadas el GSMT ha triplicado su población, conformando el núcleo urbano más importante del Norte de Argentina, con una población de más de 1.5 millones de habitantes (INDEC 2010). Esto ha generado cambios importantes en los patrones de uso del suelo, por un lado incrementando la densidad de construcciones en el centro de la ciudad y por otro expandiendo su área urbana hacia la periferia. Para evaluar el efecto de los procesos de crecimiento urbano sobre los patrones espaciales de Temperatura de Superficie en el GSMT se analizó el período 2000-2010. El período analizado combina altas tasas de crecimiento urbano en Argentina (INDEC2010) con la disponibilidad de imágenes satelitales de distintas características involucradas en el análisis (MODIS, Landsat 5 TM).

Para determinar los patrones espaciales de expansión urbana se utilizaron dos escenas Landsat 5 TM (17/09/2000 y 16/09/2010). Las imágenes fueron corregidas para lograr coherencia espacial y corregidas radiométricamente para mitigar los efectos atmosféricos sobre los datos de las imágenes (Paolini *et al.* 2006). La reconstrucción de los patrones de expansión urbana espacialmente explícitos se realizó mediante la detección de cambios en las superficies impermeables entre el año 2000 y el año 2010. La clasificación de las imágenes se llevó a cabo utilizando el clasificador Support Vector Machine a partir de muestras de en-

trenamiento extraídas de las imágenes y chequeadas en campo. Como resultado de las clasificaciones se obtuvieron dos mapas temáticos (2000 y 2010) de superficies impermeables y no impermeables. A partir de la diferencia entre estos mapas temáticos se construyó un mapa espacialmente explícito de nuevas superficies impermeables. Se construyó una matriz de error del cambio a partir del mapa de nuevas superficies impermeables, mediante el relevamiento a campo de estructuras urbanas de diversa envergadura (urbanizaciones, supermercados, centros comerciales, barrios cerrados, etc.) con fecha de realización conocida, comprendida dentro del periodo analizado. Los resultados de la matriz de error muestran una precisión general superior al 90%, con valor de kappa de 0.88.

Para la reconstrucción de los patrones espaciales de TS utilicé una metodología basada en el análisis de series temporales de imágenes satelitales MODIS. Trabajé con la serie completa de compuestos cada 8 días de temperatura de superficie (MOD11A2) para los años 2000 y 2010. Esto implicó el procesamiento de 184 escenas (46 escenas por cada año analizado, diurnas y nocturnas). De esta manera obtuve una medida integral de la dinámica intra-anual de TS espacialmente explícita para la totalidad del área de estudio. Para analizar la dinámica de la TS se utilizó el promedio anual de la temperatura diurna y nocturna como una medida integradora de la dinámica anual.

Para evaluar la respuesta de la TS ante los procesos de cambio de uso del suelo en el área urbana del GSMT, se evaluaron tres situaciones diferentes: 1) Área de expansión urbana (nuevas áreas impermeables, típicamente periféricas), 2) Área de densificación urbana (áreas del centro de la ciudad ya impermeabilizadas que incrementaron su densidad de edificaciones, típicamente en altura) y 3) Área Control (áreas rurales aledañas al núcleo urbano, con características geográficas similares, que no sufrieron cambios de cobertura y uso del suelo durante el periodo analizado). La relación entre las diferentes formas de crecimiento urbano (por cambio de uso del suelo y por densificación) fue evaluada mediante una prueba t de student pareada entre los valores de TS de 2000 y 2010, tanto para los registros

diurnos como nocturnos. Además, se realizaron diagramas de dispersión de puntos a partir de las diferencias entre la TS del año 2000 y la TS del año 2010, para las tres áreas analizadas (expansión, centro y control), para evaluar los desvíos en relación a la hipótesis de no cambio de la TS durante el período analizado.

Resultados

El crecimiento urbano en el GSMT durante la última década produjo un aumento de la superficie impermeable de aproximadamente el 20% (83.9 km² en 2000; 100.6 km² en 2010). Las nuevas superficies están localizadas mayormente en la periferia de la ciudad y están asociadas al proceso de expansión urbana. (Figura 1). El crecimiento del área central de la ciudad se debe principalmente al aumento poblacional entre 2000 y 2010 (25.000 habitantes aproximadamente; INDEC 2010) y al marcado aumento en las edificaciones.

Los resultados muestran cambios significativos en los valores de TS en respuesta a los diferentes procesos de crecimiento urbano entre el año 2000 y el año 2010. Los valores absolutos de la TS promedio diurna sufrió un incremento mayor a 1 °K en las áreas de expansión urbana (nuevas superficies impermeables), mayor a 0.5 °K en el centro de la ciudad (donde se produjo un aumento en la densidad de edificaciones) y un incremento aproximado de 0.1 °K



Figura 1. Expansión urbana en el área de estudio (GSMT) para el periodo 2000-2010. En negro, nuevas superficies impermeables agregadas durante el periodo de analisis.

Tabla 1. Variación de la temperatura de superficie (TS) entre 2000 y 2010, para los tres sitios de estudio. A) Temperatura de superficie diurna; B) Temperatura de superficie nocturna

Fecha /sitio	Expansión	Centro	Control
A. Δ de TS diurna (°K)			
2010-2000	+1.2 (*)	+0.65 (*)	+0.14
B. Δ de TS nocturna (°K)			
2010-2000	+1.45 (*)	+1.74 (*)	+0.11

(*) Estadísticamente significativo ($p < 0.01$).

en los sitios control (Tabla 1.A). De forma similar, los valores absolutos de la TS promedio nocturna aumentaron más de 1 °K en las áreas de expansión, más de 1.5 °K en el centro y aproximadamente 0.1 °K en los sitios control (Tabla 1.B).

Las diferencias entre los valores de TS del año 2000 y 2010 fueron evaluadas estadísticamente para analizar su significancia. Los resultados de los análisis estadísticos muestran que para los sitios de expansión urbana y centro las diferencias son significativas ($p < 0.001$), tanto en los registros diurnos como nocturnos, lo que permite asociar estas variaciones a los procesos de crecimiento urbano ocurridos en las áreas analizadas. Si bien las diferencias en los valores de TS registradas están dentro del margen de error de las estimaciones derivadas de sensores remotos (alrededor de 1 °K), los resultados muestran un patrón consistente y estadísticamente significativo de la relación entre crecimiento urbano y aumento de TS. Las diferencias en los sitios control no son estadísticamente significativas, mostrando que no hubo variaciones relevantes entre los valores TS del año 2000 y los del año 2010 (Figura 2).

Los gráficos de dispersión muestran como las diferencias en la TS diurna y nocturna se comportan frente a la hipótesis de no cambio en la TS, entre 2000 y 2010. En concordancia con los resultados anteriores, la TS diurna de las áreas de expansión muestran el mayor desvío (positivo) con respecto a tendencia lineal, mientras que la TS del área central muestra un desvío positivo menor y los sitios control no muestran prácticamente ningún desvío. En el caso de la TS nocturna, las áreas de expansión y del centro de la ciudad muestran un marca-

do incremento en prácticamente todo el rango de valores, mientras que los sitios control se mantiene prácticamente sin variaciones.

Conclusiones y discusión

Los procesos de urbanización están fuertemente asociados a cambios de uso del suelo, sobre todo en relación a los nuevos patrones de expansión urbana de baja densidad. Si bien, en general, se propone que el aumento de densidad de ocupación del suelo (i.e. crecimiento en altura) es el factor determinante para la formación de la «isla de calor urbana», las tendencias recientes de expansión urbana acelerada tienen efectos significativos en la modificación de la temperatura local, principalmente debido a la modificación de los flujos de energía como resultado de la impermeabilización de suelo.

Los resultados del presente trabajo muestran que el aumento de la temperatura de superficie está directamente relacionado con el crecimiento urbano, como consecuencia tanto de procesos de densificación urbana como de expansión urbana. La expansión de la ciudad hacia áreas periféricas (expansión) produjo un incremento importante de la TS, tanto diurna como nocturna, mientras que el crecimiento en densidad de construcciones (principalmente en altura) del centro de la ciudad tuvo un impacto más importante sobre la TS nocturna. Los patrones de cambio encontrados refuerzan los supuestos de formación de las «islas de calor urbanas» como consecuencia de una mayor captación de energía durante el día por parte de las edificaciones y su posterior liberación

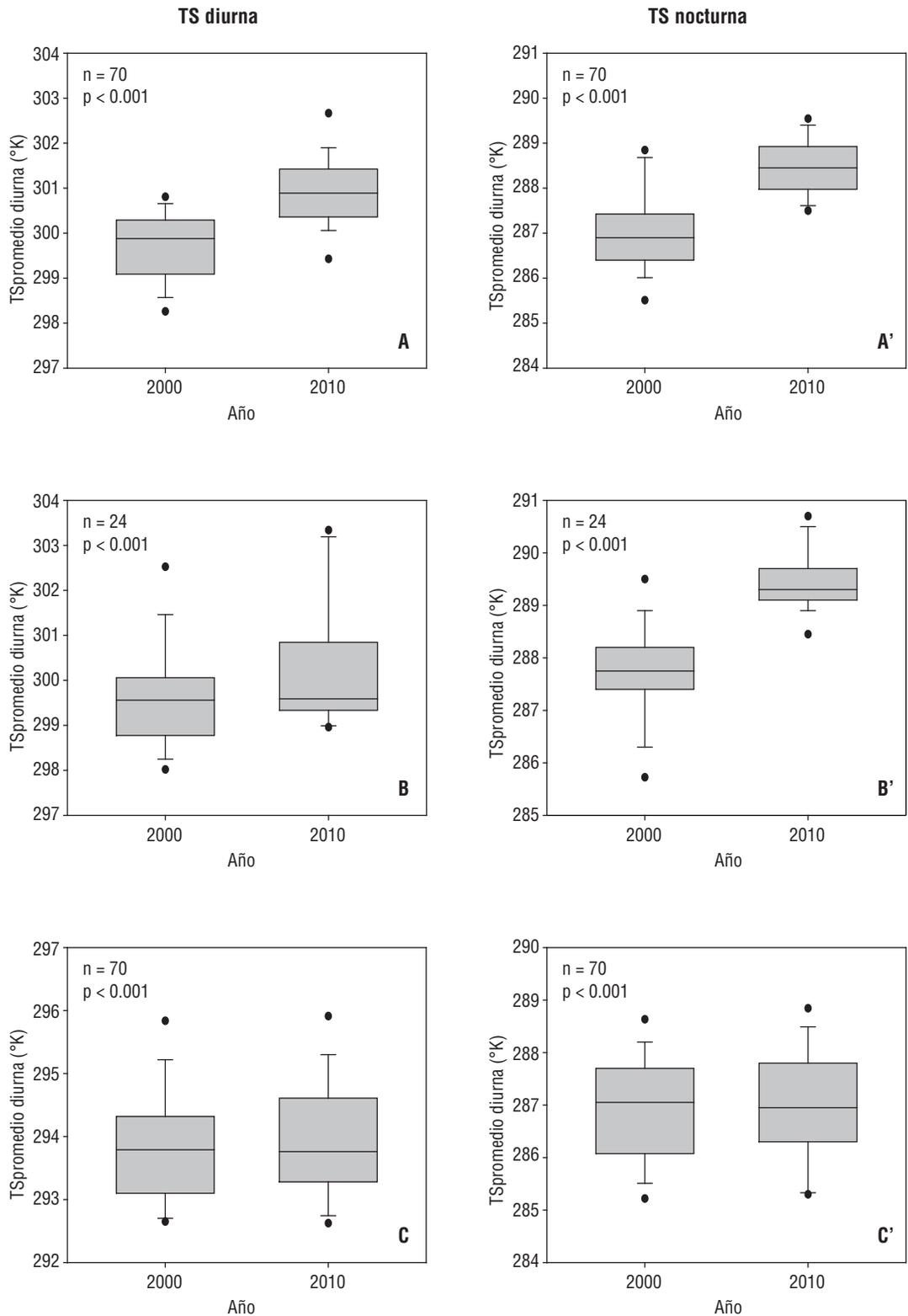


Figura 2. Valores de Temperatura de Superficie (diurna y nocturna) en los tres sitios analizados, para el periodo 2000-2010. **A** y **A'** Expansión; **B** y **B'** Centro; **C** y **C'** Control.

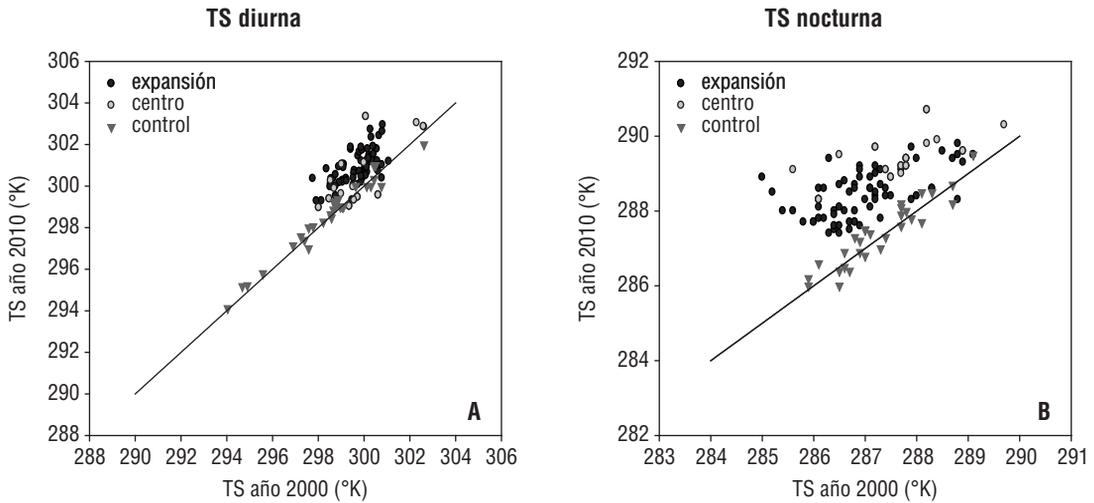


Figura 3. Relación entre la temperatura de superficie de los años 2000 y 2010, en los tres sitios analizados. **A)** Temperatura de superficie diurna; **B)** Temperatura de superficie nocturna.

durante la noche. Si bien las ciudades siguen creciendo en densidad de construcciones, la dinámica más reciente de expansión urbana hacia áreas rurales de la periferia plantea nuevas preguntas acerca del efecto del crecimiento urbano sobre los cambios climáticos a escala local. Las áreas de expansión presentan menos inercia térmica posiblemente debido a la menor densidad de cemento y una menor altura de sus edificaciones, lo que hace que las construcciones acumulen menos energía y que la circulación del aire se vea menos obstaculizada por los edificios. Si esta hipótesis fuera correcta uno esperaría encontrar una relación directa entre la temperatura de superficie nocturna y la altura media de las diferentes zonas dentro de una ciudad o entre ciudades con condiciones climáticas similares.

A su vez, el reemplazo de áreas naturales como consecuencia de la expansión urbana puede incrementar considerablemente las superficies impermeables de las ciudades, generando alteraciones no solo en los flujos de energía sino también en la dinámica hídrica (menor evapotranspiración, mayor escorrentía) lo que puede reforzar el calentamiento de las áreas urbanas más allá de sus límites geográficos. En este sentido, los estudios de este tipo son relevantes para poder construir un modelo global de los efectos del crecimiento urbano sobre los patrones climáticos locales. Esto nos permitiría no sólo predecir las alteraciones futuras del

clima, sino también modelar el consumo energético futuro (directamente relacionado con el calentamiento urbano) y las emisiones de CO₂, manejar exitosamente la vegetación urbana y en definitiva proponer acciones que tiendan a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

Agradecimientos

Al Dr. Ezequiel Araoz, cuyos aportes contribuyeron a mejorar los análisis de los datos.

Este proyecto fue financiado en parte por CONICET, Argentina.

Las imágenes MODIS fueron obtenidas a través del Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de NASA, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (https://lpdaac.usgs.gov/get_data).

Referencias

- ALBERTI, M. 2005. The effects of urban patterns on ecosystem function. *Int. Regional Sci. Rev.* 28, 168-192.
- ANGEL, S., PARENT, J., CIVCO, D. L., BLEI, A. M., & POTERE, D. 2010e. A planet of cities: Urbanland cover estimates and projections for all countries, 2000-2050. Working Paper. *Cambridge MA: Lincoln Institute of Land Policy.*

- ANGEL, S., PARENT, J. CIVCO, D. L. & BLEI, A., M. 2011. Making Room for a Planet of Cities (Policy Focus Report). *Lincoln Institute of Land Policy Inventory ID PF027*; English; ISBN 978-1-55844-212-2. http://www.lincolnst.edu/pubs/1880_Making-Room-for-a-Planet-of-Cities-urban-expansion.
- GLAESER, E. L. 2011. Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier. *Macmillan Ed.*.
- GRIMM, N. B., FAETH, S. H., GOLUBIEWSKI, N. E., REDMAN, C. L., WU, J., BAI, X., & BRIGGS, J. M., 2008. Global Change and the Ecology of Cities. *Science* 319, 756-760.
- INDEC, Censo 2010. <http://www.sig.indec.gov.ar/censo2010/>
- JENERETTE, G. D., HARLAN, S. L., BRAZEL, A., JONES, N., LARSEN, L., & STEFANOV, W. L. 2007. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology* 22: 353-365.
- MCKINNEY, M. L. 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biol. Conserv.* 127, 247 -260.
- MILLS, G. 2007. Cities as agents of global change. *International Journal of Climatology* 27: 1849-1857.
- NEIL, K., & WU, J. 2006. Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review. *Urban Ecosystems* 9: 243-257.
- OKE, T. R. 1982. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108:1-24.
- OKE, T. R. 1997. Urban climates and global change, in: Perry, A., Thompson, R. (Eds), *Applied climatology: principles and practices*, Routledge, London, pp. 273-287.
- OLTRA-CARRIO, R., SOBRINO, J. A., GUTIERREZ ANGONESE, J., GIOIA, A., PAOLINI, L. & MALIZIA, A. 2010. Estudio del crecimiento urbano, de la estructura de la vegetación y de la temperatura de la superficie del gran san miguel de tucumán, Argentina. *Revista de Teledeteccion* 34: 69-76.
- PALOMINO, D., & CARRASCAL, L. M. 2006. Urban influence on birds at a regional scale: A case study with the avifauna of northern Madrid province. *Landscape and Urban Planning* 77: 276-290.
- PAOLINI, L., GRINGS, F., SOBRINO, J. A., JIMNEZ MUÑOZ, J. C., & KARSZENBAUM, H. 2006. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies. *International Journal of Remote Sensing* 27 (4): 685-704.
- PICKETT, S. T. A., CADENASSO, M. L., GROVE, J. M., NILON, C. H., POUYAT, R. V., ZIPPERER, W. C., & COSTANZA, R. 2001. Urban Ecological Systems: Linking Terrestrial Ecological, Physical, and Socioeconomic Components of Metropolitan Areas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 32, 127-157.
- SALA, O. E. (y 18 más). 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287, 1770-1774.
- SHOCHAT, E., WARREN, P., FAETHS, S., MCLNTYRE, N., & HOPE, D. 2006 From patterns to emerging processes in mechanistic urban ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 21(4): 186-191.
- UNFPA. 2011. Informe sobre el estado de la población mundial 2011: 7 mil millones de personas: su mundo, sus posibilidades. http://www.un.orghttp://www.unfpa.org/webdav/site/global/shared/documents/SWP_2011/SP-SWOP2011.pdf
- VITOUSEK, P. M., MOONEY, H. A., LUBCHENKO, J., & MELILLO, J. M. 1997. Human domination on earth's ecosystems. *Science* 277,494-499.
- WENG, Q., LU, D., & SCHUBRING, J. 2003. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 89 (4): 467-483.
- ZISKA, L. G., GEBHARD, D. E., FRENZ, D. A., FAULKNER, S., SINGER, B. D., & STRAKA, J. 2003. Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and public health. *J. Allergy Clin Immunol* 111:290-295.

Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección

C. Mattar, A. Santamaría-Artigas y C. Durán-Alarcón

*Laboratory for Research in Environmental Sciences (LARES), Dept. Ciencias Ambientales
y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas,
Universidad de Chile, Av. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile*

Resumen

El Parque Nacional Torres del Paine (PNTP) se encuentra en la Patagonia chilena y es una de las atracciones naturales y científicas más importantes de Chile. Sin embargo, las condiciones meteorológicas, en conjunto con la cobertura de la zona y la elevada cantidad de turistas, convierten a esta área natural en un escenario óptimo para la generación de incendios. A finales de 2011, se originó un incendio en el interior del PNTP. El área siniestrada por el incendio así como las coberturas afectadas no ha sido analizada hasta la fecha. Este trabajo tiene por objetivo la estimación del área afectada en el incendio a partir de imágenes remotas provenientes del sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) en modo SLC-off (*Scan Line Corrector - off*) de la plataforma Landsat 7, productos generados a partir de los datos entregados por el sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) correspondiente a la reflectancia de la superficie (MOD09GC) y el mapa de cobertura de superficie GLOBCOVER 2009, el cual ha sido generado por la Agencia Espacial Europea (ESA) a partir de datos del sensor *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS). El método de interpolación de Delaunay fue utilizado para corregir el efecto del SLC-off de las imágenes ETM+. El índice de la Razón Normalizado de Área Quemada (ΔNBR) fue utilizado para estimar el grado severidad del incendio así como el área quemada. Se utilizó también un análisis visual y textural para la determinación de la superficie afectada por el incendio.

El área total afectada por el incendio abarca una superficie de 18.059 ha, equivalente al 12% de la superficie total del parque que está cubierta por vegetación, con un error equivalente al ~1%. Las coberturas más afectadas, según la clasificación GLOBCOVER 2009, corresponde a bosque abierto y matorral leñoso, estimándose en 11.726 ha, de las cuales el 80% sufrió algún grado de severidad según el índice ΔNBR . Las imágenes ETM+ corregidas del efecto del SLC-off fueron comparadas con las imágenes MODIS obteniéndose un R^2 de 0,75 y 0,78 para el área de estudio en los años 2005 y 2012, respectivamente. El resultado obtenido muestra que el método de interpolación de Delaunay puede ser una herramienta útil para la corrección de imágenes ETM+ SLC-off con el objetivo de determinar las superficies afectadas por incendios.

Palabras clave: Parque Nacional Torres del Paine, Chile, Área Quemada, Landsat 7 ETM+, Modis, NBR, Globcover 2009.

Abstract

Estimating the burned area of the Torres del Paine National Park using remote sensing data

The Torres del Paine National Park (TPNP), located in the Chilean Patagonia, is one of the most important scientific and wildlife attractions of Chile. However, the local meteorological conditions in addition to the land cover types dramatically increase the risk of wildfire generation. At the end of 2011, an important wildfire was officially confirmed in the central part of TPNP, the burned areas as well as the affected cover types have not yet been estimated. The main objective of this paper is the estimation of the burned area based on remote sensing imagery from Landsat-

* Autor para la correspondencia: cmattar@uchile.cl
Recibido: 13-09-12; Aceptado: 19-11-12.

7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) sensor in SLC-off mode (Scan Line Corrector - off), the reflectance products generated by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor (MOD09GC) and the GlobCover 2009 classification generated by the European Space Agency (ESA) from Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) data. Delaunay's interpolation methods were used to correct the SLC-off effect of the ETM+ imagery. The Normalized Burned Ratio index (ΔNBR) was used to estimate the severity degree of the land cover types affected by the fire in addition to the quantifying burned area.

The total burned area was estimated in 18,059 ha, equivalent to 12% of TPNP's total surface cover by vegetation including and equivalent error of about $\sim 1\%$. The most affected land cover types, according to the GLOBCOVER 2009 classification, were open forest and grassland or woody vegetation, with an estimate of 11,726 ha, from which an 80% suffered some degree of burned severity according to the index ΔNBR . ETM+ imagery corrected from the SLC-off effect was compared to MODIS imagery achieving a R^2 of 0.75 and 0.78 for the study area on the years 2005 and 2012 respectively. This shows that Delaunay's interpolation method can be a useful tool for the correction of ETM+ SLC-off imagery that will be used for the determination of areas affected by wildfires.

Key words: Torres del Paine National Park, MODIS, Landsat 7 ETM+, Burned Area, Normalized Burned Ratio, Globcover 2009.

Introducción

La Patagonia chilena es una de las áreas naturales más importantes del mundo. Sus características bióticas, climáticas y geomorfológicas la convierten en una de las principales reservas de vida silvestre en el planeta, contando con invaluables atractivos turísticos y científicos. Uno de los principales atractivos corresponde al Parque Nacional Torres del Paine (PNTP), que cuenta con diversos sitios naturales de interés tales como glaciares, lagos, ríos, macizos montañosos (caracterizados principalmente por las llamadas «Torres del Paine») y diferentes tipos de vegetación. Esta zona ha sido afectada por numerosas actividades antrópicas, ya que entre los años 1900 y 1960 se realizaron extensivas labores de ganaderías, creando lugares de estancias, entre otras actividades de fuerte impacto ambiental, dando paso a cambios en el uso del suelo y la generación de incendios forestales. Posteriormente y con el objetivo de proteger la flora y fauna de la zona, se crea oficialmente el Parque Nacional Torres del Paine el 13 de mayo del año 1959 y pasa a formar parte del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado de Chile. Seguidamente, el 28 de abril de 1978 fue declarado como Reserva de la Biósfera, por la UNESCO, formando parte de de las zonas representativas de los distintos ecosistemas del mundo.

En la actualidad, el PNTP es visitado frecuentemente (150 mil visitantes en 2010), en su mayoría por turistas extranjeros. Además, el PNTP ha sido motivo de diversas investigaciones científicas, en las que se destacan las de tipo paleoclimáticas (Solari *et al.*, 2010; González & Aydin, 2008; Marden, 1997), geológicas (Leuthold *et al.*, 2012; Domínguez-Villar, 2006), de ecología y paisaje (Bank *et al.*, 2003; Franklin *et al.*, 1999), glaciología (Keller *et al.*, 2007), entre otras.

Entre las diversas coberturas del PNTP pueden distinguirse principalmente glaciares, cuerpos de agua, rocas, suelo desnudo, pastizales y vegetación austral caracterizada por especies arbustivas siempreverdes (Bontemps *et al.*, 2011a). Estas coberturas, así como las condiciones meteorológicas australes, generan una intrincada red de conectividad dentro del parque, lo que genera importantes complicaciones ante eventos extremos como incendios, convirtiéndose en la principal amenaza para la flora y fauna del parque.

Actualmente se han desarrollado diversas tecnologías que permiten la rápida detección y cuantificación de las superficies afectadas por un siniestro. Una de las formas para la estimación de áreas quemadas en una superficie es a partir de información proveniente de sensores remotos sean estos de alta o baja resolución espacial (Miller & Yool, 2002; Merino de Miguel *et al.*, 2004; Roldán Zamarrón *et al.*, 2005;

González-Alonso *et al.*, 2007; De Santis & Chuvieco, 2008; Oliva *et al.*, 2011). Sin embargo, los sensores que cuentan con una alta resolución espacial presentan baja resolución temporal, por lo cual se vuelve necesario complementar el estudio temporal de las áreas afectadas por los incendios mediante la utilización de información proveniente de sensores remotos de alta resolución temporal y que presenten características comparables. Uno de los sensores con un gran potencial para determinar las áreas quemadas en zonas heterogéneas es el sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo de la plataforma Landsat-7. Sin embargo, los datos entregados por este sensor presentan un problema de bandeo (*striping*) en todas sus bandas a partir de junio de 2003 debido al mal funcionamiento del *Scan Line Corrector* (SLC), cuya función consiste en compensar los efectos del movimiento de la plataforma en la imagen. El resultado es la generación de líneas de píxeles en la imagen que no presentan información denominándose modo «SLC-off». Pese a este problema, trabajos recientes han demostrado la utilidad de estos datos en la estimación de área quemada (Chuvieco *et al.*, 2012).

El 27 de diciembre del 2011 se declaró un incendio de origen antrópico en la zona del Lago Grey en el PNTP. El difícil acceso a la zona donde se inició el fuego, junto a vientos superiores a los 100 km h⁻¹, facilitaron la rápida propagación del siniestro, prolongándose por un periodo de casi 70 días y afectando a una vasta superficie. Sin embargo, todavía no se ha estimado las reales dimensiones del impacto del fuego sobre las coberturas de vegetación. El objetivo del presente trabajo es la estimación del área total afectada por el incendio del año 2011 a partir de imágenes ETM+ y productos de reflectancia obtenidos del sensor MODIS.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: En la sección 2 se detallan los datos utilizados y el área de estudio correspondiente al PNTP. En la siguiente sección, se detallan los pasos metodológicos que se utilizaron para la estimación del área total quemada. Posteriormente en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se presenta una discusión y las conclusiones finales de este trabajo.

Área de estudio y datos de teledetección

Parque Nacional Torres del Paine (PNTP)

El PNTP se encuentra ubicado en el extremo austral de Chile en la provincia de Última Esperanza, región de Magallanes y la Antártica Chilena (Figura 1). Tiene una superficie total cercana a las 240 mil ha, la cual puede variar entre 235 a 242 mil ha. Esto se debe a que dentro de los límites del parque existe una zona privada de libre tránsito no siempre considerada como área oficial. La superficie del PNTP, se extiende desde las estepas patagónicas en el este hasta los campos de hielo ubicados en el oeste. La elevación varía entre los 100 y los 2500 m.s.n.m, siendo 500 m.s.n.m donde ocurre el bioma estepa (Pisano, 1974). La cobertura predominante corresponde a matorral siempreverde (Bontemps *et al.*, 2011a).

Según la clasificación de Köppen (1918), el clima de la zona de estudio es del tipo «oceánico frío» encontrándose fuertemente influenciado por vientos provenientes del sur-oeste (Moreno *et al.*, 2012). Las precipitaciones se concentran principalmente en los meses de invierno austral en forma de nieve y alcanzan una media anual de 800 mm (Wittmer *et al.*, 2010), por otra parte la temperatura media anual de la región es de 6.5 °C (Endlicher, 1991).

Datos (Modis-ETM+)

Se utilizaron datos del sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) del 3 de enero de 2005 y del 24 de febrero de 2012. Fueron seleccionadas aquellas imágenes en donde la cobertura nubosa fuera la menor sobre la escena correspondiente al *Path* 230 y al *Row* 96, la cual representa íntegramente la zona donde ocurrió el incendio. Por otra parte, se utilizaron los productos de reflectancia de superficie MOD09GQ (Vermote *et al.*, 2011) generados a partir de la información entregada por el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Las imágenes ETM+

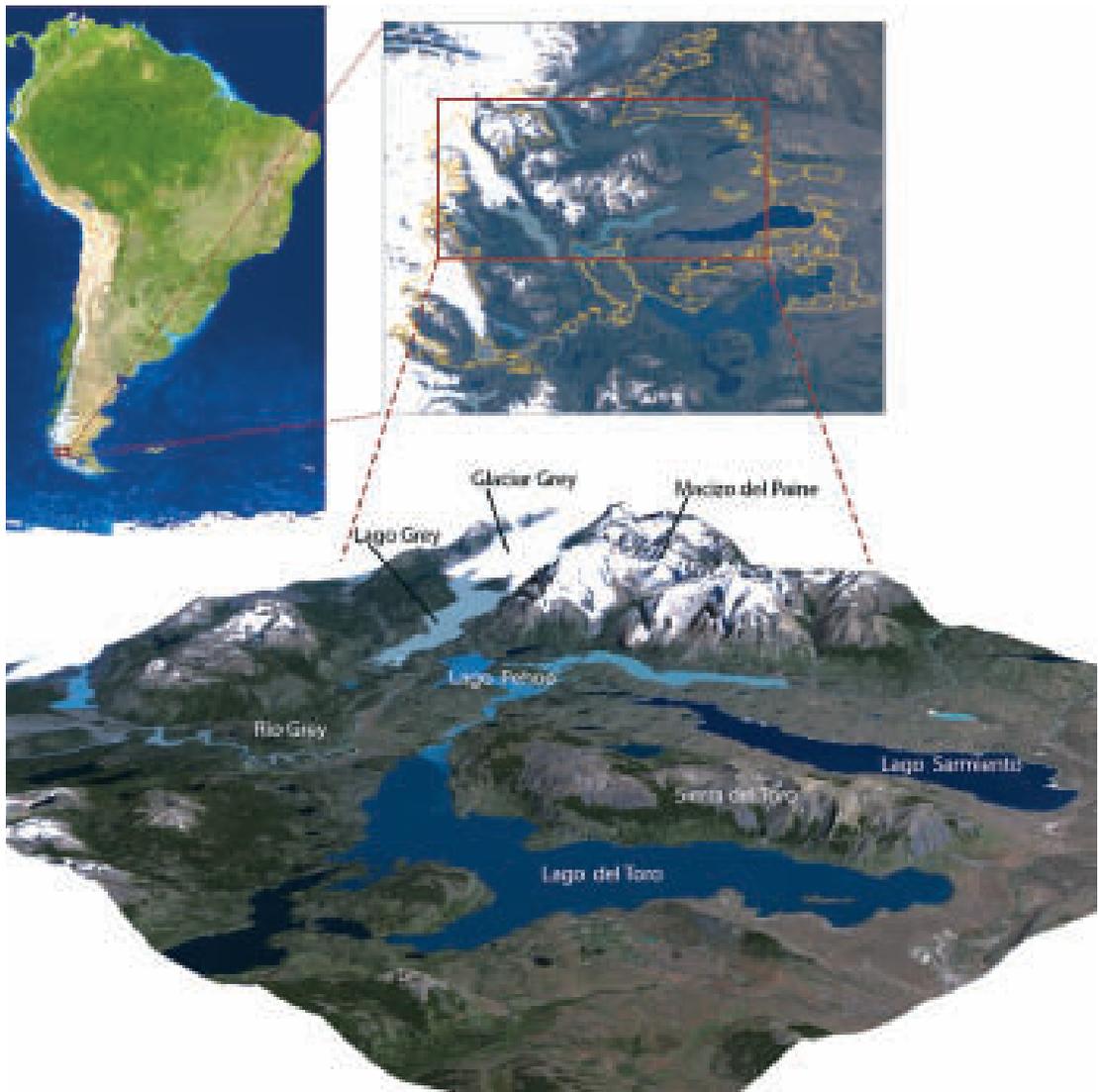


Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Torres del Paine. Se muestra la imagen ETM+ corregida del 3 de enero del 2005.

fueron descargadas del servidor de imágenes satelitales del *U.S. Geological Survey* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) y los productos MODIS fueron descargadas del servidor <http://reverb.echo.nasa.gov/> generado por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA)

Mapa de cobertura

Con el objetivo de cuantificar el tipo de superficie afectada por el incendio, datos del proyecto Global Cover 2009 (Bontemps *et al.*, 2011a) fueron utilizados en este trabajo. Esta

información ha sido generada a partir de datos del sensor *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) durante 12 meses entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del 2009. La resolución espacial es de 300 x 300 m y considera 23 tipos de cobertura. Si bien es cierto, el tipo de mapa de cobertura es difícilmente comparable con otras clasificaciones de cobertura a escala global (Neumann *et al.*, 2007; Kaptué *et al.*, 2011; Fritz *et al.*, 2011), el mapa de clasificación GLOBCOVER 2009 ha sido recientemente utilizado en diversas áreas detalladas en Bontemps *et al.* (2011b). La Tabla 1 resume los datos utilizados en este trabajo.

Tabla 1. Datos utilizados: Landsat, Modis y cobertura global

Datos	Fecha	Path- Row/Swath	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Descripción	
					Banda	μm
Landsat-7 ETM+ SLC-Off	03-ene-05 24-feb-12	230-96	30 m	16 días	Reflectancia de superficie	
					1	0.450-0.515
					2	0.525-0.605
					3	0.630-0.690
					4	0.750-0.900
					5	1.550-1.750
					6	10.400-12.500
7	2.090-2.350					
Modis Daily Reflectance MOD09GQ	03-ene-05 24-feb-12		250 m	Diaria	Reflectancia de superficie	
					1	0.620-0.670
					2	0.841-0.876
GLOBCOVER 2009	Dic-2010	Global	300 m	Mapa	Cobertura de la superficie	

Metodología

La metodología llevada a cabo para estimar el cálculo del área quemada del PNTP se desarrolló en tres etapas. La primera etapa corresponde a la corrección de las imágenes ETM+ SLC-off con el objetivo de estimar el área quemada evitando los efectos de bandeo. La segunda etapa tiene relación con el cálculo de índices de área quemada y la estimación de las coberturas que fueron más afectadas por el incendio. Finalmente, la tercera etapa tiene relación con la comparación en la estimación del área quemada a partir de imágenes ETM+ y los productos de reflectancia provenientes del sensor MODIS. En las secciones siguientes se detallan cada una de estas etapas.

Calibración Radiométrica ETM+ y corrección de bandas

Las imágenes ETM+ correspondientes al 3 de enero del 2005 y al 24 de febrero del 2012 fueron calibradas según el procedimiento establecido en Chander *et al.* (2009). Sin embargo, uno de los problemas más significativos es el bandeo presente en las imágenes efecto del SLC-off, que genera lí-

neas sin datos en la imagen. En Chuvieco *et al.* (2012), se presenta una metodología para determinar el área afectada por un incendio, contemplando los vacíos que presentan estas imágenes. Sin embargo, varios autores señalan la posibilidad de abordar la corrección de este efecto a través de métodos de interpolación (Zhang *et al.*, 2007; Pringle *et al.*, 2009). En este trabajo, cada escena ETM+ fue interpolada a partir de triangulaciones de Delaunay relacionadas con estructuras generadas a partir del diagrama de Voronoi. Este método aparece bien descrito en De Berg *et al.* (2008) y permite la interpolación a una superficie que no presenta datos a partir de una triangulación basada en los datos vecinos. Una muestra del efecto que presenta la interpolación sobre la imagen se aprecia en la Figura 2. Sin embargo, los valores resultantes de esta interpolación no necesariamente corresponderán a valores con significancia física. Este método de interpolación se aplicó a todas las bandas espectrales de la escena ETM+ adquirida para las dos fechas analizadas en este trabajo. Una vez corregidos los efectos del SLC-off en todas las bandas, se corrigió el efecto atmosférico con el fin de obtener la reflectancia a nivel de la superficie utilizando para ello el método propuesto por Chavez (1996).

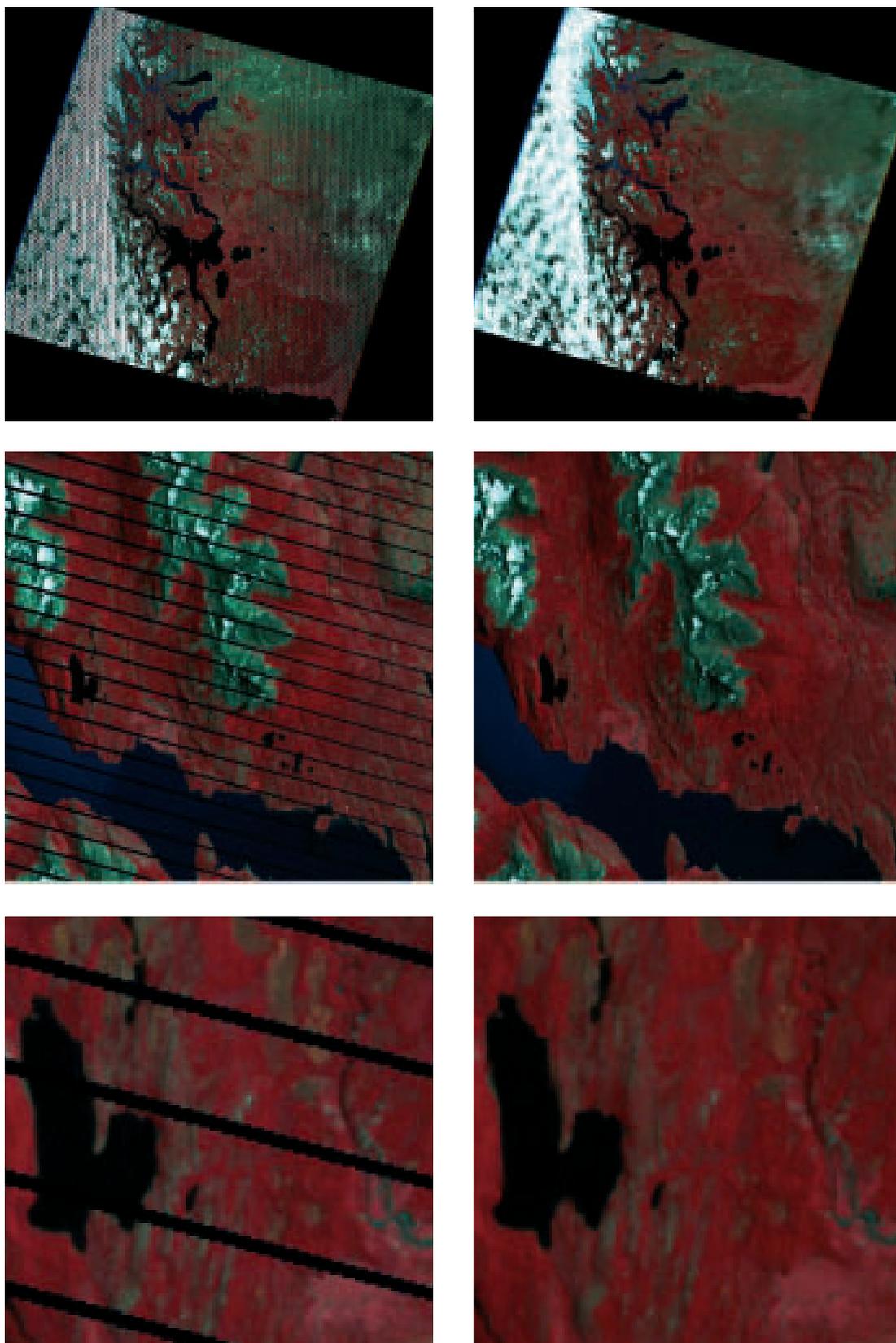


Figura 2. Imagen ETM+ (*path* 230; *row* 96) del 3 de enero del 2005. En la columna de la izquierda se muestra la imagen original, y en la columna de la derecha la imagen resultante después de la interpolación de Delaunay.

Estimación del área quemada

La estimación del área quemada se realizó mediante la digitalización sistemática del área quemada en base a la imagen ETM+ correspondiente al 24 de febrero del 2012. Análisis visual, espectral y a partir de índices de vegetación como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) fueron utilizados para comparar diferentes capas de información y obtener un área representativa del incendio. Por otra parte, se estimaron otros índices complementarios, como el *Normalized Burned Ratio* (NBR), el cual se muestra en la Ecuación [1].

$$NBR = \frac{B_4 - B_7}{B_4 + B_7} \quad [1]$$

donde B4 y B7 corresponden a las bandas del sensor ETM+ con una longitud de onda central de 0,82 y 2,22 mm respectivamente. Este índice permite la caracterización de las superficies quemadas en el grado en que éstas fueron afectadas y su posterior regeneración. Una vez calculado este índice, se procede a estimar el área afectada aplicando este mismo una escena anterior al incendio, estimando el área afectada por el incendio según la diferencia entre ambos índices como lo muestra la Ecuación (2).

$$\Delta NBR = \left(\frac{B_4 - B_7}{B_4 + B_7} \right)_{pre\ incendio} - \left(\frac{B_4 - B_7}{B_4 + B_7} \right)_{post\ incendio} \quad [2]$$

siendo ΔNBR la diferencia del área quemada la cual puede ser asimilada siguiendo un patrón de severidad. La Tabla 2 muestra una clasificación adaptada en relación a los valores de ΔNBR .

Este índice ha sido ampliamente utilizado en diversos trabajos, incluyendo comparacio-

nes con otros métodos e índices de vegetación (Chuvienco *et al.*, 2002; Cocke *et al.*, 2005; Epting *et al.*, 2005; De Santi & Chuvienco, 2007; Loboda *et al.*, 2007; Miller & Thode, 2007; Escuin *et al.*, 2008; De Santi & Chuvienco, 2009). A pesar de que el es un indicador del grado de severidad de incendios, la aplicabilidad de este índice puede variar según las circunstancias del siniestro y las condiciones geográficas, entre otras variables. Finalmente, el área quemada obtenida a partir de la integración de los métodos anteriores, fue evaluada a partir de una visita in-situ al PNTP.

Comparación MODIS-Landsat-7 ETM+

Como una medida de evaluación de los resultados obtenidos a partir de las imágenes ETM+, se utilizaron los productos MODIS para estimar la fiabilidad de la interpolación. Con los resultados de la interpolación realizada, ambas escenas ETM+ fueron remuestreadas a 250 m utilizando un método simple de regrillado basado en interpolación bi-lineal. El NDVI estimado en cada una de estas escenas fue comparado con los valores de NDVI calculados a partir de valores de reflectancia entregados por el producto MOD09GQ de la misma fecha. Esta comparación corresponde a un análisis de linealidad entre ambos productos y se eliminaron de la comparación aquellos valores de la escena ETM+ que no estuvieran afectados por el bandeo. De esta manera, se compararon sólo los valores interpolados de la imagen ETM+ con los valores de NDVI obtenidos de MODIS. Debido a la presencia de nubes en las escenas del año 2005 y 2012, se aplicó el algo-

Tabla 2. Índice de severidad de área quemada.

ΔNBR	Severidad del área quemada
< -0.25	Alto crecimiento post-incendio
-0.25 a -0.1	Bajo crecimiento post-incendio
-0.1 a +0.1	No quemado
0.1 a 0.27	Área quemada de baja severidad
0.27 a 0.44	Área quemada de severidad media
0.44 a 0.66	Área quemada de severidad media-alta
> 0.66	Área quemada de severidad alta

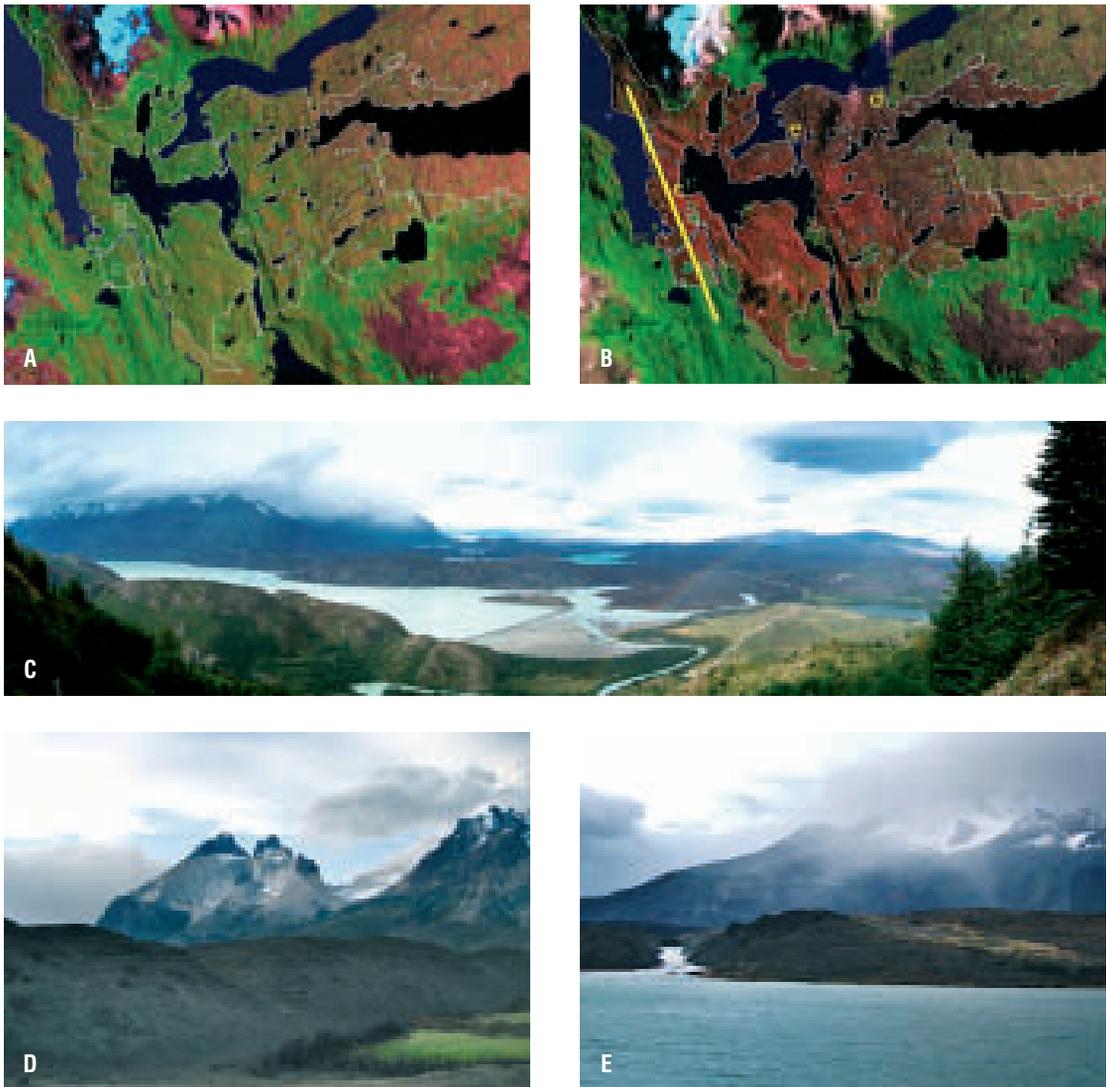


Figura 3. Estimación del Área quemada sobre una imagen falso color correspondiente a enero del 2005 (a) y febrero del 2012 (b). Se muestran además fotografías in-situ correspondientes a los distintos sitios siniestrados en c, d y e.

ritmo *Automated Cloud - Cover Assessment* (ACCA) descrito por Irish *et al.* (2006) sobre las imágenes ETM+, el cual utiliza una serie de filtros para diferenciar las nubes de otras cubiertas, considerando las reflectancias de las bandas 2, 3, 4 y 5 del sensor ETM+, además de la temperatura de brillo de la banda 6.

Resultados

El área afectada por el fuego se muestra en la Figura 3, donde se evidencia el área quemada a partir de la comparación entre las imáge-

nes antes y después del incendio, correspondiente al 3 de enero del 2005 (Figura 3a) y al 24 de febrero del 2012 (Figura 3b) respectivamente. La superficie afectada por el incendio se calculó en 18.059 ha. El error relativo de estimación, asumiendo la resolución espacial del sensor y el método de interpolación se calculó en $\sim 1\%$, lo que equivale a 181 ha. Sin embargo, dentro de esta área se presentaban superficies con un grado de siniestralidad diferente. El relieve de la zona, la significativa variabilidad en la dirección del viento, el contenido aparente de humedad del suelo, el contenido de agua de la vegetación y el méto-

do de extinción del fuego generaron diversas zonas aisladas donde el fuego no afectó por completo a las coberturas, dando paso a la creación de parches aislados de vegetación. Estos parches de vegetación corresponden principalmente a pastizales, los que pueden apreciarse al interior del área afectada por el incendio (Figura 3c, d, e). La exclusión de estos parches de vegetación en el área afectada, genera una disminución cercana a un 9% del total de la superficie quemada.

Con el objetivo de analizar el grado de severidad con que el incendio afectó a cada cobertura de vegetación, la Figura 4 muestra el ΔNBR estimado para toda el área afectada. En esta figura se aprecia que el índice presenta una categorización detallada sobre el tipo de cobertura siniestrada, diferenciando las clases no quemadas y con regeneración post-incendio, de las clases que sufrieron algún grado de siniestralidad. Hacia el borde este de la zona afectada por el incendio se aprecian las superficies que no fueron quemadas, mientras que en el centro de esta área están las zonas que tuvieron un grado de siniestralidad alto. Esto se debe a que el incendio se originó en el lado oeste del área de estudio, desplazándose hacia el este según la magnitud y dirección del viento. En el centro del área se aprecian las zonas de mayor devastación y que presentan un alto grado de severidad. Existen zonas que muestran un alto grado de crecimiento post-incendio ubicadas en el sector noreste del área quemada. Esta zona corresponde a bosques y su clasificación se puede atribuir a una sobre estimación de la reflectancia de la vegetación producto de la interpolación, presentando además un alto grado de influencia tanto de la interpolación como de los efectos topográficos.

Del total de la superficie quemada, 14.074 ha presentaron algún grado de severidad, de las cuales el 31% presentó un grado medio-alto o alto de severidad. Por otra parte, 3.989 ha, presentaron un grado de regeneración después del incendio o no fueron quemadas. A pesar de que este resultado equivale a un 22% del total de la superficie afectada por el incendio, existen ciertas zonas que fueron sesgadas por el método de interpolación en el momento de realizar el índice NBR, por lo que esta superficie

podría disminuir en magnitud, principalmente debido a las zonas en las cuales se presentó una alta regeneración. Estas zonas se ubican en las laderas de los cerros situados al noroeste de la zona y corresponden a bosques frondosos de hojas perennes.

La cuantificación de cada cobertura afectada por el incendio y su respectivo grado de severidad, se muestran en la Tabla 3. Del total del área del parque, un 12% de la superficie correspondiente a algún tipo de vegetación fue afectada por el incendio y en su mayoría (aprox. 10%), fue clasificada con algún grado de severidad entre bajo y alto. Solo 1.114 ha fueron afectadas por el incendio y han experimentado algún tipo de crecimiento, ya sea bajo o alto. Sin embargo, esta superficie está influenciada por el tipo de vegetación de bosques densos, que se encuentra influenciada por el efecto del método de interpolación. Las coberturas de vegetación más afectadas por el incendio corresponden a bosque semi-abierto decíduo, bosque de baja altura y praderas, abarcando una superficie de 15.794 ha, un 87% del total quemado. De este total, el 69% presentó un grado de severidad medio o medio-alto, correspondiente a 12.674 ha. Por otra parte, según el índice ΔNBR , las áreas que fueron afectadas por el incendio pero que no se encuentran clasificadas en algún grado de severidad se estiman en 2.393 ha, donde un 91% corresponden a coberturas de matorral y bosque abierto de baja altura.

Discusión y conclusión

La comparación de la interpolación realizada sobre las imágenes ETM+ se muestra en la Figura 5. En esta figura se comparan los NDVI de la imagen ETM+ remuestreada a 250 m, con los valores de NDVI obtenidos de los productos de reflectancia de MODIS. Estas comparaciones se realizaron para las escenas completas de Landsat, correspondiente a los *Path 230* y *Row 96*, tanto para la escena del 3 de enero del 2005 como para la escena del 24 de febrero del 2012 (Figura 5a,b). Al mismo tiempo, se muestra la comparación realizada para la superficie correspondiente al área afectada por el fuego y descrita en la Figura 5c,d.

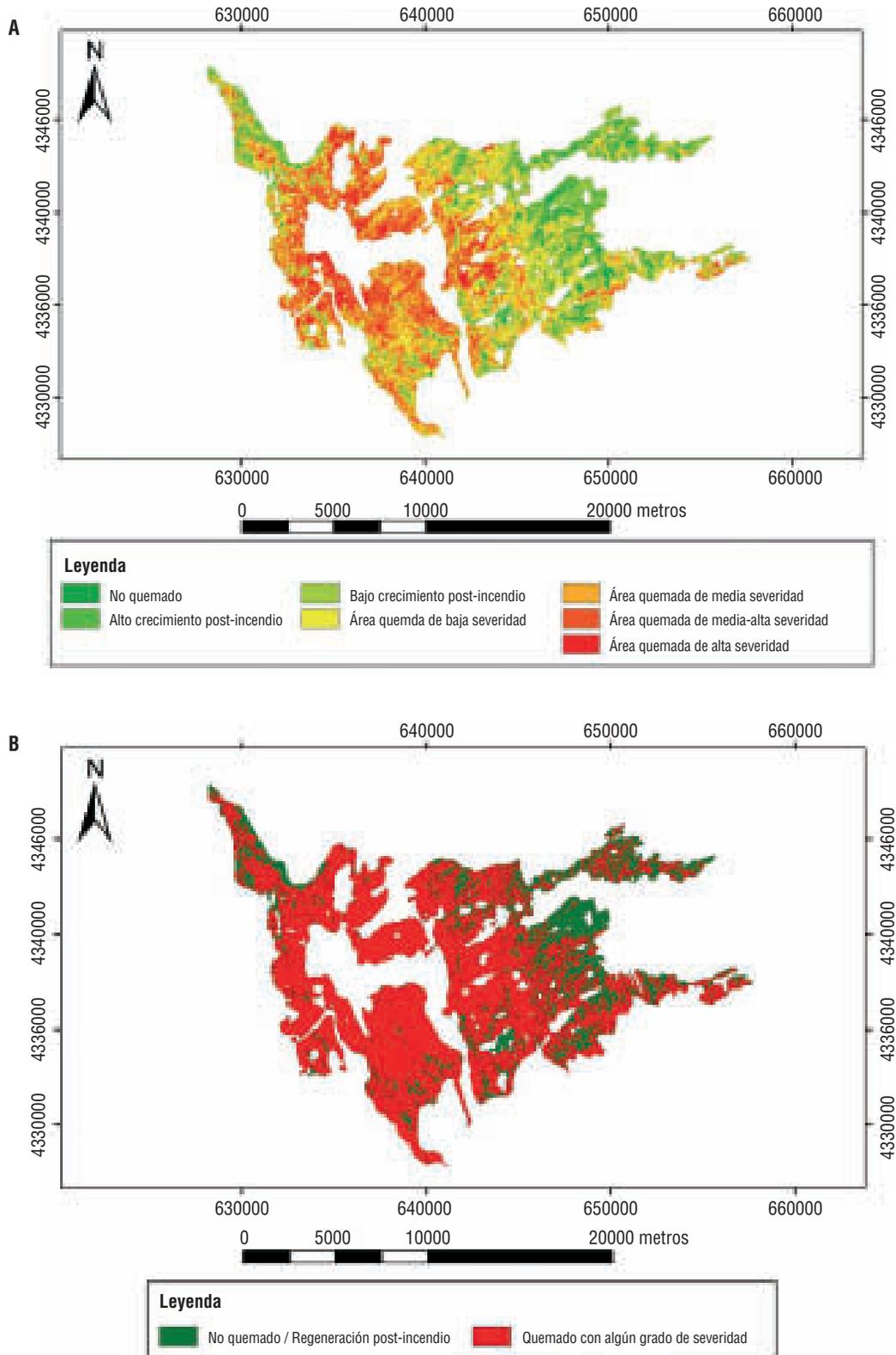


Figura 4. (a) ΔNBR de la superficie afectada por el incendio y (b) Reclasificación de la superficie afectada en «Quemado con algún grado de severidad» y «No quemado /Regeneración Post Incendio».

Tabla 3. Categoría de siniestralidad y tipo de cobertura afectada. Superficie de área quemada por cobertura de vegetación, relación al total de la superficie del parque y relación al índice BRN

Código	Área parque (ha)	Área quemada (ha)	% parque	Alto crecimiento post-incendio	Bajo crecimiento post-incendio	No quemado	Área quemada de baja severidad	Área quemada de media severidad	Área quemada de media-alta severidad	Área quemada de alta severidad
14	2353.16	39.80	1.69%	0.00	0.00	9.95	9.95	19.90	0.00	0.00
20	3148.15	69.65	2.21%	0.00	0.00	0.00	0.00	29.85	29.85	9.95
30	5266.00	248.75	4.72%	0.00	19.90	39.80	49.75	99.50	39.80	0.00
40	32530.90	2046.30	6.29%	0.00	0.00	49.75	404.10	527.76	736.32	328.36
50	8185.19	2021.90	24.70%	0.00	59.70	149.25	435.60	736.32	561.40	79.60
60	2264.13	218.90	9.67%	0.00	99.50	49.75	19.90	39.80	9.95	0.00
100	235.32	0.00	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	4471.01	248.75	5.56%	0.00	9.95	129.35	89.55	19.90	0.00	0.00
120	311.64	0.00	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	81527.59	11726.00	14.38%	39.80	626.87	2194.06	3492.60	3143.39	1901.00	328.25
140	10506.56	820.20	7.81%	89.55	149.25	169.16	159.20	119.40	103.80	29.85
150	2607.56	141.50	5.43%	0.00	0.00	59.70	29.80	52.00	0.00	0.00
180	2054.25	477.60	23.25%	0.00	19.90	19.90	89.55	189.06	149.25	9.95
200	1125.70	0.00	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
210	32619.94	0.00	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
220	46560.85	0.00	0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	235767.96	18059.35	7.66%	129.35	985.08	2870.68	4780.01	4976.89	3531.38	785.96

Código	Leyenda	Código	Leyenda
14	Tierras cultivadas.	120	Mosaico de pradera (50-70%) y bosque o matorral (20-50%).
20	Mosaico de tierras cultivadas (50-70%) / Vegetación (pradera/matorral/bosque) (20-50%).	130	Cerrado a abierto (>15%) (hoja ancha, acícula, siempreverde o decíduo) matorral (<5m).
30	Mosaico de vegetación (pradera/matorral/bosque) (50-70%) / tierras cultivadas (20-50%).	140	Cerrado a abierto (>15%) vegetación herbácea (pradera, sabanas oliques/musgos).
40	Cerrado a abierto (>15%) bosque de hoja ancha siempreverde y/o bosque semidecíduo (>5m).	150	Vegetación dispersa (<15%).
50	Cerrado (>40%) bosque de hoja ancha decíduo (>5m).	180	Cerrado a abierto (>15%) pradera o matorral o vegetación len?osa regularmente inundada o suelo inundado, agua dulce, salobre o salina.
60	Abierto (15-40%) bosque de hoja ancha decíduo (>5m).	200	Áreas de suelo desnudo.
100	Cerrado a abierto (>15%) bosque de hoja ancha y bosque de acículas (>5m).	210	Cuerpos de agua.
110	Mosaico de bosques o matorral (50-70%) y pradera (20-50%).	220	Nieve y hielo permanente.

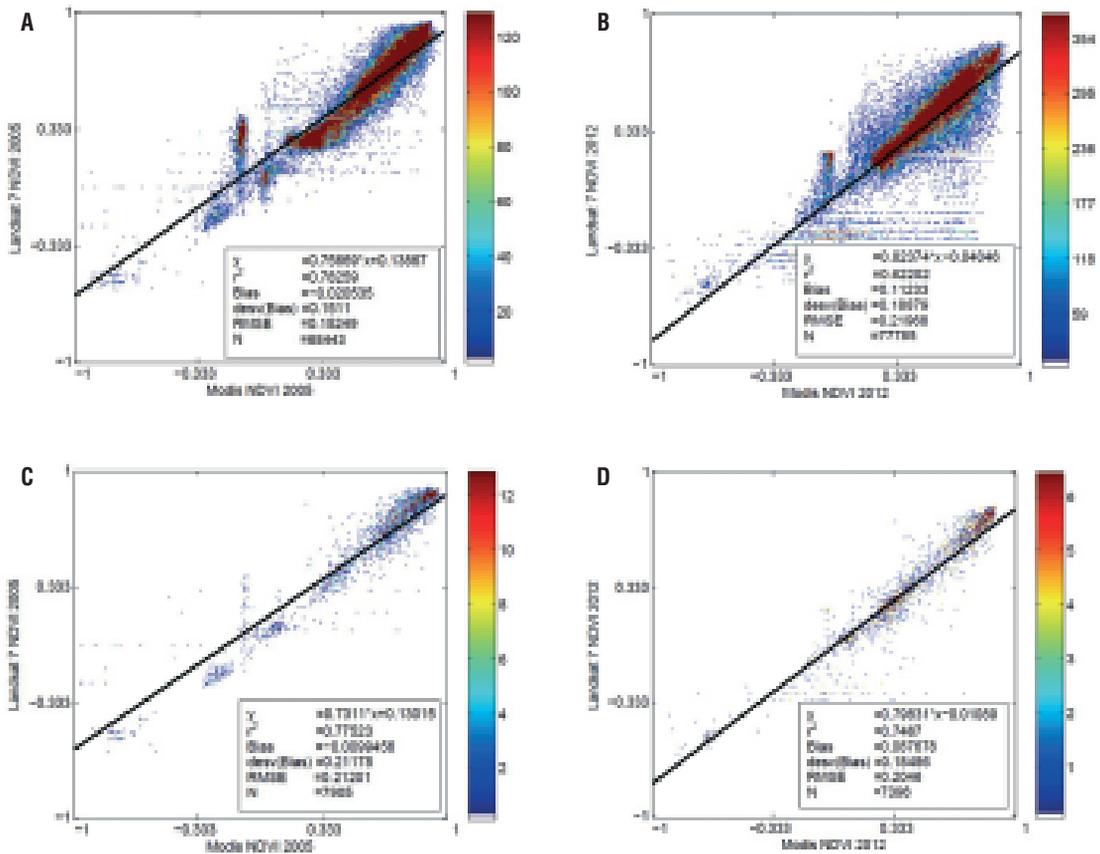


Figura 5. Diagrama de dispersión de valores de NDVI calculado a partir de imágenes ETM+ corregidas por el efecto del SLC-off y a partir de la reflectancia obtenida con el sensor MODIS. Se muestran los diagramas para el año 2005 y 2012 sobre la escena Landsat (a, b) y sobre el área de estudio (c,d) respectivamente. La escala de colores indica la frecuencia de los pares ordenados de NDVI MODIS/ETM+.

En la Figura 5a, al utilizar el algoritmo AC-CA para filtrar las nubes, se obtuvo un R^2 de 0,78 y una tendencia lineal de 0,74. Sin embargo, se observó un foco de dispersión debido a píxeles con nubes que han sido subestimados por el método de filtrado. Al realizar el cálculo del coeficiente de determinación sin considerar este foco de dispersión, este aumentó a 0,83 y la tendencia lineal aumentó a 0,94. Por otra parte, los valores de R^2 y tendencia lineal para el área de estudio en el año 2005 (Figura 5c) fueron similares a los de la escena completa e igualmente se observó una dispersión producto de los píxeles correspondientes a nubes que no fueron clasificados, aunque en una menor proporción.

La comparación de la escena del 24 de febrero del 2012 (Figura 5b) presenta una situación similar a las del año 2005 en cuanto a la dispersión que generan las nubes no clasificadas por el algoritmo de Irish, *et al.* (2006).

Sin embargo, en esa fecha la cobertura total de nubes fue menor a la escena del 3 de enero 2005, por lo tanto el foco de dispersión de nubes también fue menor. No obstante, se evidencian ciertos píxeles correspondientes a cuerpos de agua que incrementaron la dispersión de las series de datos. El valor de R^2 y la tendencia lineal en este caso fueron de 0,62 y 0,82 para los píxeles corregidos en toda la escena, respectivamente. En el caso del área de estudio, para el 24 de febrero de 2012 el valor de R^2 y de la tendencia lineal fueron de 0,75 y 0,8 (Figura 5d).

La superficie afectada por el incendio del 2012 en el PNTN se estimó cercana a las 18 mil ha. Las condiciones del lugar, tanto meteorológicas como orográficas, son factores significativos a la hora de mitigar los focos del incendio y las consecuencias que éste genera.

La utilización de las imágenes ETM+, es una herramienta útil para la estimación del área quemada. La corrección realizada mediante interpolación de Delaunay permite obtener un área continua, que puede ser cartografiada con mayor eficiencia con el fin de estimar el área quemada de forma precisa. Sin embargo, estos valores deben estar acompañados de un método de estimación del grado de severidad del incendio, como es el caso de la comparación del NBR entre imágenes previas y posteriores al siniestro. La comparación realizada entre los valores de NDVI remuestreados de ETM+ corregidos y los valores de MODIS, presentan coeficientes de determinación superiores 0,7, que puede estar subestimado por la presencia de nubes o cuerpos de agua, además influenciados por la interpolación bi-lineal del remuestreo de las imágenes ETM+ a 250 m. A pesar de esto, los resultados muestran que los valores interpolados mediante triangulación de Delaunay, permiten generar una imagen comparable con otros productos de vegetación derivados de otros sensores remotos.

Finalmente, en este trabajo se presentó una estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine después del incendio ocurrido entre diciembre del 2011 y marzo del 2012. Al mismo tiempo se analizó el tipo de cobertura afectada y el respectivo grado de siniestralidad a partir del índice NBR. El método de corrección de bandeado, a partir de interpolación de Delaunay para el producto Landsat 7-ETM+, es una herramienta útil para el análisis de fenómenos espaciales, tal como lo demuestra el caso del reciente incendio ocurrido en el Parque Nacional Torres del Paine. El área afectada por el incendio se estimó en 18.059 ha ($\pm 1\%$). Esto implica que un porcentaje significativo de la vegetación del parque Nacional Torres del Paine fue siniestrado, en donde las coberturas afectadas en mayor superficie corresponden a bosque semi-abierto decido, bosque de baja altura y praderas, siendo esta última la que presenta la mayor área con algún grado de severidad, equivalente al 49% de la vegetación quemada en el parque. Lo anterior es fundamental para la toma de decisiones en cuanto a las medidas de restauración que se deben aplicar sobre la superficie del Parque Nacional Torres del Paine.

Agradecimientos

Los autores agradecen la disposición de la *United States Geological Survey* (USGS) por la libre entrega de los datos Landsat-7 ETM+ SLC-off y a la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) por los productos MODIS. Los autores agradecen además la notable colaboración de Francisco Ubilla por su invaluable aporte a la calidad de las fotografías. Esta publicación ha sido en parte financiada por el Programa U-INICIA Concurso de Reforzamiento de Inserción Productiva de Nuevos Académicos VID 2012; código U-INICIA 4/0612 Universidad de Chile.

Referencias

- BANK, M. S., SARNO, R. J., & FRANKLIN, W. L. 2003. Spatial distribution of guanaco mating sites in southern Chile: conservation implications. *Biological Conservation*, 112 (3), 427-434
- BONTEMPS, S., & CO-AUTHORS. 2011a. GLOB-COVER 2009: Products Description and Validation Report (ESA and UC Louvain).
- BONTEMPS, S., & CO-AUTHORS. 2011b. Revisiting land cover observations to address the needs of the climate modelling community. *Biogeosciences Discussions*, 8, 7713-7740.
- CHAVEZ, P. Jr. 1996. Image based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- CHANDER, G., MARKHAM, B., & HELDER, D. L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903.
- CHUVIECO, E., CIFUENTES, Y., HANTSON, S., AGUSTÍN-LÓPEZ, A., RAMO, R., & TORRES, J. 2012. Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos. *Revista Española de Teledetección*, 37, 9-22.
- CHUVIECO, E., MARTÍN, M. P., & PALACIOS, A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103-5110.
- COCKE, A. E., FULÉ, P. Z., & CROUSE, J. E. 2005. Comparison of burn severity assessments using Difference Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 189-198.
- DE BERG, CHANG, O., VAN KREVELD, M., & OVERMARS, M. 2008. Computational Geo-

- metry: Algorithms And Applications. Springer, 3rd edition, ISBN-10: 3540779736.
- DE SANTIS, A., & CHUVIECO, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 422-435.
- DE SANTIS, A., & CHUVIECO, E. 2008. Análisis comparativo de sensores espaciales para cartografía de la Severidad en el incendio de Ruba de Saelices (Guadalajara). *Revista Española de Teledetección*, 29, 25-37.
- DE SANTIS, A., & CHUVIECO, E. 2009. GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 554-562.
- DOMÍNGUEZ-VILLAR, D. 2006. Early formation of gnammas (weathering pits) in a recently glaciated area of TorresdelPaine, southern Patagonia (Chile). *Geomorphology*, 76(1-2), 137-147.
- EPTING, J., VERBYL, D., & 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, 228-239.
- ENDLICHER, W. 1991. Zur Klimageographie und Klimaökologie von Südpatagonien. 100 Jahre-klimatologische Messungen in Punta Arenas. *Freiburger Geographische Hefte*, 32: 181-211.
- ESCUIN, S., NAVARRO, R., & FERNÁNDEZ, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1053-1073.
- FRANKLIN, W. L., JOHNSON, W. E., SARNO, R. J., & IRIARTE, J. A. 1999. Ecology of the Patagonia puma *Felis concolor patagonica* in southern Chile. *Biological Conservation*, 90(1), 33-40.
- FRITZ, S., & CO-AUTHORS. 2011. Highlighting continued uncertainty in global land cover maps for the user community. *Env. Research letters*, 6, doi:10.1088/1748-9326/6/4/044005
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., MERINO-DE-MIGUEL, S., ROLDÁN-ZAMARRÓN, A., GARCÍA-GIGORRO, S., & CUEVAS, J. M. 2007. MERIS Full Resolution data for mapping level of damage by forest fires: the Valencia de Alcántara event in August 2003. *Int. J. Remote Sensing* 28(3-4): 797-809.
- GONZÁLEZ, J., & AYDIN, A. 2008. The origin of oriented lakes in the Andean foreland, Parque Nacional Torres del Paine (Chilean Patagonia). *Geomorphology*, 97(3-4), 502-515.
- IRISH, R., BARKER, J., GOWARD, S., & ARVIDSON, T. 2006. Characterization of the Landsat-7 ETM Automated Cloud-Cover Assessment (ACCA) Algorithm. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 72(10), 1179-1188.
- KAPTUÉ, A. T., ROUJEAN, J. L., & DE JONG, S.M. 2011. Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 13(2), 207-219.
- KELLER, K., CASASSA, G., RIVERA, A., FORSBERG, R., & GUNDESTRUP, N. 2007. Airborne laser altimetry survey of Glaciar Tyndall, Patagonia. *Global and Planetary Change*, 59 (1-4), 101-109.
- KÖPPEN, W. 1918. Klassifikation der Klimatenach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). *Petermanns Geogr. Mitt.* 64, 193-203, 243-248
- LEUTHOLD, J., MÜNTENER, O., BAUMGARTNER, L. K., PUTLITZ, B., OVTCHAROVA, M., & SCHALTEGGER, U. 2012. Time resolved construction of a bimodal laccolith (Torres del Paine, Patagonia). *Earth and Planetary Science Letter*, 325-326 (1), 85-92
- LOBODA, T., O'NEAL, K. J., & CSISZAR, I. 2007. Regionally adaptable dNBR- based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote sensing of Environment*, 109(4), 429-442.
- NEUMANN, K., HEROLD, M., HARTLEY, A., & SCHMULLIUS, C. 2007. Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 9, 425-437.
- MARDEN, J. 1997. Late-glacial fluctuations of South Patagonian Icefield, Torres del Paine National Park, southern Chile. *Quaternary International*, 38-39, 61-68.
- MERINO-DE-MIGUEL, S., GONZÁLEZ-ALONSO, F., GARCÍA-GIGORRO, S., ROLDÁN-ZAMARRÓN, A., & CUEVAS J. M. 2004. Is it possible to timely and accurately estimate wild-fire burnt areas using remote sensing techniques?, 24th EARSeL Symposium, Dubrovnik, Croacia.
- MILLER, A. B., & YOOL, S. R. 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multitemporal Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 82, 481-496.
- MILLER, J. D., & THODE, A. E. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109, 66-80.
- MORENO, P., VILLA-MARTÍNEZ, R., CÁRDENAS, M.L., & SAGREDO, E. A 2012. Deglacial changes of the southern margin of the southern westerly winds revealed by terrestrial records from SW Patagonia (52°S). *Quaternary Science Reviews*, 41(18), 1-21.
- OLIVA, P., MARTÍN, P., & CHUVIECO, E. 2011. Burned area mapping with MERIS postfire ima-

- ge, *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4175-4201.
- PISANO, E. 1974. Estudio ecológico de la región continental sur del área andino patagónica. II Contribución a la fitogeografía de la zona del Parque Nacional Torres del Paine. *Anales del Instituto de la Patagonia* 5, 59-104.
- PRINGLE, M. J., SCHMIDT, M. & MUIR, J. S. 2009. Geostatistical interpolation of SLC-OFF Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 654-664.
- ROLDÁN-ZAMARRÓN, A., GONZÁLEZ-ALONSO, F., MERINO-DE-MIGUEL, S., GARCÍA-GIGORRO, S., & CUEVAS, J. M. 2005. Cartografía de los niveles de severidad en el incendio forestal de Minas de Riotinto (Huelva) a partir de imágenes Landsat 5 TM. XI Congreso Nacional de Teledetección, 21-23 septiembre. Puerto de la Cruz. Tenerife.
- SOLARI, M. A., HERVÉ, F., LEROUX, J. P., AIRO, A., & SIAL, A. N. 2010. Paleoclimatic significance of lacustrine microbialites: A stable isotope case study of two lakes at Torres del Paine, southern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297(1), 70-82.
- VERMOTE, E., KOTCHENOVA, S., & RAY, J. 2011. MODIS Surface Reflectance User's Guide, version 3.1. *Surface Reflectance Science Computing Facility*, 40 p.
- WITTMER, H., CORTI, P., SAUCEDO, C., & GALAZ, J. L. 2010. Learning to count: adapting population monitoring for endangered huemul deer to meet conservation objectives. *The international Journal of Conservation*, 44, 516-522.
- ZHANG, C., LI, W., & TRAVIS, D. 2007. Gaps-fill of SLC-OFF Landsat ETM+ satellite image using a geostatistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28(22), 5103-5122.

Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009)

C. Giner¹, B. Martínez¹, M. A. Gilabert¹ y Domingo Alcaraz-Segura²

¹ *Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, c/ Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot*

² *Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Universitario de Fuentenueva, 18071 Granada*

Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar las tendencias experimentadas por las áreas forestales de la España peninsular durante el periodo 2000-2009. Para ello se ha aplicado la metodología del análisis multi-resolución (AMR) basado en la aplicación de la transformada *wavelet* (TW) a datos de producción primaria bruta (GPP) e índices de vegetación (NDVI y EVI) derivados del sensor MODIS. Este análisis permite descomponer una señal no estacionaria en varias componentes a diferentes escalas temporales. La aplicación del test no-paramétrico de Mann-Kendall y del método Sen a la componente de tendencia derivada del AMR proporciona información sobre la magnitud y dirección de los cambios experimentados. Como se muestra comparando con otros estudios recientes, la detección de cambios en la vegetación mediante series temporales es altamente dependiente del periodo de estudio y de la fecha de inicio de la serie temporal.

Palabras clave: detección de cambios, bosques, España, wavelets, Mann-Kendall.

Abstract

Trends in vegetation greenness and gross primary production in Spain (2000-2009)

This paper aims to assess vegetation changes on the forest canopies of Spain over the period 2000-2009. A multi-resolution analysis (MRA) based on the wavelet transform (WT) has been implemented to gross primary production (GPP) and NDVI and EVI MODIS data sets. This analysis decomposes a non-stationary signal in different temporal scales. In order to derive significant changes, the Mann-Kendall non-parametric test and the Sen's method have been applied to the trend component derived from the MRA. These methods provide the magnitude and direction of the vegetation changes observed in the temporal series. Comparing the results with recent findings it is shown that vegetation change detection from temporal series analysis is highly dependent on the studied period and the starting date.

Key words: change detection, forests, Spain, wavelets, Mann-Kendall.

Introducción

A lo largo de las dos últimas décadas varios estudios han analizado las tendencias en los índices espectrales de vegetación en la Península Ibérica con resultados diferentes en función

del periodo analizado, y de la base de datos empleada. Tradicionalmente, el análisis de series temporales largas se ha llevado a cabo a media y baja resolución espacial a partir del índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) derivado del sensor AVHRR

* Autor para la correspondencia: beatriz.martinez@uv.es
Recibido: 28-02-12; Aceptado: 27-11-12.

(*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo de la plataforma NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). El NDVI (Tucker, 1979) ha demostrado ser un buen candidato para caracterizar el verdor de la vegetación, la cantidad de biomasa verde, el índice de área foliar, la producción primaria y los flujos de carbono (Running & Nemani, 1988; Tucker & Seller, 1986, Paruelo *et al.*, 1997). En la Península Ibérica, la mayoría de los trabajos muestran tendencias al aumento del NDVI en el norte y este de la Península Ibérica y de disminución del NDVI en el cuadrante suroeste peninsular desde principios de la década de los 1980s hasta mitad y final de la década de los 1990s (Alcaraz *et al.*, 2010a, Vicente-Serrano & Heredia-Laclaustra, 2004). Las tendencias observadas a lo largo de la década de los 1990 hasta principios de los 2000 (Martínez & Gilabert, 2009, del Barrio *et al.*, 2010, Stellmes *et al.*, 2013) mantienen la tendencia positiva del NDVI en el centro y norte peninsular, restringen las tendencias negativas observadas en la década anterior en el cuadrante suroeste al Valle del Guadalquivir, y detectan mayoritariamente tendencias negativas en el este y sureste ibérico principalmente en áreas en proceso de degradación (Martínez & Gilabert, 2009; del Barrio *et al.*, 2010).

Todos los trabajos mencionados anteriormente están basados en diferentes series temporales del NDVI construidas a partir de imágenes de 1, 4, 5 u 8 km obtenidas por los sensores NOAA-AVHRR, ya que estas imágenes están disponibles desde principios de los 1980. Sin embargo, estas series temporales a menudo presentan problemas de continuidad entre los distintos satélites NOAA, como consecuencia de la degradación temporal del sensor y la deriva de la órbita del satélite, y de las distintas versiones del sensor AVHRR (de Beurs *et al.*, 2005, Alcaraz-Segura *et al.*, 2010b, Trishchenko *et al.*, 2002). Desde el año 2000, con el desarrollo de los sensores de nueva generación (e.g. MODIS/Terra y VEGETATION/SPOT), están disponibles series temporales que no presentan los problemas mencionados y que tienen tanto mejor calidad como mayor resolución espacial y espectral.

Hasta la fecha, sólo existe un trabajo que haya empleado estas nuevas imágenes MODIS

para evaluar las tendencias en el verdor de la vegetación ocurridas en la Península Ibérica desde el año 2000 (Pérez *et al.*, 2009). En él se muestra un fuerte contraste con los patrones espaciales de tendencias observadas en las décadas anteriores. Entre 2000 y 2008 se detectaron tendencias negativas generalizadas en toda la Península, con excepción de las tendencias positivas observadas en Castilla y León, sur de Pirineos, y este y sureste ibéricos (coincidiendo esta última zona con la que mostraba descensos significativos en la década de los 1990).

MODIS no sólo permite evaluar las tendencias del NDVI y el EVI (*Enhanced Vegetation Index*) empleando información de mejor calidad que AVHRR, sino que también proporciona productos derivados directamente y que están relacionados con las ganancias de carbono (Running *et al.*, 2000; <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/npp.html>), si bien sus tendencias en la Península Ibérica no han sido evaluadas hasta la fecha. El producto MOD17A2 proporciona la producción primaria bruta cada 8 días (GPP, *Gross Primary Production*), es decir, la cantidad de CO₂ que un m² de vegetación ha transformado en carbono orgánico mediante la fotosíntesis en esos 8 días. El producto MOD17A3 proporciona la producción primaria neta anual (NPP, *Net Primary Production*), es decir, el balance entre el CO₂ capturado por la vegetación durante la fotosíntesis y el CO₂ emitido a la atmósfera como resultado de la respiración durante todo el año. Estos productos nacen del interés por cuantificar el intercambio de dióxido de carbono a partir de medidas de satélite (Prince & Goward, 1995; Potter & Klooster, 1997; Coops *et al.*, 1998; Field *et al.*, 1998; Running *et al.*, 2000). Entre los modelos de producción primaria existentes, los más usados son los PEM (*Production Efficiency Models*), que se basan en la aproximación de Monteith (1972), según la cuál la GPP se relaciona con la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la cubierta vegetal (APAR) mediante la expresión $GPP = \epsilon \cdot APAR$. La ϵ (o LUE, *Light Use Efficiency*) define la eficiencia con que la vegetación utiliza la energía proveniente del Sol para realizar la fotosíntesis (es decir, por ejemplo, cuántos gramos de carbono se sintetizan por cada mega-

julio de radiación fotosintéticamente activa interceptada).

Actualmente, el desarrollo de técnicas para el análisis multi-temporal de series es una línea de investigación muy empleada por la comunidad de teledetección (Bruzzone *et al.*, 2003). Las técnicas más utilizadas en el estudio de la dinámica de la vegetación a partir de series temporales largas son (i) los métodos estadísticos como el análisis de componentes principales (Rigina & Rasmussen, 2003; Hirosewa *et al.*, 1996; Eastman & Fulk, 1993) o los métodos de regresión (de Beurs & Henebry, 2005; Jönson & Eklundh, 2004; Zhang *et al.*, 2003 y (ii) los métodos de análisis espectral, como la transformada de Fourier (TF) (Stöckli & Vidale, 2004; Azzali & Menenti, 2000) y la transformada *wavelet* (TW) (Martínez & Gilabert, 2009; Sakamoto *et al.*, 2005).

En el caso de los métodos espectrales, el objetivo consiste en descomponer una serie temporal en diferentes frecuencias temporales, lo que se conoce también como análisis armónico. Para determinar el espectro más simple de frecuencias, la transformada de Fourier ha sido ampliamente utilizada con resultados satisfactorios cuando la señal es periódica y lo suficientemente regular. Sin embargo, no ocurre lo mismo para el análisis de señales cuyo espectro varía con el tiempo (señales no estacionarias). En este caso, se requiere la utilización de otras transformadas, como la transformada *wavelet*. La TW consiste en la descomposición (temporal o espacial) de una señal en diferentes escalas dilatando (o expandiendo) y trasladando una onda finita, denominada *wavelet* madre (Percival & Walden, 2000). La TW ha mostrado ser eficiente para el análisis local de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad, proporcionando de manera simultánea información sobre el tiempo y la frecuencia. La TW ofrece la herramienta del análisis multi-resolución (AMR), el cual 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 actividad fotosintética

a lo largo del tiempo (Martínez & Gilabert, 2009; Percival *et al.*, 2004).

El objetivo de este trabajo consiste en detectar las tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta experimentadas por las áreas forestales de la España peninsular en la década 2000-2009. Para ello se ha utilizado el AMR basado en las *wavelets*. Este método se ha aplicado a los índices de vegetación MODIS NDVI 1 km y MODIS EVI 1 km, incluidos en el producto MOD13A2, así como a la producción primaria bruta MODIS GPP 1 km, incluida en el producto MOD17A2, para la década 2000-2009.

Se ha utilizado el NDVI por sus antecedentes históricos en la caracterización del verdor de la vegetación a partir de series temporales, y el EVI porque ha demostrado ser más sensible que el NDVI a variaciones en el verdor de la vegetación en cubiertas densas (Huete *et al.*, 2002). Por último, también se ha seleccionado el producto MODIS GPP porque (i) ofrece la posibilidad de incorporar una base de datos actual y procedente de sensores de última generación y (ii) es un producto no tan explotado hasta la fecha como los índices de vegetación y que está directamente relacionado con los intercambios de CO₂.

Materiales

Producción Primaria Bruta

El producto MODIS GPP utilizado consiste en un compuesto de 8 días a 1 km para el periodo 2000-2009 y para la Península Ibérica. se encuentra disponible en la página web del grupo *Numerical Terradynamic Simulation Group* (NTSG), en la Universidad de Montana (ftp://ftp.ntsg.umt.edu/pub/MODIS/Mirror/MOD17_Science_2010/). Este producto, que es una versión mejorada del producto MOD17A2 descargable desde la página oficial MODIS, ha demostrado su capacidad en el estudio de cambios en la producción de la cobertura de la vegetación (Zhao & Running, 2010). Se desarrolló después de que Zhao & Running (2006) encontraran que el producto oficial MOD17A2 era bastante sensible a los datos meteorológicos utilizados en el algorit-

mo y que la base de datos utilizada (*DAO, NASA Data Assimilation Office*) presentaba una baja calidad y poca consistencia a partir del año 2006.

El producto MODIS GPP mejorado se deriva a partir de un modelo PEM (Running *et al.*, 2004), basado en la siguiente expresión:

$$GPP = \varepsilon(T, VPD) \cdot APAR \quad [1]$$

$$\varepsilon(T, VPD) \varepsilon_{\max} \cdot f(T_{\min}) \cdot f(VPD) \quad [2]$$

El cálculo de la GPP asume que en condiciones favorables la eficiencia en el uso de la luz (ε_{\max}) durante la fotosíntesis es máxima para cada tipo de cubierta y disminuye a medida que las condiciones meteorológicas son menos favorables, lo que se tiene en cuenta utilizando unas magnitudes escalares que dependen de la temperatura mínima diaria (T_{\min}) y el déficit de vapor de agua (VPD). La APAR en la ecuación 1 puede calcularse como el producto de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa que es absorbida por la cubierta (fAPAR). Para el cálculo de la APAR, los autores del producto MOD17 asumen que la PAR es el 45% de la radiación total solar incidente en el rango espectral entre 0.4-0.7 μm (Iqbal, 1983), y la fAPAR la extraen de la colección 5 (C5) de 8 días a 1 km del producto MODIS fAPAR (MOD15). Para mejorar el producto MODIS GPP, Zhao & Running (2010) eliminaron las fechas con mala calidad en la serie original MODIS fAPAR y las rellenaron utilizando una interpolación lineal simple.

Por otra parte, los datos meteorológicos requeridos por el algoritmo (temperatura media diaria, temperatura mínima diaria, presión de vapor del agua, y radiación solar incidente de onda corta) los obtuvieron de la red NCEP (*National Center for Environmental Prediction*).

Índices de Vegetación

Los productos MODIS NDVI y EVI se han obtenido a partir del producto oficial de índices de vegetación MOD13A2 C5 a 1 km de re-

solución espacial y con una resolución temporal de 16 días. El NDVI se produce mediante el cálculo de la diferencia normalizada de las reflectividades en la banda del infrarrojo cercano (ρ_{IRC}) y del rojo (ρ_R).

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R} \quad [3]$$

El índice EVI, diseñado con el objetivo de realzar la señal de la vegetación y disminuir la influencia de la atmósfera, utiliza además la reflectividad en la banda del azul, ρ_A (Vermote *et al.*, 2002, van Leeuwen *et al.*, 1999; Huete *et al.*, 2002). Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$EVI = G \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + C_1 \rho_R - C_2 \rho_A + L} \quad [4]$$

donde L es el factor de corrección del suelo de fondo, C_1 y C_2 son coeficientes que representan la resistencia de los aerosoles y G es un factor de ganancia. Los coeficientes adoptados por el algoritmo para derivar el producto MODIS EVI son, $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$ y $G = 2.5$. El compuesto de 16 días se deriva de la selección de las mejores observaciones para ese periodo. El número de fechas aceptable en un compuesto de 16 días generalmente se reduce a menos de 10 e incluso a menos de 5 dependiendo de la cobertura nubosa. Una vez recogidos los datos, se aplica un filtro basado en la calidad, presencia de nubes y geometría de observación. Sólo se consideran los píxeles de mayor calidad para la elaboración del compuesto (van Leeuwen *et al.*, 1999). El compuesto se elabora a partir de dos métodos operacionales: (i) el compuesto de máximo valor (MCV) y (ii) el compuesto de máximo valor aplicando un filtro por ángulo de visión (CV-MVC). La técnica empleada depende del número y calidad de las observaciones fuera del nadir.

Los productos MODIS oficiales se han descargado con acceso libre del archivo de datos distribuido por la NASA, LP DAAC (*Land processes distributed active archive center*, https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table). Son productos validados a nivel 2, lo que significa que se han evaluado a

partir de un conjunto amplio de localizaciones distribuidas espacial y temporalmente utilizando información obtenida *in situ* a partir de campañas de validación (García-Mora & Mas, 2011).

Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, *Standardized Precipitation Index*) permite cuantificar anomalías en la disponibilidad de agua procedente de precipitaciones en términos de su intensidad, duración y distribución espacial (Ji & Peters, 2003). Se considera como un índice de sequía. Este índice representa el número de desviaciones estándar de la precipitación registrada durante el periodo de acumulación considerado respecto a la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una función de distribución de la probabilidad Gamma, y después a una distribución normal. Valores del índice negativos están relacionados con condiciones de sequía (Ji & Peters, 2003). Se han utilizado imágenes mensuales de SPI para las décadas 1990-1999 y 2000-2009 a una resolución espacial de 2 km, derivadas mediante técnicas geoestadísticas utilizando datos climáticos de la Agencia Estatal de Meteorología (Pérez-Hoyos *et al.*, 2010).

Mapa forestal de España (MFE50)

Con el objetivo de identificar las áreas forestales en la zona de estudio se ha utilizado el mapa forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50) (http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/mapa-forestal/metodologia_mfe_50.aspx). Este mapa constituye desde su inicio la cartografía base del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) y se ha desarrollado entre los años 1998 y 2007 por el Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente. La base de datos se compone de un total de quince campos descriptores de la ecología y estructura de las masas. En nuestro estudio hemos utilizado la clase forestal arbolado, en la que se contemplan hasta tres tipos de bosque

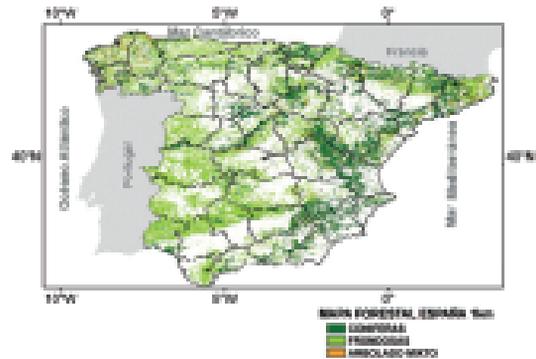


Figura 1. Mapa forestal de la España peninsular re proyectado a coordenadas geográficas (datum WGS-84) y remuestreado a una resolución espacial de 1km a partir de la resolución original 1:50.000. La base de datos distingue hasta tres tipos de bosque diferentes para forestal arbolado, coníferas, frondosas y arbolado mixto, correspondientes a la información utilizada en nuestro estudio.

diferentes: coníferas, frondosas y arbolado mixto (Figura 1). Cada uno de los tipos de bosque incluye información sobre su estado de desarrollo (replantado, monte bravo, latizal y fustal), ocupación (porcentaje que la especie ocupa en el total de los árboles) y la fracción de cubierta para el total del arbolado (porcentaje de suelo cubierto por la proyección horizontal de las copas de los árboles). La elaboración del MFE50 consiste en la fotointerpretación sobre ortofotos de formaciones naturales y artificiales existentes y una comprobación en el campo de un porcentaje de las teselas fotointerpretadas. El porcentaje de teselas visitadas en campo varían entre las distintas provincias elaboradas, con una media que supera el 20%.

Para poder utilizar la información del MFE50 junto con los resultados derivados de nuestro estudio se ha re proyectado el MFE50 a coordenadas geográficas (datum WGS-84) y se ha remuestreado a una resolución espacial de 1 km a partir de la resolución original 1:50.000.

Fundamento teórico

Una de las aplicaciones más extendidas que tiene la TW en el dominio discreto temporal es la reconstrucción de series temporales a partir del Análisis Multi-Resolución (AMR; Burke-

Hubbard, 1998). En este caso la transformada *wavelet* se implementa en un algoritmo piramidal (Mallat, 1989) para descomponer la señal en diferentes escalas temporales trasladando un filtro paso bajo y paso alto asociado a la *wavelet* madre. El filtro de paso alto o de detalle (D) retiene las componentes de alta frecuencia como son las variaciones en la señal atribuibles a escalas temporales cortas. El filtro de paso bajo o de aproximación (A) retiene las componentes de baja frecuencia como son las variaciones en la señal debidas a escalas temporales largas. De este modo, la señal original $f(t)$ se puede reconstruir a partir de la siguiente expresión:

$$f(t) = A_m(t) + \sum_{j=1}^m D_j(t) \quad [5]$$

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 un filtro paso bajo, A_1 , y un filtro paso alto, 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

Pre-procesado

Antes de proceder a la aplicación de los diferentes métodos de detección de cambios, se han preparado las imágenes hipertemporales, utilizándose el software IDL®.

En primer lugar, se crearon los mosaicos para cada fecha a partir de cuatro imágenes en formato HDF (*Hierarchical Data Format*) que cubren la Península Ibérica en su totalidad. Se obtuvieron como resultado 460 imágenes en el caso del producto MODIS GPP, y 227 para los productos MODIS EVI y MODIS NDVI, con un tamaño final de 2400×2400 píxeles. En segundo lugar, se transformaron las imágenes de la proyección original MODIS (ISIN, *Integerized Sinusoidal*) al sistema de coordenadas ge-

ográficas WGS84 (*World Geodetic System 84*). Se trata de un estándar en geodesia, cartografía, y navegación que permite localizar cualquier punto de la Tierra sin necesitar otro de referencia por medio de tres unidades dadas.

Por último se recortaron las imágenes ciñéndolas a la zona de estudio con un tamaño final de 900 × 1500 píxeles. Las series temporales de los productos EVI y NDVI incluyen, además, una capa sobre la calidad del producto, que se ha utilizado para mejorarlas. Se han eliminado aquellos píxeles que presentaban un porcentaje menor al 25% de buena calidad de los datos durante el periodo seleccionado. Para calcular este porcentaje se utilizó la capa *pixel reliability summary QA* que describe la calidad de los datos del producto MOD13A y que puede tomar los valores de -1 (valor de relleno, no procesado), 0 (buen dato, usar con confianza), 1 (dato marginal, útil, pero conviene mirar otra información de la QA), 2 (nieve/hielo, pixel cubierto por nieve o hielo), y 3 (nublado, cubierta no visible, cubierto con nubes). Así pues, para calcular el porcentaje de buena calidad de los datos se dividió el total de datos con buena calidad (valor 0) entre el total de fechas de la serie temporal (227 para EVI y NDVI). En el resto de píxeles, los datos con mala calidad fueron eliminados y rellenados mediante interpolación lineal temporal, como hicieron los autores del producto MOD17 con el producto de FAPAR para derivar el producto mejorado de GPP (Zhao *et al.*, 2005). La Figura 2 muestra los perfiles de EVI (a) y NDVI (b) de un píxel localizado en la Rioja (42.17°N, 2.71°W) perteneciente a la clase de arbolado mixto que presenta un 75.3% de buena calidad de los datos. El perfil original se muestra en gris; los puntos de colores representan las fechas en las que los datos no tienen una calidad aceptable. Los datos de estas fechas serán eliminados y rellenados mediante interpolación lineal. En color verde se puede observar el perfil resultante y que han sido utilizado en el AMR.

Aplicación del AMR a las imágenes MODIS

Para poder evaluar los cambios interanuales en las áreas forestales de la zona de estu-

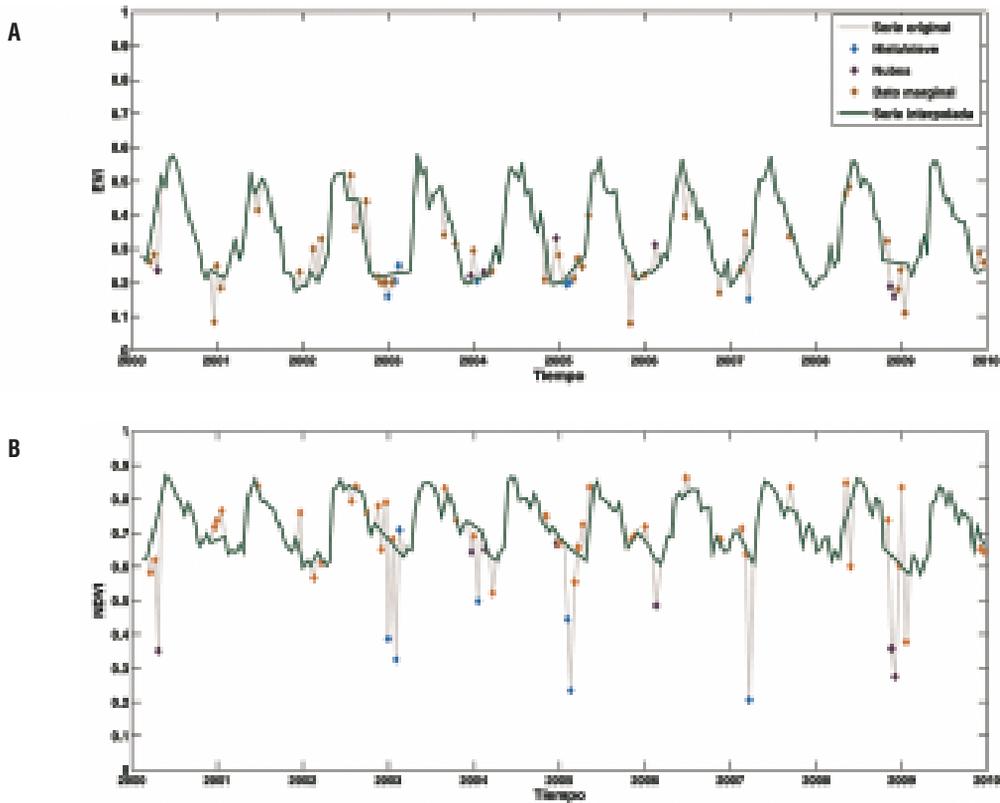


Figura 2. Perfiles originales e interpolados de un píxel localizado en la Rioja (42.17°N, 2. 71°W) perteneciente a la clase de arbolado mixto que presenta un 75.3% para los índices EVI (a) y NDVI (b) con un 75.3% de buena calidad de los datos en la serie original.

dio es necesario separar la componente estacional de la de tendencia. A partir del AMR este proceso resulta sencillo mediante la aplicación del filtro paso bajo y paso alto a diferentes escalas de tiempo. Las escalas temporales en las que se ha descompuesto la señal se describen en la Tabla 1. Dichas escalas vienen condicionadas por la frecuencia central de la *wavelet* madre utilizada y por la resolución temporal de la serie original, en nuestro caso 8 días para MODIS GPP y 16 días para MODIS EVI y MODIS NDVI. Se ha elegido la *wavelet* discreta Meyer por ser adecuada para el estudio de cambios a partir de series temporales (Giner, 2011; Martínez & Gilabert, 2009; Freitas & Shimabukuro, 2008), ser de fácil implementación y de bajo coste computacional. De este modo, las componentes A_6 y A_5 para las series MODIS GPP y EVI/NDVI, respectivamente, son las componentes que nos dan información sobre las variaciones interanuales en la cubierta, dado que presentan una escala temporal de 384 días. A las series de

tendencia A_6 y A_5 , se les aplicará el test no-paramétrico Mann-Kendall (de Beurs & Heinebry, 2005) y el método Sen (Sen, 1968) para evaluar la dirección y magnitud de las variaciones interanuales. El test Mann-Kendall ha demostrado ser apropiado (Alcaraz-Segura *et al.*, 2010a; Martínez & Gilabert, 2009; Hamed & Rao, 1998) para analizar series autocorrelacionadas con tendencias monótonas independientes del tipo de función de la tendencia (e.g. lineal, cuadrática, etc.). Dicho test permite evaluar la dirección de las variaciones y si dicha variación es significativa, pero no su magnitud. Para ello, se utiliza el método no-paramétrico Sen, el cual proporciona la pendiente de regresión para un parámetro en un punto de muestreo sin que el mismo se vea afectado por la presencia de covariantes, como es el caso de la regresión paramétrica. El cálculo de la pendiente Q se realiza según la expresión:

$$Q = \bar{p} \quad [6]$$

Tabla 1. Escalas temporales en las que se basa el método AMR para descomponer las series de GPP y EVI/NDVI, donde j es el nivel de descomposición y a su escala asociada ($a = 2^j$)

Nivel (j)	Escala (a)	Periodo MODIS GPP (días)	Periodo MODIS EVI/NDVI (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

$$p = (x_{i'} - x_i) / (i' - i) \quad [7]$$

donde \bar{p} es la media de las pendientes entre fechas consecutivas, las cuales se calculan como la diferencia entre los valores de la variable para los tiempos i' e i ($x_{i'}$ y x_i), dividida entre la diferencia entre los tiempos i' e i , siendo $i' > i$.

La Figura 3 muestra un ejemplo de la descomposición AMR para el píxel arbolado mixto situado en la Rioja. De acuerdo a la ecuación 5, la señal original para este píxel se puede expresar como $f(t) = A_5 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5$, donde las componentes de detalle reflejan variaciones atribuibles a las siguientes escalas temporales D_1 (12-24 días), D_2 (24-48 días), D_3 (48-96 días), D_4 (96-192 días) y, D_5 (192-384 días). La componente A_5 refleja las variaciones debidas a las escalas temporales mayores de 384 días y, por tanto, puede ser considerada como la serie de tendencia.

Resultados y discusión

La Figura 4 muestra las imágenes de la pendiente Q obtenida con el método Sen para aquellos píxeles forestales que mostraron tendencias significativas en el test de Mann-Kendall para la componente A_5 derivada de las series temporales 2000-2009 de EVI (Figura 4a), NDVI (Figura 4b) y GPP (Figura 4c). En negro aparecen los píxeles no significativos derivados al aplicar el test Mann-Kendall. En el caso del EVI y el NDVI, cabe destacar la alta proporción de zonas con tendencias negativas

(más extendidas e intensas en el caso del EVI), principalmente en el oeste de España y Pirineos, con respecto a las de tendencias positivas, principalmente en el este de España. La detección de tendencias en el verdor de la vegetación a partir de series temporales es altamente dependiente del periodo considerado y del año de inicio. Por ejemplo, mientras que durante el periodo 1992-2004 Martínez & Gilabert (2009) observaron pendientes positivas en el norte de España en la serie NDVI NOAA-AVHRR, durante el periodo 2000-2009 que abarca este estudio observamos pendientes negativas.

Por otra parte, se aprecia cómo zonas que experimentaron tendencias negativas en el NDVI durante los 90 (por ejemplo el sureste ibérico) muestran una recuperación del verdor de la vegetación desde el año 2000 (Figura 4). Estas diferencias en la tendencia respecto a otros trabajos (Martínez & Gilabert, 2009; del Barrio *et al.*, 2010) se pueden atribuir, en parte, al cambio en el régimen de precipitación para el periodo de estudio, tal como se muestra en las imágenes de tendencia del índice SPI para España durante las décadas 1990-1999 (Figura 5a) y 2000-2009 (Figura 5b). Como se puede observar en la Figura 5a, durante la década 1990-1999 en la costa mediterránea hubo un periodo de sequía que puede explicar las tendencias negativas en el verdor de la vegetación durante el periodo 1990-1999. Mientras que para la década 2000-2009 (Figura 5b), para esta misma zona, se observan tendencias positivas, que permiten interpretar la recuperación de la cubierta que se observa en la Figura 4. Así mismo, se observan tendencias

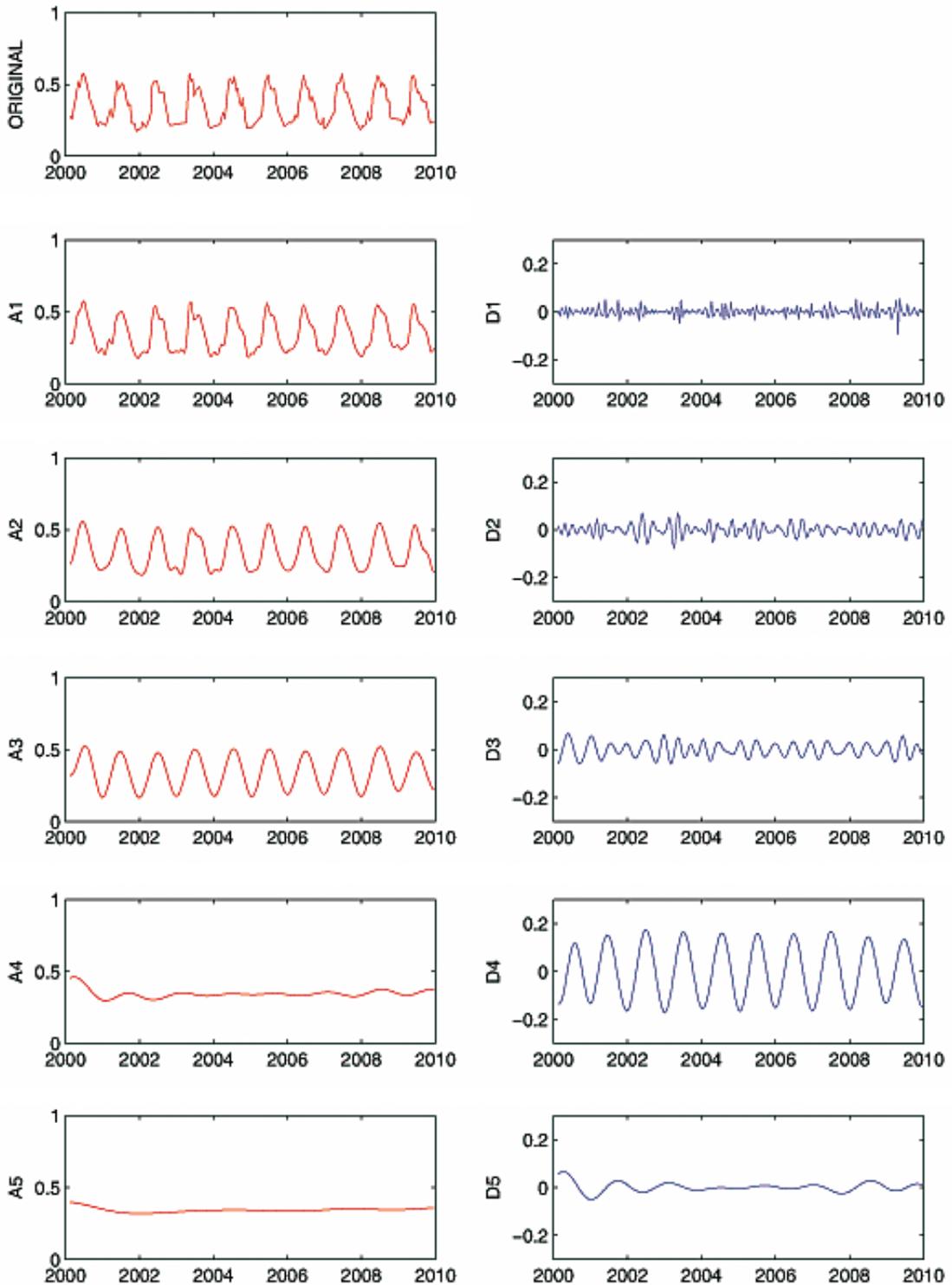


Figura 3. Descomposición por Análisis Multi-Resolución (AMR) de la serie temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) de un píxel MODIS ocupado para el píxel de arbolado mixto descrito en la figura 2 usando la *wavelet* de Meyer. A: series de Aproximación, resultado de pasar el filtro de baja frecuencia. D: series de Detalle, resultado de pasar el filtro de alta frecuencia. Escalas temporales: 1:(12-24 días), 2:(24-48 días), 3:(48-96 días), 4:(96-192 días), 5:(192-348 días). La señal original se descompone como A_1+D_1 ; a su vez, $A_1=A_2+D_2$, etc. Los resultados del análisis de tendencias sobre la componente A_5 del EVI en este píxel fueron: Pendiente de Sen=6.51, p-value <0.05.

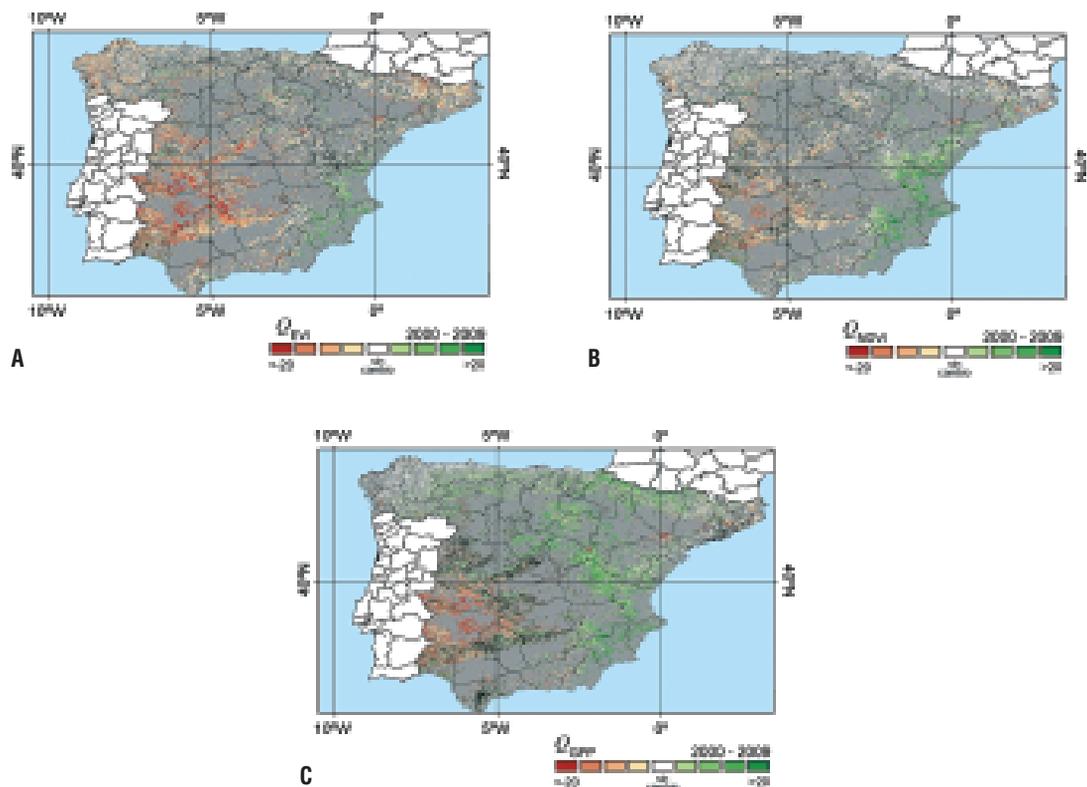


Figura 4. Pendiente (Q) derivada del AMR para la serie EVI (a), NDVI (b) y GPP (c) para toda la Península Ibérica. En negro están representados aquellos píxeles cuya tendencia es no significativa, y en gris se han enmascarado aquellos píxeles que no pertenecen a ninguna de las clases forestales consideradas.

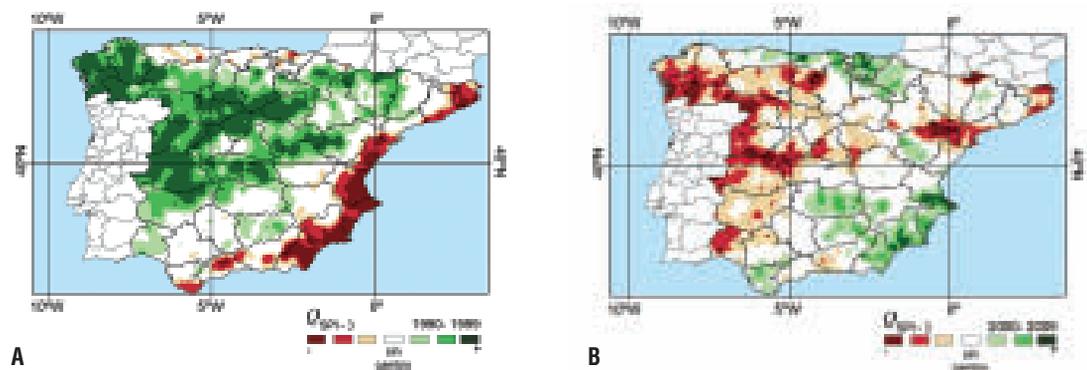


Figura 5. Pendiente del índice SPI para los periodos 1990-1999 (a) y 2000-2009 (b).

negativas en el SPI, durante el periodo de estudio 2000-2009, en el oeste de España, que se corresponden con un periodo de sequía registrado en 2003 (Pérez-Hoyos *et al.*, 2010).

En las tres imágenes de la Figura 4 se detectan tendencias importantes negativas que coinciden con incendios forestales acaecidos durante el periodo considerado. Estas zonas se distribuyen por toda el área de estudio y,

en algunos casos, coinciden con tendencias negativas del SPI (déficit de precipitación). Algunos de estos incendios se localizaron en la provincia de Guadalajara, con más de 13000 ha quemadas en la provincia de Huelva, con más de 28000 ha en 2004 (datos extraídos del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural de España y de la comisión Europea, <http://ies.jrc.ec.europa.eu>).

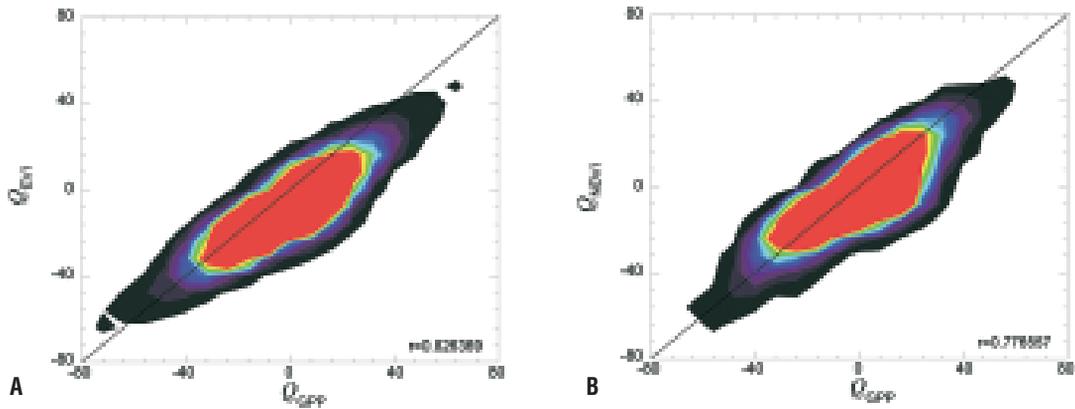


Figura 6. Diagrama de dispersión entre Q_{EVI} y Q_{GPP} (a) y Q_{NDVI} y Q_{GPP} (b) para el periodo 2000-2009, con histograma de densidad, donde los colores más cálidos representan mayor densidad de puntos.

En el caso de la GPP, se observa una mayor proporción de zonas con cambios positivos, sobre todo al norte y al este de España (al igual que el EVI y el NDVI). Se detectan similitudes con los índices EVI y NDVI en las zonas forestales del este de España y en áreas donde se han localizado incendios forestales (e.g. zona de Andalucía). Sin embargo, en muchas zonas donde la GPP muestra cambios positivos los índices presentan cambios no significativos y viceversa. Los cambios en GPP, EVI y NDVI se interpretan de forma distinta. La GPP de un ecosistema se refiere al carbono total fijado por las plantas durante la fotosíntesis. Parte del mismo se consume posteriormente 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 y el NDVI también aumenten. Esto es lo que sucede, principalmente, en las clases de coníferas localizadas al este de España (alta correlación entre las pendientes de $Sen Q_{GPP}$ y Q_{EVI} , y Q_{GPP} y Q_{NDVI}). Sin embargo, en la zona de frondosas al norte de la Península, la GPP muestra valores altos mientras que no se observa aumento de biomasa para el periodo considerado. Podríamos decir en este caso que aunque la vegetación sigue fijando carbono mediante fotosíntesis, prácticamente todo este carbono es devuelto a la atmósfera mediante la respiración. Es decir, no se genera biomasa nueva y, por tanto, los índices pueden que no experimenten cambios (o incluso podrían experimentar cambios negativos dependiendo del régimen de precipitación). Este es el com-

portamiento típico de bosques adultos: con frecuencia muestran un menor crecimiento de biomasa porque se ha alcanzado un equilibrio relativamente estable entre la producción bruta y la respiración. Consecuentemente, la producción neta es baja, en contraposición con lo que suele ocurrir en bosques más jóvenes (Escudero & Meidavilla, 2003).

A pesar de estas diferencias puntuales para las zonas forestales, se observa un acuerdo global aceptable entre las tendencias Q_{EVI} y Q_{GPP} (Figura 6a) y Q_{NDVI} y Q_{GPP} (Figura 6b), con unos coeficientes de correlación de 0.82 y 0.77, respectivamente. Cabe destacar los acuerdos más altos entre el EVI y GPP frente al NDVI y GPP cuando se consideran las clases de coníferas (0.82 y 0.65) y arbolado mixto (0.84 y 0.66), pero cambia la relación cuando se consideran frondosas (0.74 y 0.81) (Tabla 2). El orden de los coeficientes coinciden con resultados previos obtenidos en otros trabajos tanto en bosques de hoja perenne (Xiao *et al.*, 2004a), como de hoja caduca (Xiao *et al.*, 2004b).

Conclusiones

La mayor parte de las series temporales de vegetación que obtenemos por teledetección son no estacionarias, por tanto sus valores medios varían a lo largo del tiempo y presentan una tendencia. El análisis de series temporales es altamente dependiente del periodo de estudio, de la fecha de inicio de la serie temporal, de la variable en estudio, así como de la técnica

Tabla 2. Coeficientes de correlación, R, y porcentajes de píxeles considerados entre Q_{GPP} vs. Q_{EVI} y Q_{GPP} vs. Q_{NDVI} , considerando todas las especies de forma conjunta y de forma independiente.

Especies	R	%	R	%
	Q_{GPP} vs. Q_{EVI}		Q_{GPP} vs. Q_{NDVI}	
Coníferas	0.82	24.9	0.65	26.9
Fronosas	0.74	35.6	0.81	34.8
Arbolado mixto	0.84	4.9	0.66	5.3
Todos	0.69	65.4	0.77	66.9

ca de análisis utilizada. Por estos motivos, es necesario encontrar un método adecuado que nos permita derivar las variables de interés con suficiente rigor.

Al contrario que la transformada de Fourier que trata la señal con sinusoidales aisladas, predecibles y con un tamaño de ventana (escala temporal) fijo, la transformada *wavelet* divide la señal en un conjunto de ondas *wavelets* con distinta posición y escala de la *wavelet* original, lo que permite aplicarlas a series temporales no estacionarias y de rápida transitoriedad.

En nuestro caso, el análisis multi-resolución (AMR) basado en la TW ha mostrado ser eficiente para proporcionar distintas componentes temporales de la serie original, como la componente interanual. A partir de esta componente y mediante un análisis de su pendiente con el método Mann-Kendall y Sen hemos obtenido la magnitud y dirección del cambio experimentado por el verdor de la vegetación y su producción primaria bruta en las áreas forestales del territorio español. Tanto en MODIS GPP, como en los índices de vegetación, se ha apreciado un incremento en el sudeste de la España peninsular, así como tendencias negativas en el oeste, probablemente debidas a un cambio en el régimen de precipitaciones. En cuanto al norte y centro de España, donde se observan mayores diferencias entre las tendencias de GPP, EVI y NDVI, estas parecen producirse en masas forestales maduras, en las que un aumento en la GPP no tiene por qué representar un aumento de la biomasa, por tanto las tendencias positivas de GPP no siempre se corresponderán con tendencias positivas en los índices NDVI y EVI.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto ARTEMIS (CGL2008-00381) del MICINN y Land-SAF de EUMETSAT. Agradecemos a F.J. García-Haro la serie temporal de SPI.

Referencias

- ALCARAZ-SEGURA, D., LIRAS, E., TABIK, S., PARUELO, J., & CABELLO, J. 2010a. Evaluating the Consistency of the 1982-1999 NDVI Trends in the Iberian Peninsula across Four Time-series Derived from the AVHRR Sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors*, 10: 1291-1314; doi:10.3390/s100201291.
- ALCARAZ-SEGURA, D., CHUVIECO, E., EPSTEIN, HE., KASISCHKE, E., & TRISHCHENKO, A. 2010b. Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16(2): 760-770.
- AZZALI, A., & MENENTI, M. 2000. Mapping vegetation-soil complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA AVHRR NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 973-996.
- BRUZZONE, L., SMITS, P. C. & TILTON, J. C. 2003. Foreword special issue on analysis of multitemporal remote sensing images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 41(11): 2419-2422.
- 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.
- COOPS, N. C., WARING, R. H., & LANDSBERG, J. J. 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy

- photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management*, 104: 113-127.
- DE BEURS, K. M., & HENEERY, G. M. 2005. A statistical framework for the analysis of long image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 1551-1573.
- DEL BARRIO, G., PUIGDEFÁBREGAS, J., SANJUÁN, M. E., STELLMES, M., & RUIZ, A. 2010. Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989-2000. *Remote Sensing of Environment*, 114: 1817-1832.
- EASTMAN, J. R., & FULK, M. 1993. Long sequence time series evaluation using standardized Principal Components. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(6): 991-996.
- ESCUADERO, A., & MEDIAVILLA, S. 2003. Dinámica interna de los nutrientes. *Ecosistemas* 2003/1 (URL: www.aet.org/ecosistemas/031/investigacion7.htm).
- FIELD, C. B., BEHRENFELD, M. J., RANDERSON, J. T., & FALKOWSKI, P. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 281 (5374): 237-240.
- FREITAS, R. M., & SHIMABUKURO, Y. E. 2008. Combining wavelets and linear spectral mixture model for MODIS satellite sensor time-series analysis. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 1, 33-38 (5374): 237-240.
- GARCÍA-MORA, T. J., & MAS, J.-F. 2011. Presentación del sensor MODIS. En MAS, J.-F, Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio, 1ª ed. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 11-24.
- GINER, C. 2011. Anàlisi de sèries temporals dels boscos de la Península Ibèrica a la dècada 2000-2009. Treball fi de màster (Màster en Teledetecció, Universitat de València).
- HAMED, K. H., & RAO, A. R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204, 182-2574.
- HIROSAWA, Y., MARSH, S. E., & KLIMAN, D. H. 1996. Application of standardized principle component analysis to land-cover characterization using multitemporal AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 58: 267-281.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., & FERREIRA, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195-213.
- IQBAL, M. 1983. An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, Canada, 390 pp.
- JJ, L., & PETERS, A. J. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 85-98.
- JÖNSON, P., & EKLUNDH, L. 2004. TIMESAT-a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845.
- MALLAT, S. 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11: 674-693.
- MARTÍNEZ, B., & GILABERT, M. A. 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 113: 1823-1842.
- MONTEITH, J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9: 747-766.
- PARUELO, J. M., EPSTEIN, H.E., LAUENROTH, W. K., & BURKE, I. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78:953-958.
- PERCIVAL, D. B., & WALDEN, A. T. 2000. Wavelet methods for time series analysis. Cambridge University Press 594 pp.
- PERCIVAL, D. B., WANG, M., & OVERLAND, J. E. 2004. An introduction to wavelet analysis with application to vegetation monitoring. *Community Ecology*, 5: 19-30.
- PÉREZ-HOYOS, A., MARTÍNEZ, B., GILABERT, M. A., & GARCÍA-HARO, F. J. 2010. Multi-temporal analysis for vegetation dynamics assessment in the Iberian Peninsula using MODIS-NDVI data. *EARSEL eProceedings*, 9 (2), 22-30.
- POTTER, C. S., & KLOOSTER, S. A. 1997. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: Response to change in vegetation quality and biomass allocation. *Tellus*, 49B(1):1-17.
- PRINCE, S. D., & GOWARD, S. N. 1995. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22: 815-835.
- RIGINA, O., & RASMUSSEN, M. S. 2003. Using trend line and principal component analysis to study vegetation changes in Senegal 1986-1999 from AVHRR NDVI 8 km data. *Geografisk Tidsskrift, Danish Journal of Geography*, 103(1): 31-42.
- RUNNING, S. W., & NEMANI, R. R. 1988. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sensing of Environment*, 24: 347-367.
- RUNNING, S. W., THORNTON, P. E., NEMANI, R. R., & GLASSY, J. M. 2000. Global terrestrial gross and net primary production from the Earth Observing System. Páginas 44-57 en SALA, O. E., JACKSON, R. B., MOONEY, H. A., HOWARTH, R. W., eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer-Verlag.

- RUNNING, S. W., NEMANI, R. R., HEINSCH, F. A., ZHAO, M., REEVES, M., & HASHIMOTO, H. 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54: 547-560.
- SAKAMOTO, T., YOKOZAWA, M., TORITANI, H., SHIBAYAMA, M., ISHITSUKA, N., & OHNO, H. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96: 366-374.
- SEN, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389.
- STELLMES, M., RÖDER, A., UDELHOVEN, & T. HILL, J. 2013. Mapping syndromes of land change in Spain with remote sensing time series, demographic and climatic data. *Land Use Policy*, 30: 685-702.
- STÖCKLI, R., & VIDALE, P. L. 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 3303-3330.
- TRISHCHENKO, A. P., CIHLAR, J., & LI, Z. 2002. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 81: 1-18.
- TUCKER, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 8: 127-150.
- TUCKER, C. J., & SELLER, P. J. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7-11: 1398-1416.
- VAN LEEUWEN, W. J. D., HUETE, A. R., & LAING, T. W. 1999. MODIS vegetation index compositing approach: A prototype with AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 69: 264-280.
- VERMOTE, E., EL SALEOUS, N., & JUSTICE, C. 2002. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sensing of Environment*, 83: 97-111.
- VICENTE-SERRANO, S. M., & HEREDIA-LACLAUSTRA, A. 2004. NAO influence on NDVI trends in the Iberian Peninsula (1982-2000). *International Journal of Remote Sensing*, 25: 2871-2879.
- XIAO, X., HOLLINGER, D., ABER, J., GHOLTZ, M., DAVIDSON, E. A., ZHANG, Q., & MOORE, B. 2004a. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89: 519-534.
- XIAO, X., ZHANG, Q., BRASWELL, B., URBANSKI, S., BOLES, S., WOFSY, S., MOORE, B., & OJIMA, D. 2004b. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91: 256-270.
- ZHANG, X., FRIEDL, M. A., SCHAAF, C. B., STRAHLER, A. H., HODGES, J. C. F., GAO, F., et al. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84: 471-475.
- ZHAO, M., RUNNING, S.W., & NEMANI, R. R. 2006. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal of Geophysical Research*, 111, G01002, 13 pp. doi:10.1029/2004JG000004.
- ZHAO, M., & RUNNING, S.W. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329: 940-943.

Propuesta metodológica para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe: estado de situación y avances

P. Blanco¹, G. López Saldaña², R. Colditz², L. Hardtke¹, N. Mari³,
A. Fischer³, C. Caride³, P. Aceñolaza⁴, H. del Valle¹, S. Opazo⁵, W. Sione⁴,
M. Lillo-Saavedra⁶, P. Zamboni⁴, I. Cruz López², J. Anaya⁷,
F. Morelli⁸ y S. de Jesús⁸

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 Tecnologías 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 Previsão 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, árboles de decisión, MODIS, SERENA.

Abstract

A new methodology for systematic mapping of land covers in Latin America and Caribbean

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.

Key words: landcover, Latin America and Caribe, decision trees, 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 de-

* Autor para la correspondencia: blanco@cenpat.edu.ar
Recibido: 03-04-12; Aceptado: 30-11-12.

sarrollando 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, valiéndose del conocimiento de los diferentes tipos de cubiertas, a nivel local, de los expertos 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 Canadá, 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).
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.

Adquisición y pre-procesamiento de los datos MODIS y la información auxiliar

El Sensor MODIS (Moderate Resolutions Imaging Spectroradiometer), 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, para el año 2008, con 500 m de resolución espacial de las primeras 7 bandas del sensor a

Tabla 1. Leyenda SERENA para la clasificación de coberturas y uso del suelo de LAC

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

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 han utilizado 8 variables [7 bandas espectrales más el Índice Diferencial de Vegetación Normalizada (NDVI)]; siendo evaluadas con 5 estadísticos: media, desvío estándar, mínimo, máximo, y rango entre ambos, obteniendo un total de 40 métricas derivadas de los datos MODIS. Esto fue calculado para año redondo, 6, 4 y 3 meses. 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 2×2 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

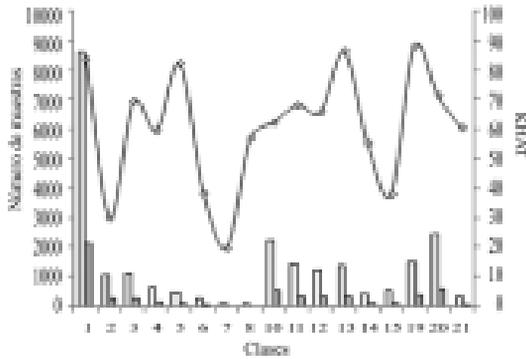


Figura 1. Distribución de puntos de entrenamiento (barras blancas) y validación (barras grises) sobre eje izquierdo, y coeficiente Kappa (KHAT) (línea) sobre eje derecho, para cada clase considerada en la clasificación. Ver Tabla 1 para los códigos de las clases.

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 (Figura 1).

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 mascarar

Las clases Cuerpos de Agua, Hielo y nieve permanente, y Areas Urbanizadas no son clasificadas, sino que son aplicadas en forma de mascarar 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 bandas 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%). Se elaboraron matrices de confusión, las cuales permiten confrontar la información de los sitios de verificación y la imagen clasificada. Se calcularon los valores de la fiabilidad del usuario (proporción de sitios de verificación de la categoría considerada clasificados como tal) y del productor (proporción de sitios clasificados en la categoría considerada en el mapa que están correctamente clasificados). Estos dos índices de fiabilidad están relacionados con los errores de omisión y de comisión respectivamente. Asimismo, fueron cal-

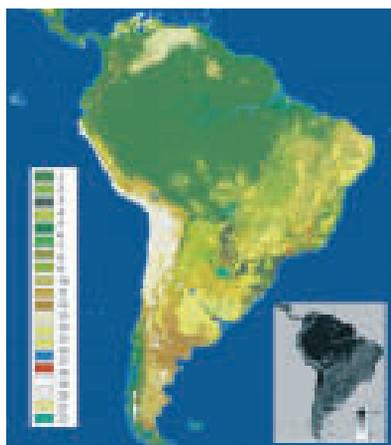


Figura 2. Cartografía preliminar de cobertura y uso del suelo para LAC con su respectiva confianza. Ver Tabla 1 para los códigos de la leyenda.

culados los coeficientes Kappa (KHAT) 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 global=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.

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.

La técnica de *boosting* utilizada para entrenar los árboles de clasificación, a partir de los datos de entrenamiento considerando las dimensiones espectrales y temporales, permite generar reglas de decisión que pueden ser generalizables a cualquier otro de año de la base de datos MODIS (2000-2012) para la misma zona de estudio.

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.

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.

Referencias

ARINO, O., BICHERON, P., ACHARD, F., LATHAM, J., WITT, R., & WEBER, J. 2008. GLOB-

- COVER-The most detailed portrait of Earth. *ESA Bulletin-European Space Agency*, 24?31.
- BARTHOLOME, E., & 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., & 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., & 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., & 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.

Validación del método de Nanni y Dematte para obtener mapas de propiedades del suelo en una isla del Danubio

E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles

*Dpto de Física de la Tierra y Termodinámica, Facultad de Física, Univ. de Valencia.
46100 Burjassot (Valencia)*

Resumen

Para el desarrollo de la agricultura es necesario determinar las propiedades y fertilidad del suelo. Normalmente, se usan análisis de fertilidad de suelos y de fertilidad foliar complementados con análisis granulométricos y mineralógicos; utilizando para ello calicatas e inspeccionando el terreno in situ, tomando muestras de suelos y realizando ensayos de campo. Esta forma de proceder requiere, aproximadamente, la toma de hasta una muestra por ha dependiendo de los objetivos del análisis, lo que alarga y encarece enormemente este tipo de estudios. Sin embargo, la teledetección constituye una herramienta que presenta ventajas comparativas con el análisis clásico para determinar las propiedades del suelo. Correlaciones entre las distintas bandas del espectro electromagnético y las propiedades del suelo nos permiten estimar los atributos del mismo. Así, el objetivo de este trabajo es determinar el contenido de arena, arcilla y materia orgánica en el suelo, utilizando las reflectividades en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 del Thematic Mapper del Landsat y aplicando las ecuaciones obtenidas para suelos en Brasil (Nanni y Dematte, 2006) en un suelo de diferentes características. Como zona de estudio hemos elegido una isla del Danubio en Rumania. En este caso la taxonomía del suelo es mayoritariamente molisol, frente a la composición de los suelos brasileños, oxisoles y ultisoles (Soil Survey Staff, 1999). Situada a 350 km de la desembocadura del río, en las proximidades de la población de Roseti, en el partido judicial de Calarasi las coordenadas geográficas de la isla son: entre 44° 07' y 44° 13' de latitud Norte y entre 27° 19' y 27° 34' de longitud Este. Los contenidos medios de arena, arcilla y materia orgánica, determinados 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 del 2%. Lo que da validez e importancia al método utilizado en este artículo, ya que las ecuaciones fueron desarrolladas en condiciones distintas a las aplicadas durante este estudio.

Palabras clave: materia orgánica, contenido en arena, contenido en arcilla, Thematic Mapper.

Abstract

Nanni and Dematte's method validation for obtaining soil properties maps in a Danube's island

For agriculture development is required to determine the soil properties and fertility. Normally, soil fertility and leaf fertility analyses complemented with granulometric and mineralogical analyses are used; therefore routine soil testing and profiling in situ are used. This procedure requires, approximately, to take up to one sample per ha, depending on the goals of the study which is expensive and time-consuming. However, remote sensing constitutes a tool that presents advantages to determine soil properties in comparison with classical analysis. A correlation between the different bands of the electromagnetic spectrum and the soil properties permits us to estimate soil attributes. Then, in this paper the reflectances of Landsat's Thematic Mapper in bands 1, 2, 3, 4, 5 and 7 are used to determine the soil characteristics, sand, clay and organic matter contents, by applying the equations obtained for Brazilian soils (Nanni y Dematte 2006) in a different kind of soil. As study area we have selected an island of the Danube river in Romania. In this case, soil's taxonomy is mostly mollisol instead of the

* Autor para la correspondencia: eduardo.caselles@uv.es

Recibido: 21-09-12; Aceptado: 30-11-12.

original composition of Brazilian soils, oxisols and ultisols (Soil Survey Staff, 1999). Located 350 km away from the estuary of the river, near the Roseti village, in Calarasi district. The geographical coordinates of the island are: between 44° 07' and 44° 13' N latitude and between 44° 07' and 44° 13' E longitude. The sand, clay and organic matter average contents of the island determined 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 of 2% was obtained. That gives validity and relevance to the used method in this article since the equations development conditions were different to the ones of this study.

Key words: organic matter, sand content, clay content, Thematic Mapper.

Introducción

Los métodos establecidos en la bibliografía para caracterizar suelos utilizan los análisis granulométricos y mineralógicos junto a análisis de fertilidad de suelos y de fertilidad foliar como técnicas básicas para determinar la composición del suelo (Nanni y Dematte, 2006). 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. Este esfuerzo se debe en parte a que una gran mayoría de los planes medioambientales y agrícolas requieren análisis de suelos. Porque el conocimiento de los componentes minerales y orgánicos, de la aireación y capacidad de retención del agua, así como de otras propiedades de los suelos, es necesario para la conseguir una agricultura productiva y de calidad. 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 (van Raij *et al.*, 1996). En algunos casos, como en zonas en las que se realiza agricultura de precisión, se recomienda tomar una muestra cada ha (Wolkowski y Wollenhaupt, 1994). Pero es necesario remarcar, que el muestreo también está estrechamente ligado a la variabilidad espacial en el suelo, pudiendo necesitarse calicatas cada 50 m en adelante. Así pues, aunque los análisis de suelos son muy necesarios, en innumerables ocasiones terminan convirtiéndose en procesos muy costosos y laboriosos a la vez (Dematte *et al.*, 2001).

La teledetección es una propuesta alternativa para determinar algunos de los atributos del suelo utilizando los métodos apropiados y bajo condiciones atmosféricas y de suelo favorables, es decir, suelos sin cobertura vegetal. En

efecto, la literatura muestra que a partir de correlaciones con los datos de reflectividad espectral es posible estimar algunas propiedades del suelo. Así, Frazier y Cheng (1989) ya emplearon el sensor Thematic Mapper para discriminar áreas del estado de Washington (USA) en las que la erosión había permitido que emergieran paleosoles, permitiendo dibujar líneas de suelo que pudieran ser subdivididas en diferentes niveles según su materia orgánica y el contenido de óxidos de hierro. Posteriormente, Rowan y Mars (2002) emplearon imágenes del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) para identificar y localizar los grupos litológicos más importantes en áreas de buena exposición, mediante técnicas de coincidencia espectral, calibradas con medidas in situ. Por otro lado, Vaughan *et al.* (2005) proponen emplear imágenes del infrarrojo térmico para obtener las propiedades minerales de sistemas geotérmicos activos, diferenciando entre zonas ricas en silicio y arcilla, diversos minerales (incluyendo ópalo, cuarzo, alunita, anortita, albita y caolinita). Para ello, utilizaron el espectrómetro multispectral MASTER y el hiperespectral SEBASS sobre la zona de Steamboat Springs, en Nevada (USA). Finalmente, Nanni y Dematte (2006) presentan el trabajo más completo de los publicados hasta ahora. Realizan una comparación entre los métodos tradicionales de analizar las principales propiedades del suelo, proponiendo una nueva metodología, alternativa a las tradicionales, para realizar dichos análisis a partir de reflectividades espectrales. Aplicándola a suelos tropicales de Brasil, a partir de las reflectividades correspondientes al sensor Landsat Thematic Mapper.

Por ello y para avanzar un paso más, el objetivo de este artículo será la validación del méto-



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

do propuesto en Brasil (Nanni y Dematte, 2006) para los suelos de una zona de Rumania, proporcionando así mapas de propiedades del suelo como contenido de arena, arcilla y materia orgánica para una isla del Danubio utilizando técnicas de teledetección sobre suelos desnudos.

Zona de estudio

La zona de estudio queda acotada a un área de 16.000 ha localizada entre las coordenadas 44° 07' y 44° 13' de latitud Norte y entre 27° 19' y 27° 34' de longitud Este, en el último octavo del río Danubio (ver figura 1), donde la taxonomía del suelo corresponde a un molisol (Soil Survey Staff, 1999). Esta área queda contenida en una isla situada a 350 km de la desembocadura del río, en las proximidades de Roseti, en el partido judicial de Calarasi. Y ha sido seleccionada porque, salvo en casos de inundaciones, su composición permanece invariable en el tiempo.

Esta isla presenta como característica un nivel freático inferior al nivel del río en primavera, cuando se produce el deshielo de los Alpes y las lluvias más intensas. Por consiguiente, en ocasiones algunas partes de la misma aparecen inundadas (Caselles *et al.*, 2012).

Métodos

Inicialmente las relaciones utilizadas en esta publicación fueron obtenidas en el laboratorio y para suelos de Brasil (oxisoles y ultisoles) por Nanni y Dematte (2006); y el objetivo de nuestro trabajo consistió en comprobar que estas relaciones se pueden emplear

en un tipo de suelo con diferente génesis a la original.

Se utilizó, para la validación del método, imágenes Landsat-TM de dicha isla. El uso de información obtenida por el sensor Thematic Mapper se debe fundamentalmente a que fue el empleado en el trabajo original. Este sensor dispone de 30 m de resolución espacial que permite analizar perfectamente la isla, con un tamaño aproximado de 8 × 20 km. Tras la recopilación de un conjunto inicial de 53 imágenes libres de nubosidad y que ya estaban corregidas atmosféricamente por el método de Caselles y López-García (1989), datadas en el período 1991-2010, se llevó a cabo una selección de las mismas, escogiendo aquellas posteriores a la eliminación de hierbas y rastrojos anual, con el fin de disponer áreas con suelo desnudo, requerido por el método original. Elegidas las 47 imágenes correspondientes a los meses entre mayo y agosto, se optó por las 6 con fecha del mes de junio de los distintos años, por ser éstas las más cercanas al período en que la isla no está cultivada.

El 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.

El contenido en arcilla de la isla se estimó a través de la expresión (Nanni y Dematte, 2006):

$$\text{Clay}^{1/2} = 27,03 - 1,260 \text{ TM1} + 0,363 \text{ TM3} - 0,301 \text{ TM4} + 0,305 \text{ TM5} - 0,848 \text{ TM7} \quad [2]$$

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.

El contenido en materia orgánica se estimó a través de la expresión (Nanni y Dematte, 2006):

$$\text{Materia Orgánica}^{1/2} = 7,084 - 0,109 \text{ TM7} - 0,102 \text{ TM2} \quad [3]$$

donde TM2 y TM7 son las reflectividades a nivel del suelo medidas en los canales 2 y 7 del Thematic Mapper del satélite Landsat.

Resultados

A continuación mostramos los tres mapas de propiedades del suelo para la isla en el mes de junio de 2007.

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.

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.

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.

Para validar estos resultados, se realizó un análisis multitemporal de los parámetros propuestos (contenidos en arena, arcilla y materia orgánica) para el periodo 2007 a 2010.

Finalmente se obtuvo un conjunto de imágenes Landsat TM sin nubosidad y corregidas de los fenómenos atmosféricos correspondientes al mes de junio de los distintos años, como se ha descrito anteriormente. Los resul-

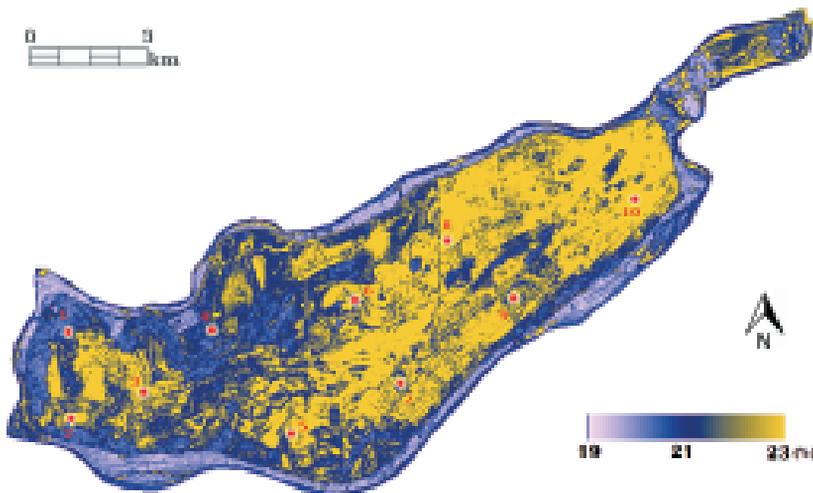


Figura 2. Contenido en arena de la isla en junio de 2007. Nótese que sobre esta imagen se señala, también, la ubicación de los puntos de muestreo utilizados para la validación del método.

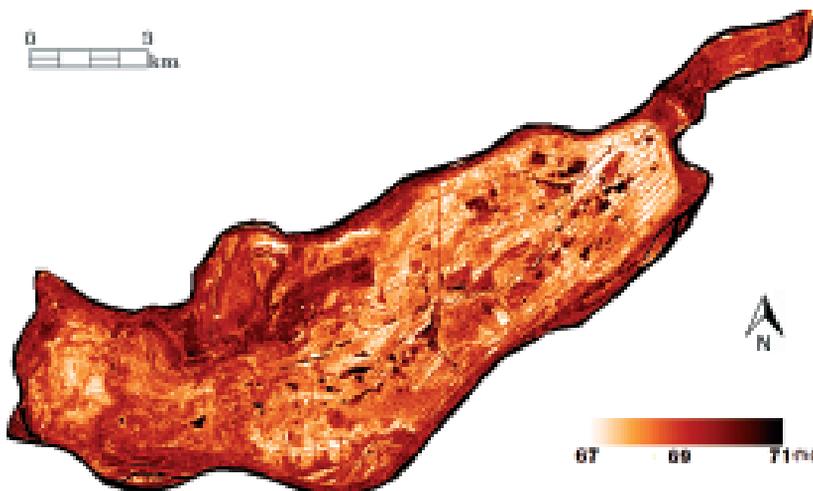


Figura 3. Mapa del contenido en arcilla de la isla para junio de 2007.

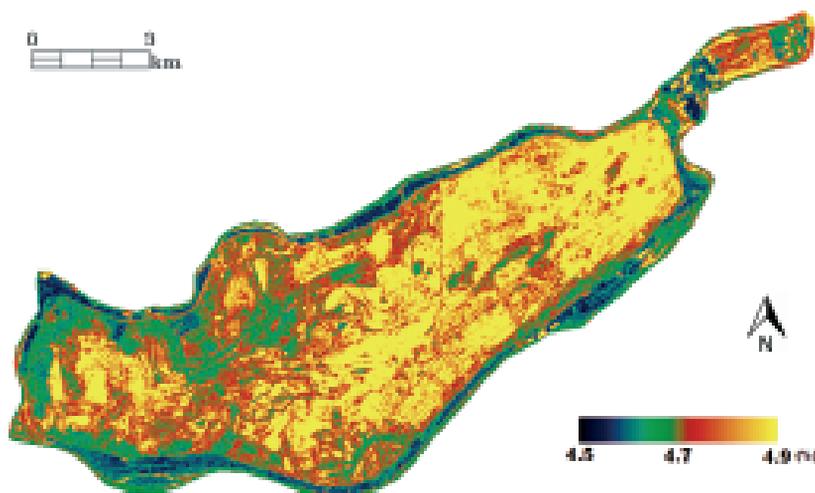


Figura 4. Mapa de contenido en materia orgánica de la isla para junio de 2007.

tados a los que hemos llegado quedan representados en la Tabla 1 para los contenidos en arena, arcilla y materia orgánica, respectivamente.

Para evaluar la aplicabilidad del método de Nanni y Dematte (2006) a un suelo de la isla del Danubio durante el periodo 2007 a 2010, en la Tabla 1 se han representado dos columnas de datos procedentes de la aplicación de las ecuaciones a las imágenes TM que incluyen, para cada año, los valores máximos y mínimos de los tres componentes estimados: arena, arcilla y materia orgánica. 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 pequeño para los valores máximos y mínimos de los porcentajes de arcilla (de 67,7 a 69,0 y de 69,3 a 69,7).

Suponemos que las propiedades del suelo en la isla no deberían variar en un período breve de tiempo, en ausencia de inundaciones debidas a una crecida del río. Sin embargo, como se puede apreciar con la ligera variación del valor mí-

nimo de arcilla, la isla quedó anegada en el lapso de tiempo entre la imagen del 2009 y la del 2010. Posteriormente con el laboreo de los campos este valor medio vuelve a estabilizarse.

Por tanto, podemos decir que, en líneas generales, los valores de arcilla, arena y contenido en materia orgánica permanecen constantes para el período estudiado, como debe de ser para una isla durante una ventana temporal del orden de 4 años.

Los contenidos medios de arena, arcilla y materia orgánica obtenidos a partir de las imágenes TM, 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» (Caselles *et al.*, 2012). Éstas consistieron en la toma de muestras superficiales de suelos mediante un muestreo, que se realizó aleatoriamente por toda la isla. Se tomó un total de 10 muestras (ver Figura 2). Se analizaron por separado y después se tomó su valor medio para compararlo con el valor obtenido de las imá-

Tabla 1. Variaciones observadas en la composición de la isla durante el período 2007-2010

Año	Arena(%)		Arcilla(%)		Materia Orgánica(%)	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
2007	20,5	19,6	69,3	67,7	5,0	4,9
2008	20,2	19,6	69,0	67,9	5,0	4,9
2009	20,1	19,6	69,4	67,7	5,0	4,9
2010	20,0	19,6	69,7	69,0	5,0	4,9

Tabla 2. Comparativa de los valores medios obtenidos a partir de las imágenes TM, en porcentajes de arcilla, arena y materia orgánica, con las medidas in situ realizadas

	Valores estimados (%)	Valores medidos (%)	Diferencia (medidos-observados) (%)
Arena	21	24	+3
Arcilla	69	66	-3
Materia orgánica	5	5	0
Valor medio			2

genes TM. Las diferencias entre los valores medios medidos y estimados fueron del 2% (Ver Tabla 2).

Conclusiones

Como conclusiones del trabajo podemos señalar que:

1. A partir de datos espectrales proporcionados por las bandas del satélite LANDSAT-TM, es posible estimar algunos parámetros del suelo (como su contenido en arena, arcilla y materia orgánica), y

2. El método propuesto por Nanni y Dematte (2006) para suelos brasileños (oxisoles y ultisoles) presenta resultados satisfactorios para los suelos de la isla del Danubio (molisoles).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la GV (proyecto PROMETEO/2009/086) y al MICINN (proyecto CGL2010-17577) la financiación recibida y a los revisores anónimos sus comentarios y sugerencias realizadas que han permitido mejorar considerablemente el artículo.

Referencias

CASELLES, E., PITARCH, C., & CASELLES, V. 2012. Determinación del nivel freático del agua subterránea de una isla mediante imágenes del altímetro ASTER. *Revista de Teledetección*, 37, 5-8.

CASELLES, V., & LÓPEZ-GARCÍA, M. J. 1989. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1127-1134.

DEMATTE, J. A. M., DEMATTE, J. L. I., CAMARGO, W. P., FIORIO, P. R., & NANNI, M. R. 2001. Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, 38, 79-102.

FRAZIER, B. E., & 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., & 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., & 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.

VAN RAIJ, B., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., & FURLANI, A. M. C. 1996. Fertilizer recommendation for São Paulo State, 2. Instituto Agronômico & Fundação IAC, Campinas.

VAUGHAN, R. G., HOOK, S. J., CALVIN, W. M., & TARANIK. 2005. Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multiwave length thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, 99, 140-158.

WOLKOWSKI, R. P., & WOLLENHAUPT, N. C. 1994. Grid soil sampling. *Better Crops*. 78, 6-9.

SOIL SURVEY STAFF. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. *Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436*. <http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy/>

Caso práctico

Contribution to the management of the sensitive spaces by the geographical information systems and remote sensing: the case of the basin of the Gharb (Morocco)

A. Amrani¹, M. El Wartiti¹, M. Zahraoui¹, A. Calle² and J-L. Casanova²

¹ *Laboratoire de géologie appliquée, Université Mohammed V, Rabat (Morocco).*

² *Dpto. de Física Aplicada. Universidad de Valladolid.*

Resumen

Contribución de los sistemas de información geográfica y la teledetección a la gestión de espacios sensibles: el caso de la cuenta del Gharb (Marruecos)

El estudio de las limitaciones naturales en la depresión del Gharb y su costa, se basa en la integración y el análisis numérico de los datos procedentes de múltiples fuentes y métodos convencionales clásicos de síntesis. El área de interés es una depresión asimétrica limitada por dos dominios estructurales importantes, en el sur de la Meseta y el Rif en el norte. El resultado de esta configuración es un área plana con cauces de ríos poco profundos. El clima es mediterráneo. Desde el punto de vista sísmo-tectónico, el área de estudio es inactivo. Su parte central corresponde a zonas de sismicidad baja o antisísmico. La morfología, la contaminación del agua y el suelo, cubierta vegetal y la explotación de canteras son las limitaciones que modelan la depresión Ghrab. La integración de todos los datos en un SIG desde múltiples fuentes de datos, se muestra como la herramienta más eficaz.

Palabras clave: Teledetección, SIG, Estudio geomorfológico, Gharb.

Abstract

The study of the natural constraints in the basin of the Gharb with his littoral is based on the integration and the numeric analysis of the multisource data and a classical synthetically approach. The zone is a dissymmetric basin, limited by two great structural domains: Mesetan domain to the South and Rifian domain to the North. It results from this configuration a flat zone with not very deep stream beds. The climate is of Mediterranean type. From a seismic-tectonic, the study zone is nether quiet central part corresponds to low seismic domains. The morphology, the pollution of water and soils, the vegetation and the exploitation of the quarries are the main constraints questioning the management of the basin of the Ghrab. The integration of the whole multisource data in a GIS and remote sensing, seems the more efficient method in term of the time and for the management of the spatially referenced data.

Key words: Remote sensing, GIS, geomorphologic study, Gharb.

* Autor para la correspondencia: amrani.auc@gmail.com

Recibido: 04-07-12; Aceptado: 12-09-12.

Introduction

Any project of regional planning and urbanization, such as the installation of the great infrastructures and projects structural aims the preparation a logic diagram making it possible to act in various ways. The objective is to show the environmental values of the zone in question. In the case of the socio-economically active depression of Gharb and in order to understand its specificities, we propose in this work to define the current physical state characterizing its natural environment. Within this framework will be to support the potentialities and the environmental constraints relating to the climate, ground, under-ground, geomorphology, water resources and biodiversity. Their definitions will be based on the combination of a digital surface updated analysis (thematic cards), so, will be drawn their interactions towards the geomorphological, ecological and geological environment, the purpose of which is to define the natural risks and their impact on the process of land settlement and the management of the sensitive spaces.

In this study, we shall become attached to the development of the quantitative and qualitative modelling of the potentialities and the physical constraints relating to any types of process of land settlement of the Gharb plain. In this frame the subject of the environment will have for objective to answer the question: Why the study of the natural risks in a territory so vulnerable in mid-term and long-term as the Gharb plain?

The Gharb plain aroused numerous geological, geomorphological studies (Michard, 1976; Thauvin 1996; Zouhri *et al.* 2001, 2002; Kacimi, 2004) and pedological studies (Ormvag, 1994 and Resing, 1994). Because of its extent and its agricultural profitability, the study of the constraints of development of the sensitive spaces, make that it is essential to resort to integration, in a SIG, of multi-source data. The cartography of the physical elements such, the catchment area, water resources, vegetable cover, the seismic-tectonic and grounds. This technique will make it possible to specialize the zones easily flooded, vulnerable, no suitable, etc.

So we will be interested in the relations between the natural constraints and their impacts on management of the territory of the plain. This one is given an important ecological inheritance diversified (littoral zone; plains; sites of biological and ecological interest (SIBE), forests, lakes, fertile grounds. This environment remains, in certain places, which we will delimit, fragile with very vulnerable. Their protection and safeguarding should be the subject of the governmental and non-governmental, national and international interventions.

Considering its environmental characteristic, the Gharb plain arouses a great interest of the various operators. The zone of Gharb is richest (fertile grounds, water available, easy accessibility, geographical proximity, beaches) in against part these assets are the subject of a bad management by ignorance (dewatering, water pollution, ground and ecology) these impacts constitute a permanent natural risk (risk of flood, impoverishment of the littoral zone). The protection and the safeguarding of the natural resources are real concerns. The analysis and the discussions below will be a prelude to the principal recommendations to follow for a good control of our territory.

These will allow us to begin a thematic discussion explaining the main questions, the objective of which is to facilitate, to the socio-economic operators, the understanding of the physical characteristics, their potentialities and their constraints, so recommendation and the measures to be taken.

Area of study

The Gharb plain is a Flat zone and directly open on the Atlantic Ocean. It is limited to the North by the first deformations of the chain, to the East by the basin of Saïs and the first mountainous reliefs of the Middle Atlas, to the South by central Morocco and to the West by the Atlantic Ocean. The perimeter of the studied area occupies the Northwestern center of Morocco and the Western part of basin of Sebou. The average altitude varies between 0 m and 200 m. These features are summarized in the figure 1.



Figure 1. Geographical situation map of the Gharb basin.

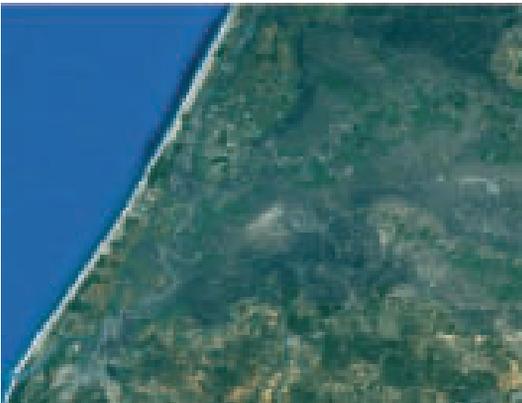


Figure 1'. Image google-maps (2012) Gharb Basin (visible channel).

Materials and methods

The use of satellite remote sensing as a tool for control, management and development of the natural environment, has become increasingly necessary for preventive risk studies and studies of spatial planning. As such, satellite imagery could provide relevant information on the direct and indirect land in question. Indeed, these images, provided by onboard sensors by satellites, constantly becoming more efficient, in terms spectral resolution, spatial, radiometric and temporal.

In the present work, we will use only the generation of images TM and ETM + (Enhanced Thematic Mapper plus), whose acquisition of

Landsat data globally, medium resolution (30 m resolution). This mission has gained a wealth of data on the terrestrial and monitoring of natural phenomenal changes and/or man. Given their spatial and temporal resolution, the sensor TM and ETM + images to provide a medium scale.

This study is largely based on photo interpretation, computer, digital spatial data in 2D (spatial and temporal analysis of satellite images Landsat TM and ETM +, topographic maps at 1/100 000 and others) and a classical synthetic approach (literature and controls the land). The data set is integrated into a Geographic Information System (GIS).

The purpose of this work will be to define the environmental potentialities and constraints, having direct and indirect impacts on the integrated installation in the sensitive areas. The definition of the potentialities and the constraints will be based on a space analysis of the geoinformation. In front of the multitude and the diversity of information, a data base to space reference (BDRS) will be developed, and will allow the integration of the whole of information in a SIG, whose paramount objective is to delimit the sensitive surfaces, according to degrees' of vulnerabilities.

This study is based on photo interpretation, computer-aided data numerical spatial two-dimensional 2D (topographical maps, satellite images Landsat TM and ETM + (spatial resolution 30 m), drainage, Google Earth images and a classical synthetic approach (field observation and review of the literature). the data set is integrated into a Geographic Information System (GIS). structures of spatial information, the study area, are treated according to the nature of objects (point, line, polygon, raster). storage and management of all has been made by well-defined topologies. modelling mainly concerns computer data structures, geo-referenced.

The adopted SIG results from the data base management system to space reference (SGBDRS). It will make it possible to manage the data base geo-referred (BDGR). This purely data-processing application enabled us to integrate, in the SIG, the various geographical structures. these structures of space information are introduced into an Euclidean space, by respecting the type of object (specific, linear,

polygonal, matrix). The storage and the management of the unit will be done according to well defined topologies' of the data-processing layers (integration, superposition, inclusion, crossing). It is about a simple operation, managed by the SIG and will allow extracting thematic cards while synthesizing the different information (potentialities and constraints)

The elaborated cards represent the physical elements of the depression. The superposition of the whole of space data in a SIG is an operation of integration and treatment of the geoinformation. In this work, we will approach the SIG to specify its interest on the data base management to space references like tool carrying the information, which will facilitate the good control of the factors such, the slopes, morphology, the seismic-tectonics, lithology, the hydrographical network, cover vegetable and the grounds, of which the goal is the definition of their impacts on the process of adjustment of vulnerable spaces.

Results

A monotonous morphology

The Gharb plain, located at the Northern center of the country, is a flat area with excess winter rainfall it is confronted with the risks of flood and tsunamis the plain is particularized by its proximity at the Atlantic coasts and by its flat topography. This morphological configuration constitutes a constraint for the Gharb plain management. Its morphometric structure results from the tertiary tectonic phase which is characterized by the genesis of a Riffian mountainous complex in the North and the basin of Gharb in the South (El Gharbaoui, 1987). the analysis of the morphometric data enabled us to formulate the following reports:

— The slopes are, as a whole central and littoral, weak and remain ranging between 0 to 4%. The weak slopes, lower than 2% are located primarily near the mouth of the Sebou Wadi, where the exaggerated shapes of meanders are configured (very weak slopes developing exaggerated sinusoidal forms, in the East of Kenitra). These localities constitute

a zone of permanent risks of flood. Their managements remain expensive.

— The beds of the Sebou wadi and its effluents lose their widths of the downstream upstream. The direction general of the surface flows of water respects the direction general of slope, is (upstream) towards the West (downstream). In order to ensure perennality, especially qualitative of the surface water resources of the littoral zone (downstream), the protection of the upstream remains strongly recommended. This one could be done via the installation of several hydraulic points ensuring the regularization of level of water at the time of risings.

— The visual quality of the environment landscape is quite ventilated. The projects of installations taking into account the environmental concern could only improve the tourist potentialities of the littoral zone, especially the beach of Sidi Boughaba and Moulay Bouselham. The adjustment of these places of interest, according to standards' in force, will have socio-economic and environmental repercussions of a great scale as well on a regional scale.

Rich and quite ventilated landscape

The analysis of the landscape is particularly important, when a process of construction of an urban infrastructure projects the realization of multiple potentially aggressive actions towards the environment. For this reason, it is necessary to divide, the zone in under zones or remarkable landscape sites, more or less homogeneous, allowing the study of degree of vulnerability, land uses, morphoterritorial characteristic, geological, etc.

If one puts at with dimensions some elements constituting the landscape such, the rivers, the agglomerations and the dispersed dwellings, one can then subdivide the zone of study into three sub-units:

— Northern landscaped unit: characterized by a flat morphology lined with fossil dunes and drained by large wadis of the catchment area of Sebou. it concerns the central and centro-western part of the plain. The landscape of this zone has an important value, not only by its own intrinsic value, but also, by the fact

that it constitutes a zone of strong agricultural potential on a very fertile territory but also sensitive.

— Southernmost landscape Unit: It is a flat areas mainly Covered by the forest of Maâmora. The two units are separated by the Sebou wadi;

— Western littoral Unit: this zone is characterized by a series of consolidated dune cords, forming sub parallel bands with the current coastal shore. This littoral area knows currently over-exploitation of the careers. This anarchistic exploitation, Hinder any action of littoral area planning. It became vulnerable area. Anticipation in term of planning of these vulnerable area, along the coast, will create a very important economic activity, while benefitting from visual quality from the coastal environment and its natural attractively.

There are other components which appear in the plain such, the rivers and the plantations, as well as specific elements like the careers and irrigated agricultural areas. These elements will be the subject of a study in the next paragraphs.

A regional geology of alpine type

A lithostratigraphy characterizing a basin of subsidence

The filling of the Gharb plain was completed by the formation of a vast alluvial plain corresponding to two banks of the Sebou wadi. Its evolution during Cenozoic involved the genesis of a vast flat plain with reliefs very little developed. In North, are located the first deformations of the Riffian chain, it is about pre-Riffian formation raised brutally in overthrust nappes directed NE-SW (Monitin, 1963). The whole of the basin knew a subsidence since average Vindobonien. Its collapse persisted since the Quaternary until today (Comb, 1975; Cirac, 1985).

Active tectonics

As for the sector of study, the Palaeozoic base is plunged South towards North, under the

Neocene cover and Pleistocene of Gharb by a series of steps constituted by faulted and tipped panels towards the NNW (Cirac, 1985 and Flinch, 1993). The genesis and the structural framework of the basin of Gharb are mainly conditioned by the evolution of the Riffain chain (alpine orogenesis). Studies of seismic (Flinch, 1993; Flinch and Vail, 1998 and Litto and Al, 2001) showed that the material of the supra-tablecloth is affected by faults of various orders.

During the Quaternary one, the Gharb basin has sudden vertical movements in response to the neotectonic phase of alpine orogenesis (Michard, 1976; Aberkan, 1986; Piqué and Michard, 1987 and Zouhri *et al.*, 2002). These neotectonic movements are induced by normal faults. The structure of the basin is controlled by Hercynian faults materialized by two great directions NE-SW and NW-SE. They controlled the paleogeographic evolution of the basin (Zouhri *et al.*, 2002).

A plain with strong pedological potential

In spite of its agricultural potentialities, the pedological studies are rather numerous (Aubert, 1950; Ormvag 1994; Resing, 1994). These studies enabled us to understand the pedological characteristics, to set up pedological map and to know their morphological and analytical characteristics. The studies of Ormvag (1994) showed the existence of 6 great groups of grounds described below (figure 2, chart of the pedological units).

— Soils of the type B or browned soils: These are soil that one finds in the perimeter of Maâmora and the northern zone of the forest. it is about sandy and washed soils, developed on the argillaceous areas. The thickness of the sandy surface layer exceeds 2m and presents a brownish coloring;

— Soils of the type C or Calcimagnésic soils: it is about the soils characterizing the north-eastern zone. They present a carbonated composition (calcium and magnesium) and are regarded as carbonated soils;

— Soils of the type H or hydromorphic sols: They concentrate in the depressions and the edges of the merges. Those present the

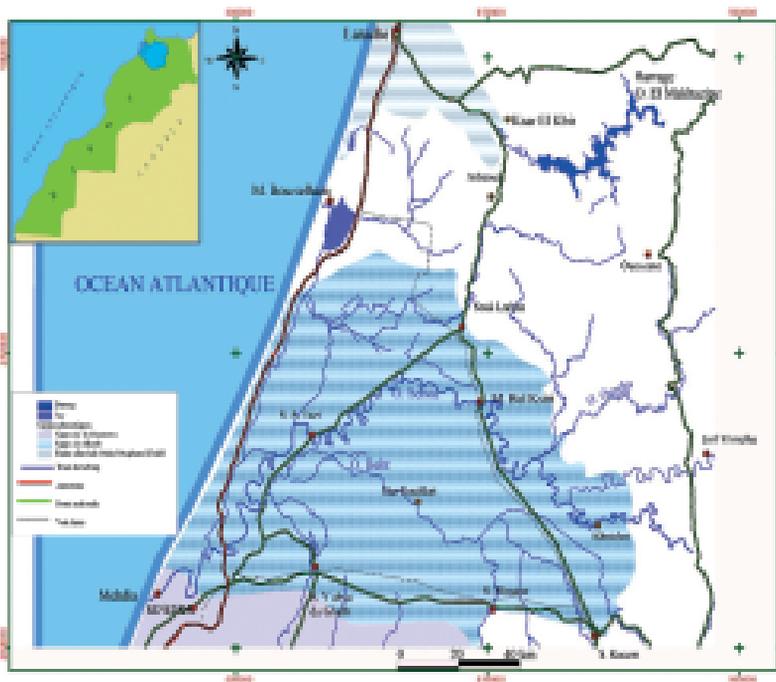


Figure 3. Map of the superficial and underground water resources, extracted from the topographical maps, hydrogeological maps of the Gharb basin and from (manually the Atlas of the Gharb).

laminar, with a karstic circulation in the coastal zone.

From the environmental point of view, the Gharb Water-table is directly threatened by the liquid infiltrations (pesticides, fertilizers, industrial waste...). The Permeability of the Surface and The vertical faults affecting the cover accelerate the risks of pollution of the table water.

Abundant and polluted surface waters

In this part, we shall develop the hydrological study to release the qualitative and quantitative aspects of surface waters (O. Sebou, dayas, lakes), while giving a detailed attention to the hydrographical network. However, the principal objective of this study is to evaluate and develop the surface water resources (figure 3, map of water resources).

The analysis of the water resources map of the zone of study shows, the presence of a hydrographical network little developed, characterized by its exaggerated forms of meanders and its general orientation towards the west and the WSW. The principal wadi is Oued

Sebou, it constitutes one of the principal sources of surface water. The river of Sebou and its secondary affluents such, Ourgha Wadi and Beht follow directions imposed by the flat morphology of the crossed zone, with a permanent flow.

A morphologically easily flooded depression

The morphometric analysis of the catchment area of Sebou shows, that the Sebou wadi flows in a relatively boxed bed wich is not very deep at its upstream part. It widens and is raised in its downstream part wich is relatively flat. Moreover, the catchment area of Sebou is subjected to a pluvial regime and the highest debits result from the Ouergha wadi. In 1963, occurred the strongest floods known in the basin of Sebou . In 1996, the zone knew other series of floods which involved important damage in the town of Kénitra (national Report on the prevention of the disasters, floods of the Gharb plain 1996). Figure 4 shows the easily flooded and vulnerable zones.

According to the analysis of this map, the delimitation of the zones of risks of floods shows that the town of Kenitra and its periphery are permanently exposed with the phenomena

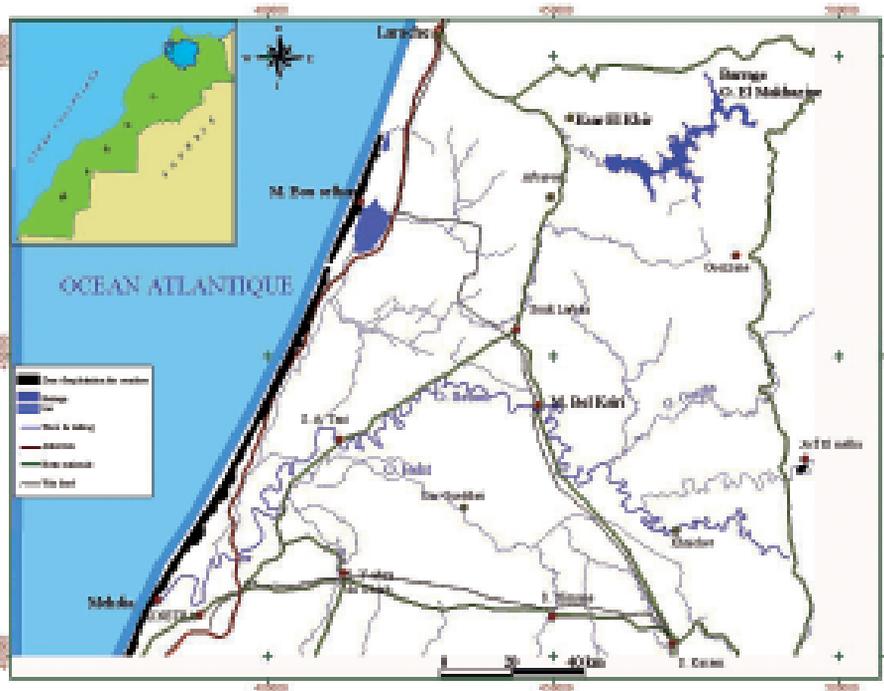


Figure 5. Situation map of the extraction sites of the building materials.

of the industrial facilities. It has potential sites constituting a natural environment of great ecological and biological interest, as well at the regional level as national, such, Merja zerga, merja Halloufa, merja Bokka, Fourat and Sidi Boughaba (figure 8). These ecological sites (SIBE) are considered, on the biological level, as one of the crossroads of fauna, ensuring a considerable natural balance. Its potential biodiversity is exceptionally high compared to the other natural sites of Morocco. Indeed, one can only insist on the floristic, faunistic and landscape richness during programming of any type of project having environmental impacts. The center of the area of study is practically empty or contains isolated green points. The Main species recognized in Gharb forest are: cork oak, holm oak, Thuya, Eucalyptus, conifer, mixed forests and matorrals.

The choice of color composites in the visible and infrared is well justified and wanted to surface mapping of the study area. The selected bands have several technical advantages (spectral resolution suitable for mapping of soil and vegetation). As such:

The blue band is only sensitive to wavelengths between 0.45 and 0.52 microns, de-

fined in the visible. It also allows the differentiation soil-plant (Scanvic, 1993). Solar reflectance is maximum because of its short wavelength (λ);

Also according Scanvic (1993), the green band is an indicator of vegetation chlorophyll primary and secondary elements of heavy metal content. The correlation between the blue and green allows discrimination of dissolved organic matter. This band is sensitive to the spectrum ranging from 0.52 to 0.60 microns;

The red band is very useful in the visible spectrum for determining the limits of soil and land geological (lithological differentiation). The spectral signature of this wavelength (0.63-0.69 microns) provides a very high contrast lithological, with lower atmospheric disturbances from other visible wavelengths. It also serves as the structural analysis and plant classification;

The band near infrared (NIR) is useful for mapping vegetation stress resulting from geological and iron oxides (Scanvic, 1993). Its combination with band 3 allows the delineation of water bodies. The ratio of bands 3 and 4 allows to differentiate biomass and vegetation moisture. But, in situations where the vegetation is in early growth and in an arid or

semiarid, this differentiation becomes quite tricky and the spectral signature is much influenced by the signal from the ground, this could be possible disruption corrected (Escadafal and Huete, 1991).

Mapping the land of the study area is developed at a medium scale 1/200 000. The images TM and Landsat ETM + is a basic background including the optimal combination of colour in the visible red and near infrared FCC 321 and FCC 432 (false colour composite) for the analysis of land use and spatial distribution canopy.

The Satellite imagery and TM Landsat ETM + used are supplied with a level of radiometric and geometric correction detailed by the supplier. The choice of these scenes TM and ETM + (taken as a multiple dates, 15/04/1985, 12/09/1987 on the 20/08/1999, 23/08/2009 and 16/10/2010), but we will use the two scenes (15.04.1985 and 20.04.2010 of the colored composition FCC 432). This variety made based on multiple calendars climate zone (spring, summer and winter) to view the land and their business in different states (soil covered by vegetation, bare soil, no clouds, moist soil, etc.).

Combining FCC 432 is used for land cover mapping of the study area, knowing that it is an agricultural area with high potential. In the western part of the study area, the ground is covered, almost entirely, a canopy largely agricultural character (concentration of agricultural activities along the coast of linen

depression Gharb to a depth of over 500 m of shoreline). This false-color composition allows the detection and differentiation of the vegetative study area.

432 tri-color image on the FCC vegetation is easily recognized by its own spectral signature in red with a maximum reflectance in the red and near infrared.432 FCC on this image, vegetation is easily recognized by its own spectral signature. For example, the red colour indicates the presence of vegetation (maximum reflectance in the red and near infrared (Scanvic, 1993).

The analysis shows that the two images in the red and near-infrared (NIR) ranges are red canopy dominant, especially in the western part of the study area. This can be explained by the sustainability of water resources of the Gharb basin (see paragraph 5: Water resources available) and soil fertility. In the study area, is one of the largest groundwater reservoirs (groundwater Gharb). The difference between the two images, may be felt towards the East Mediterranean, whose terrain and the remoteness of the water are their effects.

Still, the analysis of satellite imagery and TM Landsat ETM + (432 BCF and 321 BCF, Figure 6 and 7), the study area especially this coastal landscape units, characterized by a relatively flat morphology surrounded by dunes and fossil drained by the major wadis watershed Sebu. The landscape of this area has significant value in that it is an area with high

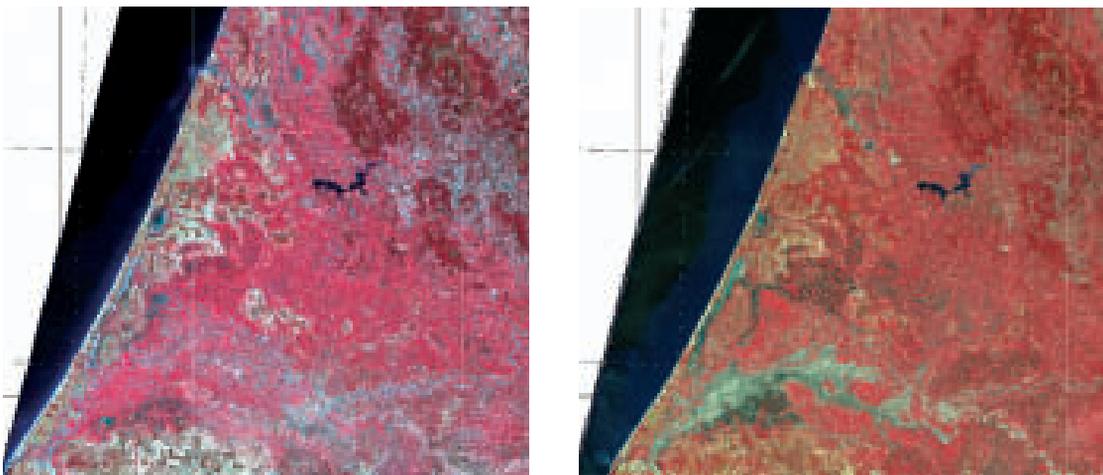


Figure 6. Comparative Images of reflection and absorption of EM radiation uneven depending on the wavelength of the tri-color picture composed of channel 4, 3 and 2 false-color, left the scene of 20/04/2010 and right stage of 15/04/1985.

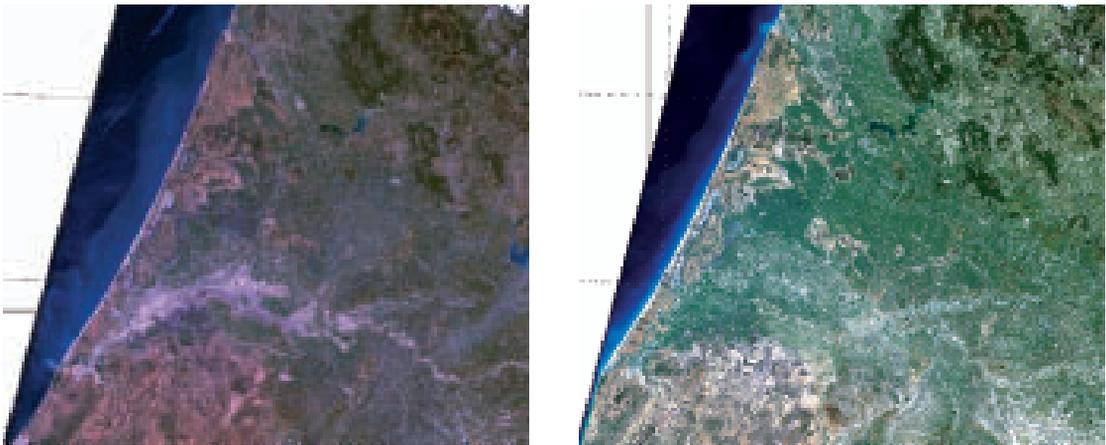


Figure 7. Comparative Images of reflection and absorption of EM radiation uneven depending on the wavelength of the tri-color picture composed of channel 3, 2 and 1 in the visible, left the scene of 20/04/2010 and right stage of 15/04/1985.

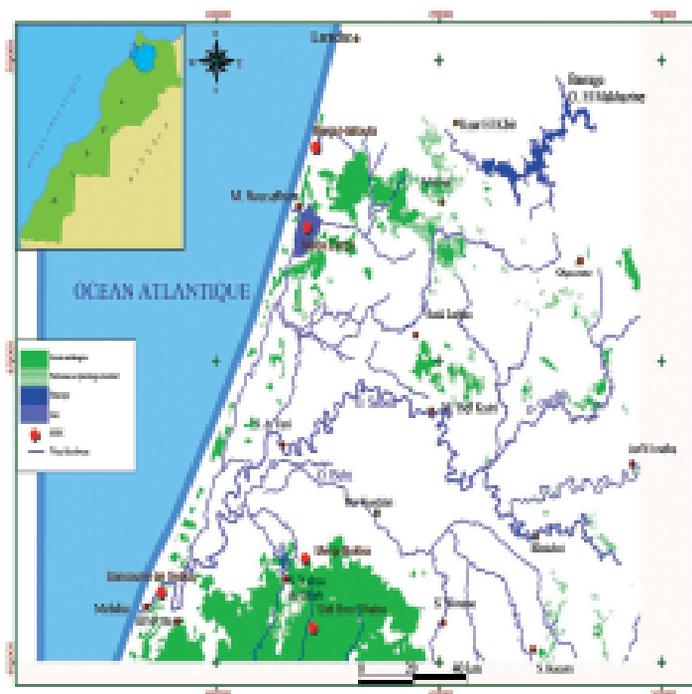


Figure 8. Map of the distribution of the vegetation (from the Atlas of the Gharb, modified).

agricultural potential (fertile land), but also sensitive. As we saw earlier, the evolution of the basin during the Cenozoic has driven the genesis of a vast flat plain resulting from the accumulation of a large sedimentary mass (which in some places exceeds 2000 m). Morphologically, said depression (Gharb basin) is in the form of a basin that receives the bulk sedimentary all comers. It's a wide open middle of the Atlantic Ocean, its intrinsic

characteristics reinforce and promote the agricultural potential of the Gharb plain by climatic conditions.

Synthesis and recommendations

The analysis of the environmental elements (potentialities and constraints), it proves to be clear that the stakes of adjustment of the

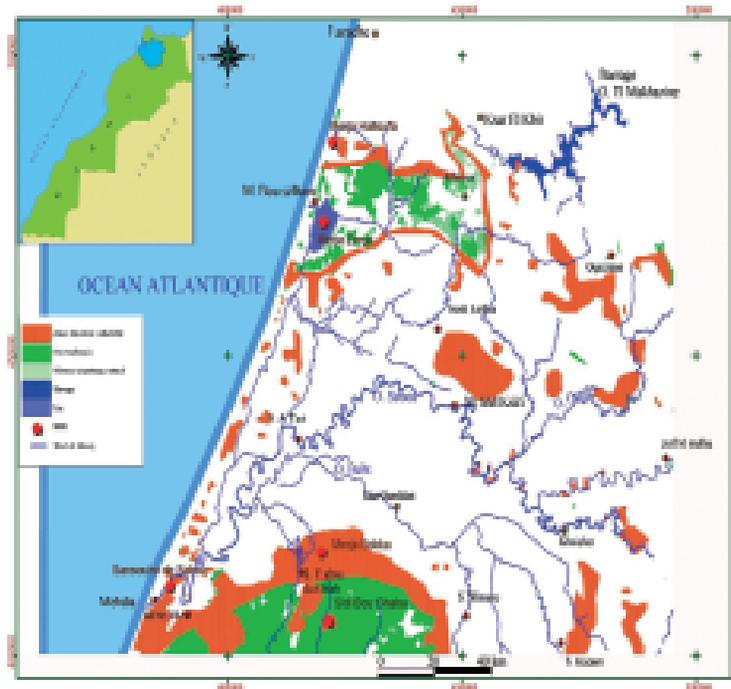


Figure 9. Map of the deforestation zones and weak zones.

depression of Gharb are important. The surface of study and rich in natural resources, they even constitute a constraint in a natural way or by a bad governorship. So all the actors, on a regional and national scale, must become aware of this reality. It is necessary that the policy of the regional planning integrates the environmental constraints in all its strategy of management of the territory. This could be done only by official will for the respect and the application of Laws and Regulations. Elements below recapitulate the main recommendations to be considered in:

Regional seismic-tectonic risks

The establishment of the map of the intensities observed, since 1901 until 2001, was facilitated thanks to the available data of the department of Physique of the Earth of the Scientific Institute (figure 9). The analysis of these seismic-tectonic data, shows that the zone of study is rather calm. It is in prolongation SW of the Rif chain. In addition, the zone in question is exposed to a certain tectonic activity qualified as neotectonic, recent

tectonic activity of quaternary age, caused by shocks affecting the basin of Gharb. For this purpose, the last earthquake, which has occurred on June 28, 2001 of magnitude 5 on the Richter scale, reflects an important regional sismotectonic dynamism. The definition of the paraseismic standards is strongly recommended and this, according to the standards of paraseismic code RPS2000.

Strongly exploited water resources

The water resources remain quite sufficient compared to the soil potentialities which is pedologically ready to receive the irrigation. In addition to this strong potential of perennial irrigation, there are also important potentialities in seasonal irrigation. Indeed, since about twenty years, climatic variations occur by a greater irregularity of the rains and an extent, more and more, important of the area of study. This deterioration is amplified by the bad management of the water resources this induces degradations on the level of the physical environment, natural vegetation and quality of water. The good management of

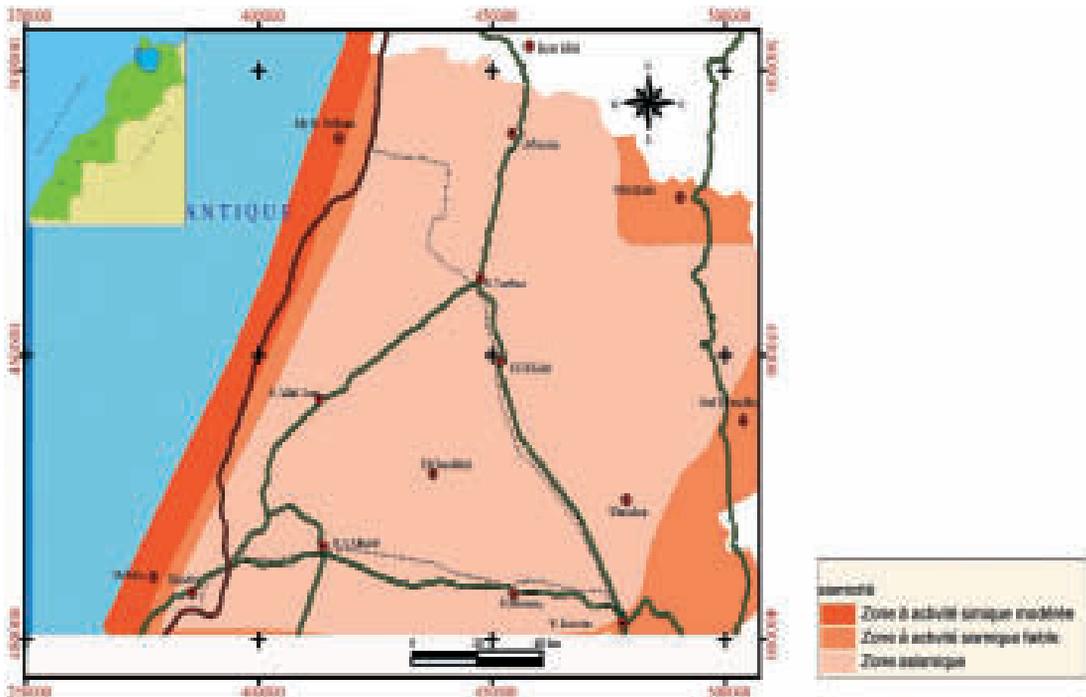


Figure 10. The sismotectonic activity map of the coastal zone of the Gharb, (Ait Brahim, 2003, modified).

these not renewable resources requires a crucial reflection during the realization of any project. While benefitting from the great work concerning the depollution of the Sebou Wadi and from the strategic and convenient programming.

Permanent risks of floods and the tsunamis

The flat morphological configuration of the Gharb plain has at the same time an asset and a constraint as regards management of the downstream areas. With this flat configuration and the hydrographical network, the risk of floods and tsunamis is real. Because of the significant absence of reliefs protecting the hinterland, the littoral zone is directly threatened by the risks of tsunamis. Moreover, the Sebou wadi threatens the whole western territory such Sidi Allal Tazi's urban area and Kenitra. In spite of, the establishment of several upstream hydraulic constructions. The flood risk of downstream area persists after each important downpour. So the department of the environment of the Ministry of Land planning, Water and

Environment classified the urban centre of Kenitra as area of average risk. Its protection could be done only via dams of stabilization.

Safeguarding of the ecological environment

The negative impacts of engineering constructions, on the natural and landscape environment are taken into account, on the level of the impact study on the environment of the various projects. Located in a subhumide bioclimatic stage, the Gharb plain is particularly sensitive to deforestation especially in the forest of Maâmora (figure 10). The studies of vulnerabilities carried out within this framework, highlighted the multiplicity and the extent of the factors which go against the perennality and against the variety of this not easily renewable capital. Among these factors, one quotes: the overgrazing, cutting of wood, absence of regeneration of the forest. The analysis of these factors of degradation, show clearly that the social pressure constitutes a factor determining of the deforestation of the forest of Maâmora. The consequences that will result from it are:

natural environmental pollution, Sanding up, economic cost, rural migration.

Littoral: potential area to protect

In spite of, its great landscape and of course tourist interest, the littoral zone, which extends between Kénitra and Larache, is strongly exploited and weakened by the extraction of building materials (figure 10). This over-exploitation caused real attacks with this fragile littoral environment (salinisation, pollution of the ground water of Gharb, disfiguration of the landscape).

In order to find the effective means for the safeguard of this non renewable natural resource, the state must directly intervene, in an urgent way, supported by the civil company, to oblige the owners to respect the terms of the impact study on the environment. For the political durability of the land planning, this article should constitute the object of the deepened researches undertaken by the departments, the concerned institutes and the researchers, whose objective is to more understand the characteristics of this naturally rich area, but vulnerable and very sensitive, and to induce the positive impacts, by limiting and treating those negative, if the control strategy of the programmed actions are taken into account in a suitable way.

Conclusions

The study suggested here, makes it possible to understand the importance of the use of the SIG in the studies of the Gharb plain planning. In addition, the discussions started in this study made it possible to contribute to the comprehension and the assimilation of characteristics of these potentialities and natural and/or anthropic constraints. For this purpose, certain conclusions were drawn:

— Morphology, water, vegetable cover and the exploitation of the quarries along the littoral zone are the principal constraints leading to an instability of the natural environment.

— From point of view seismic-tectonic, the zone of Gharb is relatively stable. It supports

the construction of any kind of infrastructure, while respecting the standards paraseismic code RS2000.

— Except some isolated areas, the, not protected and badly managed, littoral like the industrial zone, is an unfavorable zone for the installation of an important infrastructure. The installation of such industrial constructions, will require a preventive strategy against the possible risks of the tsunamis and the remediation of the exploited sites

— The choice of the adequate sites for the installation of the great projects, should be the subject of a multidisciplinary decision.

— The integration of the whole of the multi-source data in a SIG, seems more effective in term of the management of the time and the data base.

Generally, this study enabled us to reveal the problems of the Gharb plain planning and the importance of the method applied in the zone of Gharb. In addition, this work made it possible to establish a synthetic data base. This one intervenes at the same time upstream in the characterization of risks and constraints (object of the research topic) and downstream like Decision Support for the planning of the area of study (objective of the research topic)

References

- ABERKEN, M. 1986. Quaternaire littoral de la bordure méridionale du Gharb (Maroc Nord occidental) Aspect sédimentologique, pédologique et néotectonique. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, 39, 185-190.
- AÏT BRAHIM, L. 2003. Cinématique des principales failles de la chaîne rifaine, cadre sismotectonique et risque sismique. *Trav. Inst. Sci. Rabat, Série & Géogr. Phys.*, 21, 141-150.
- AUBERT, C. A. J. 1950. Classification des sols. *Rapport de tournée sur les sols du Gharb*.
- CIRAC, P. 1985. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur. Évolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. *Mem. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Université de Bordeaux 1*, 21, 287.
- COMBE, M. 1975. Bassin du Gharb Maamora. In ressources en eau du Maroc. *Notes et mem. Serv. Géol., Tome 2, Maroc*, 231, 93-128.
- EI GHARBAOUI, A. 1987. Les climats: géographie physique et géologie. *Grande encyclopédie du Maroc, Selca S.A. ed.*, 3, 14-31.

- ESCADAFAL, H., & HUETE, AR. 1991: Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by vegetation index for Correcting soil «noise», Proc. Sc Paris, 312, Ser. II, p. 1385 to 1391.
- FLINCH, J. F., & VAIL, P. R. 1998. Plio-Pliostocene sequence and tectonic of Gibraltar arc. Mesozoic and cenozoic sequence stratigraphy of Europe an Bassin, *SEMP Spatial publication*, 60, 199-208.
- FLINCH, J. F. 1993. Tectonic evolution of Gibraltar arc. *Ph.D. Dissertation, Rice Univ. Houston*, 381p.
- KACIMI, I. 2004. Hydrologie, Hydrogéochimie, Qualité des eaux et modélisation hydrodynamique de la nappe côtière Gharb-Maamora, Maroc. *Thèse d'état, Univ. Mohammed V.* 7-12.
- LITTO, W., JAAIDI, El B., MEDINA, F., & DAKKI, M. 2001. Etude sismo-structurale de la marge nord du bassin du Gharb (avant pays rifain, Maroc): mise en évidence d'une distension d'âge Miocène tardif. *Ecolgae Geol. Helv.* 94, 63-73.
- MICHARD, G. 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes & mém. Serv. Géol. Mar.* 252, 408p.
- MONITIN, L. 1963. Etude sur les eaux souterraines du Gharb. *Mémoire inédit, Rabat, Maroc.*
- ORMVAG. 1994. Etude pédologique au 1/20 000 de la troisième tranche d'irrigation (T.T.I) sur une superficie de 100 000 ha. Zone de Menasra, Z1 et Z2. Rapport. 180p.
- PIQUE, P., & MICHARD, A. 1987. Moroccan hercynides: A synopsis, the Paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the West Africa. *American Journal of Science*, 289, 286-330.
- RESING. 1994. Consultation en hydrogéologie dans les champs captants de Sidi Taibi, Ain Sebaa et Ahmed Taleb (Captage Fourat / Province Kenitra), *Rapport de synthèse ONEP/GTZ.*
- SCANVIC, J. Y. 1993. Remote sensing and geological information. BRGM Edition, Manuals and Methods, No. 24, 284 pages, 67 figures.
- THAUVIN, J. P. 1996. Monographie hydrogéologique de la Maamora. *Notes et mem. Ser. Geol.* 195, Maroc, 120 p.
- ZOUHRI, L., LAMOUREUX, C., VACHARD, D., & Pique, A. 2002. Evidence of flexural extension of the Rif foreland: The Rharb-Maamora basin (northern Morocco). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 173, (6), 509-514.

Caso práctico

Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú

E. García¹ y M. A. Lleellish²

¹ *Autoridad Nacional del Agua. Calle Diecisiete, n.º 35. Urb. El Palomar, San Isidro. Lima, Perú.*

² *Dirección General Forestal y Fauna Silvestre del Ministerio de Agricultura, Calle Diecisiete, n.º 35. Urb. El Palomar, San Isidro. Lima, Perú.*

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología basada en imágenes de satélite Landsat para cartografiar los humedales altoandinos conocidos como bofedales en la cuenca altoandina del río Acarí. Se utilizaron dos imágenes del satélite Landsat ETM+ cercanas al final de la estación húmeda y seca para captar la variabilidad espacial y temporal de estos ecosistemas y definir la mejor época para su cartografiado. La metodología aplicada se basó en el algoritmo de clasificación conocido como Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME), apoyado de la interpretación visual y la inclusión del modelo digital de elevación SRTM. Los resultados fueron evaluados usando imágenes de satélite de alta resolución espacial, a través de matrices de contingencia. El algoritmo ALME fue capaz cartografiar los bofedales mayores de 0.8 ha, con una fiabilidad del productor entre 86.9 y 91.2 %, según la fecha de la imagen utilizada, aunque esto último no fue estadísticamente significativo ($p = 0.95$). La fiabilidad del usuario fue en todos los casos del 100%. La fiabilidad global estuvo entre 89.8 y 93.2% y el índice Kappa entre 75 y 82%. El uso de esta metodología permitió conocer que en esta cuenca altoandina existen 2828 ha de bofedales estimadas para el año 2000, que equivalen al 1.5% del área de la cuenca alta y al 0.6% del área de toda la cuenca.

Palabras clave: teledetección, cartografiado, ALME, humedales, bofedales, Landsat.

Abstract

Mapping bofedales using Landsat satellite images in a Peruvian highandean basin

This paper describes a Landsat satellite imagery based method to map high Andean wetlands known as bofedales in the Acarí highandean river basin. Two Landsat scenes were used which are near to the wet and dry season to capture the spatial and temporal variability of these ecosystems, so the best season for their mapping were identified. The method was based on the algorithm of classification known as Lineal Spectral Mixture Analysis (LSMA), in conjunction with visual interpretation and a digital elevation model SRTM. The results were evaluated with satellite images of high resolution using contingency matrix. LSMA algorithm was able to map bofedales higher than 0.8 ha, with producer's accuracy between 86.9 and 91.2%, according to the date used, although this later not was significant ($p=0.95$). User's accuracy in all cases was of 100%. The overall accuracy was between 89.8 and 93.2% and the kappa coefficient was between 75 and 82%. The use of this methodology made possible determine that in the Acarí high river basin there are 2828 ha of bofedales for the 2000 year, which is equivalent to 1.5% of the high basin and to 0.6% of the entire basin.

Key words: remote sensing, mapping, LSMA, wetlands, bofedales, Landsat.

* Autor para la correspondencia: egarciag@ana.gob.pe

Recibido: 27-08-12 ; Aceptado: 12-09-12.

Introducción

Los humedales están entre los ecosistemas más productivos del mundo y son de inmensa importancia social y económica para la humanidad (Hall, 1997), cumplen muchas funciones relacionada con los recursos hídricos, como ser fuentes naturales de agua, reguladores del ciclo hidrológico y el clima, zonas de descarga y recarga de acuíferos, barreras naturales contra las inundaciones y la intrusión marina, mejorar la calidad del agua (Shine y Klemm, 1999). Además se encuentran protegido por el tratado internacional conocido como la Convención Ramsar (1971).

En el Perú, existen humedales en las regiones marino-costera, andina y amazónica. Un tipo particular de estos humedales son los bofedales, conocidos también como oconales, turberas, entre otros; que se ubican en las zonas altoandinas y altiplánicas del país. Los bofedales son hábitats naturales húmedos, con agua permanente, alimentados de diferentes fuentes como manantiales, agua de deshielo, ríos y lluvia (Alzérrea, *et al.*, 2001). A la fecha, en el Perú no existe un inventario nacional de humedales, sino trabajos hechos por diversas instituciones públicas y privadas, de manera aislada, a distintas escalas cartográficas y de escaso alcance territorial (limitándose a algunas regiones en particular). Por esta razón fue necesaria la elaboración de una metodología de trabajo que permita cartografiar de manera rápida y eficiente la superficie de bofedales como paso previo a un inventario de los mismos. La metodología se sustenta en el uso de técnicas modernas como la teledetección. Según la Convención de Ramsar (2007), las imágenes de satélite proveen de una herramienta única para el cartografiado de humedales en grandes extensiones de terreno, con el fin de obtener información sobre su ubicación y extensión, a distintas escalas de análisis. Un repaso de estas aplicaciones se puede encontrar en Ozesmi & Bauer (2002). Actualmente, el algoritmo de clasificación conocido como Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME) o en inglés *Spectral Mixture Analysis (SMA)*, es una alternativa a los métodos convencionales de clasificación digital de imágenes de satélite. Algunos autores han destacado la utilidad

de este algoritmo para el cartografiado de humedales (Brivio & Zilioli, 1996; Sang & Chong, 2004; He *et al.*, 2010; Michishita *et al.*, 2012).

El propósito de este trabajo fue evaluar el uso de las imágenes de satélite Landsat y el algoritmo ALME para cartografiar los bofedales ubicados en la cuenca alta del río Acarí, evaluando sus resultados mediante matrices de contingencias. Además, se ha incluido un análisis estadístico para determinar si la fecha de toma de las imágenes influye en la identificación de este tipo de humedales.

Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del río Acarí, que pertenece a la vertiente hidrográfica del Pacífico y abarca una superficie de 179.097 ha. Geográficamente se ubica entre los 76° 01' y 75° 30' de Longitud Oeste, y 14° 53' y 13° 49' de Latitud Sur (Figura 1). Políticamente forma parte de la provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho. Altitudinalmente la cuenca alta está comprendida entre los 3.700 y 4.786 msnm.

De acuerdo a la información meteorológica del estudio del INRENA (2003a), en la parte alta de la cuenca, a una altitud de 4.800 msnm, el promedio de precipitación anual es de 680 mm y es de carácter estacional. Las lluvias tienen sus inicios en los meses primaverales y van cobrando mayor intensidad (mes de febrero), para luego decrecer casi bruscamente durante el mes de abril, en que se inicia un periodo de estiaje. La temperatura está ligada en sus variaciones al factor altitudinal. En la parte alta de la cuenca la temperatura es de tipo frígido (5° C aproximadamente). En el citado estudio se menciona la falta de estaciones y registros históricos en esta parte de la cuenca.

En otro estudio realizado en la microcuenca del río San José (INRENA, 2003b), afluente de la parte alta del río Acarí, se hace una descripción de la cobertura vegetal de esta microcuenca, en base a una combinación de conceptos fisonómicos, climáticos y florísticos. En dicho estudio los bofedales son considerados como un tipo de asociación vegetal y se les describe como áreas hidromórficas que

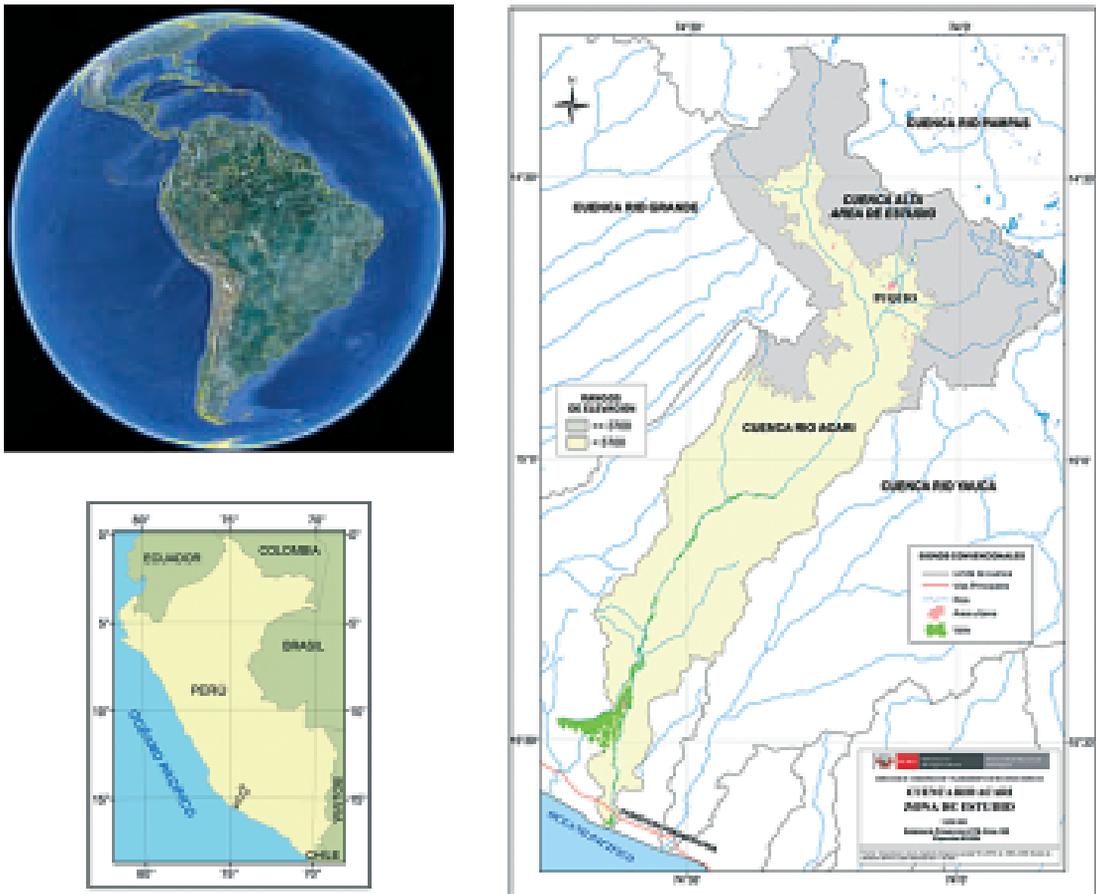


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Acari y del área de estudio.

se encuentran por encima de los 3.700 msnm. Igualmente, se menciona que la especie que tipifica a esta asociación es la juncaceae (*Seudogramínea*) *Distichia muscoides*, de porte almohadillado (menos de 10 cm de altura). Esta especie está en permanente crecimiento, debido a la abundante humedad del terreno y al mismo tiempo es la principal fuente alimenticia del ganado altoandino, principalmente ovino y camélidos. Su consumo es tan intenso que está provocando su deterioro.

Otras asociaciones vegetales citadas en el mismo estudio (INRENA, 2003b), y que se encuentran por encima de los 3.700 msnm, son la vegetación de tipo herbazal como el pajonal y césped de puna, donde es común encontrar algunas especies arbustivas siempre verdes a manera de inclusiones en estas pasturas como por ejemplo la «tola» *Parastrephyta lepidophylla* y en las quebradas algunos ejemplares de especies arbóreas como la «queñoa» *Polylepis* sp.

Este tipo de vegetación es usado en forma extensiva para el pastoreo del ganado como alpacas, llamas, ovinos y vacunos durante el año. Otra asociación vegetal viene a ser el matorral húmedo, que se caracteriza por la presencia de comunidades arbustivas que mantienen su follaje siempre verde durante el año (perennifolias), y presentan una morfología especializada que le permite contrarrestar las condiciones extremas del clima. Generalmente las matas arbustivas alcanzan una altura máxima promedio de 2.5 m y se encuentran mayormente dispersas y en forma restringida, formando pequeños «manchales» en ciertos sitios de las laderas de los cerros; también es común que estos arbustos invadan terrenos de cultivos abandonados y en descanso.

También existen áreas de cultivo ubicadas principalmente a lo largo de las laderas. Los principales cultivos desarrollados son: papa, maíz amiláceo, haba, trigo, achita o kiwicha,

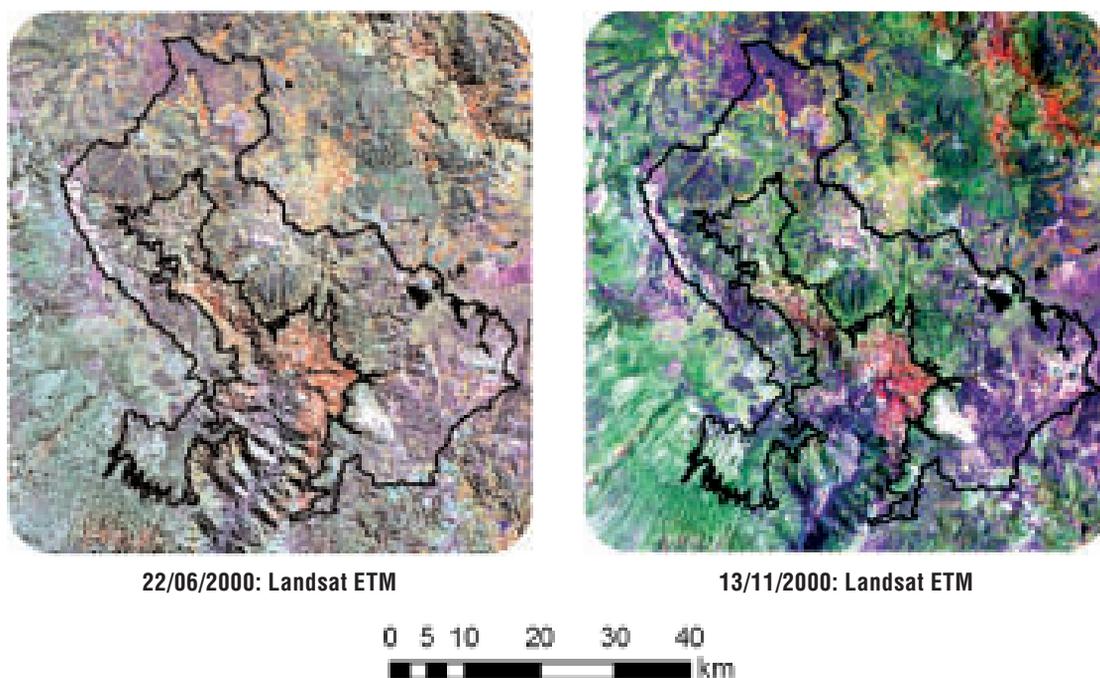


Figura 2. Imágenes de satélite Landsat usadas, en combinación 453 (RGB) y superpuesto con el límite de la cuenca alta del río Acarí.

cebada grano y alfalfa. Se hace mención que existe la necesidad de trabajos de un mayor detalle para un completo inventario de las áreas de cultivos agrícolas y de pastos (INRENA, 2003b).

Materiales y método

Descripción de la información satelital y cartográfica

Se utilizaron dos escenas del satélite Landsat ETM+, (path/row: 5/70) del 22 de junio y 13 de noviembre de 2000 (Figura 2). Las imágenes fueron descargadas de manera gratuita desde internet, a través de la interfaz de datos de las ciencias de la Tierra (Earth Science Data Interface ESDI) de la Universidad de Maryland. El satélite Landsat ETM+ (NASA, 1998), orbita la tierra a una altitud de 705 km y provee imágenes de manera continua y del mismo lugar cada 16 días, cubriendo una extensión de 185 km × 185 km. Este satélite cuenta con siete bandas multiespectrales, tres en el rango del visible, una en el infrarrojo cercano, una en el

infrarrojo medio y una en infrarrojo lejano. La resolución espacial es de 30 m a excepción de la banda térmica que es de 60 m. Adicionalmente posee una banda pancromática de 15 m de resolución espacial.

Como información auxiliar se usó la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a la escala 1:100 000, que se encontraba en formato *shapefile* de ESRI. Esta información de tipo vectorial contenía datos de curvas de nivel, red hidrográfica, lagos y lagunas, cotas, señales geodésicas y áreas urbanas. También, se usó el modelo digital de elevación (MDE) gratuito, denominado SRTM por sus siglas en inglés *Shuttle Radar Topography Mission*, que cuenta con una resolución espacial de 90 m para Sudamérica y un detalle y precisión aceptables para una cartografía a la escala 1:100 000 (Alves *et al.*, 2006).

En la etapa de evaluación de la fiabilidad de los resultados se usaron las imágenes de alta resolución disponibles para el área de estudio en el programa Google Earth. Sobre estas imágenes se identificaron visualmente los bofedales que servirían como puntos verdad-terreno a ser usados en la etapa de validación de los resultados. Igualmente, en la etapa de evalua-

ción de la fiabilidad de los resultados, se utilizó la información digital en formato vectorial *shapefile* del mapa de cobertura vegetal elaborado por el INRENA (2003b) para la zonificación agroecológica de la microcuenca San José a la escala 1:25 000. Este mapa incluía a la clase temática bofedales y fue elaborado en base a la interpretación visual de una imagen Landsat ETM+ fusionada a 15 m de píxel, correspondiente al 08/08/1999. Esta información será comparada con los resultados de la clasificación digital usando el algoritmo ALME y los puntos de referencia colectados de las imágenes de alta resolución del programa Google Earth.

Descripción del algoritmo ALME

El ALME se fundamenta en que la respuesta espectral medida por el sensor, es una combinación lineal de las respuestas espectrales de todos los componentes dentro de un determinado píxel (Smith *et al.*, 1990; Adam *et al.*, 1995, Ustin *et al.*, 1999). Está dado por la siguiente ecuación:

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j,k} \quad [1]$$

donde $\rho_{i,j,k}$ indica la reflectividad observada en el píxel i, j en la banda k ; $F_{i,j,m}$ es la proporción del componente m en ese píxel para cada una de las p categorías puras; $\rho_{m,k}$ corresponde a la reflectividad característica de ese componente m en la banda k , y $e_{i,j,k}$ es un término del error asociado a la estimación de las proporciones en cada píxel i, j .

El ALME primero necesita definir un conjunto de píxeles puros de las cubiertas que serán clasificadas y que se conocen como «endemembers» (Adam *et al.*, 1995) y en castellano como «miembros terminales» (Chuvieco, 1996). El número de miembros terminales está limitado por el número de bandas de la imagen de satélite donde será aplicado (Theseira *et al.*, 2002). Para el caso de las imágenes Landsat, un máximo de cuatro miembros terminales son usualmente usados, debido a que las tres bandas del espectro visible están fuertemente correlacionadas unas con otras

(Small, 2001; Theseira *et al.*, 2002). Estos miembros terminales pueden ser identificados principalmente mediante dos métodos (Lunetta, 1998; van der Meer, 1999): (a) librerías espectrales obtenidas en campo o en laboratorio y (b) la extracción de los píxeles puros directamente desde la imagen. El segundo método es preferido al primero, ya que son colectados bajo las mismas condiciones atmosféricas de la imagen. Esto ahorra la necesidad de una corrección atmosférica absoluta para su aplicación (Palaniswami, 2006). En este trabajo se usó la opción (b), ya que se extrajo la muestra de píxeles puros directamente desde la imagen, a través de la digitalización en pantalla.

Definición de la escala cartográfica y la mínima unidad cartografiable

Según la Convención Ramsar (2007), la escala espacial utilizada para el inventario de humedales es inseparable de sus objetivos y tiene una gran influencia en la selección del método a utilizar. También recomienda, que al escoger la escala de trabajo es preciso determinar primero el objetivo y luego evaluar cómo puede lograrse mediante la escala escogida.

Dado que el propósito de este trabajo es cartografiar y cuantificar los bofedales que existen en la cuenca alta del río Acarí, a un nivel de semidetalle, para su uso con fines de gestión y conservación de humedales. Se determinó que las imágenes de satélite Landsat serían adecuadas para este fin y se definió la escala de trabajo en 1:100 000.

La información que actualmente existe sobre bofedales a nivel nacional en el Perú, ha sido tomada de los mapas de cobertura vegetal elaborados a la escala 1:250 000 por el INRENA (Figura 4), la cual es importante para conocer el potencial de humedales a escala nacional, pero no es lo suficientemente detallada para la gestión y conservación de estos ecosistemas a escala de cuenca.

La Mínima Unidad Cartografiable (MUC) fue definida en 0.8 ha. La MUC representa el tamaño mínimo de una categoría que puede ser cartografiado como una entidad individual y está en estrecha relación con la resolución de la imagen de satélite (Lunetta & Balogh, 1999,

Cobbing, 2007). En este trabajo se consideró la regla propuesta por Thompson *et al.* (2002), quien propone que para la clasificación digital, un mínimo de tres por tres píxeles son necesarios en la determinación de una categoría a cartografiar. En el caso de las imágenes Landsat con un píxel de 30 m, correspondería un área de 8.100 m², que en hectáreas equivalen a 0.8 ha.

Preprocesamiento de la información

Las imágenes Landsat ETM+ ya se encontraban ortorectificadas en el sistema de proyección UTM (Universal Transversa Mercator) Zona 18 Sur, por lo que se verificó que exista una adecuada coincidencia con la red hidrográfica de la Carta Nacional del IGN a la escala 1:100 000 usada como referencia en este trabajo. Luego se efectuaron sobre las escenas unos realces radiométricos, con el fin de hacer una primera interpretación visual de la escena y de los bofedales existentes. Los realces radiométricos usados fueron de ecualización de histograma y desviación estándar. En base a este análisis se seleccionó la combinación de bandas que discriminaría mejor las cubiertas presentes en las imágenes, en especial de los bofedales. Se escogió la combinación 453 asignada a los colores rojo, verde y azul (RVA), y que corresponden a las bandas del infrarrojo cercano (0.77-0.9 μm), medio (1.5-1.7 μm) y visible (0.63-0.69 μm) del satélite Landsat ETM. En general, esta combinación demostró que captura una gran variabilidad de tonos en la imagen, y además ha sido utilizada en la interpretación de las cubiertas del terreno en el programa de la Agencia Europea del Medio Ambiente denominado CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) Land Cover (EEA, 1994).

Otro proceso necesario fue la conversión de niveles digitales (ND) a valores de reflectividad. Para esto se usó el método COS(TZ), el cual incluye una corrección por el efecto de dispersión y transmisividad atmosférica (Chávez, 1996). La conversión de ND a valores de reflectividad intenta disminuir la variabilidad espectral ocasionada por diversos factores externos como la atmósfera y la iluminación so-

lar para imágenes captadas en diferentes fechas (Chávez, 1996). Estas operaciones de preprocesamiento fueron realizadas de la misma manera en la escena del mes de abril y noviembre de 2000. Los programas utilizados en esta parte del trabajo fueron el ArcGis y ERDAS.

Cartografiado digital de bofedales

En este trabajo se ha considerado la existencia de Bofedales a partir de la cota de 3.700 msnm. Este dato se tomó del estudio del INRENA (2003b) y fue corroborado con la interpretación visual de las imágenes, y con apoyo del MDE. El flujo de trabajo seguido se muestra en la Figura 3. La aplicación del algoritmo ALME se realizó independientemente para cada imagen Landsat ETM, usando el módulo «Linear Spectral Unmixing» del programa IDRISI. Las tres bandas utilizadas del Landsat ETM fueron la 3, 4 y 5, y los tres «endmembers» fueron: bofedales, agua y suelo; que se digitalizaron en pantalla sobre la imagen (Figura 4-a). Tras aplicar el algoritmo ALME, los resultados fueron tres mapas de fracción o abundancia (Figura 4-b, c y d), que muestran en valores en el rango de 0-1 la probabilidad de que un píxel pertenezca a cada una de estas cubiertas (bofedales, agua y suelo). Igualmente se obtuvo una imagen de error (Figura 4-e) que representa el grado de ajuste del modelo. Dado que el interés es determinar la extensión de los bofedales, se trabajó en adelante con el mapa de fracción de esta cubierta (Figura 4-b).

En la Figura 4 se pueden ver los mapas de fracción de las cubiertas obtenidas con el ALME para la imagen Landsat ETM de junio. El valor más alto representa la mayor probabilidad de encontrar este tipo de cubierta. Sobre el mapa de fracción de bofedales se aplicó un umbral de separabilidad a fin de obtener un mapa binario que represente en valores de «1» la mayor probabilidad de encontrar bofedales y en «0» la no existencia bofedales. Este umbral se determinó analizando el mapa de fracción de bofedales superpuesto con la imagen de satélite original mediante un proceso de prueba y error. El valor final del valor de umbral para aislar los bofedales, fue fijado en 0.5.

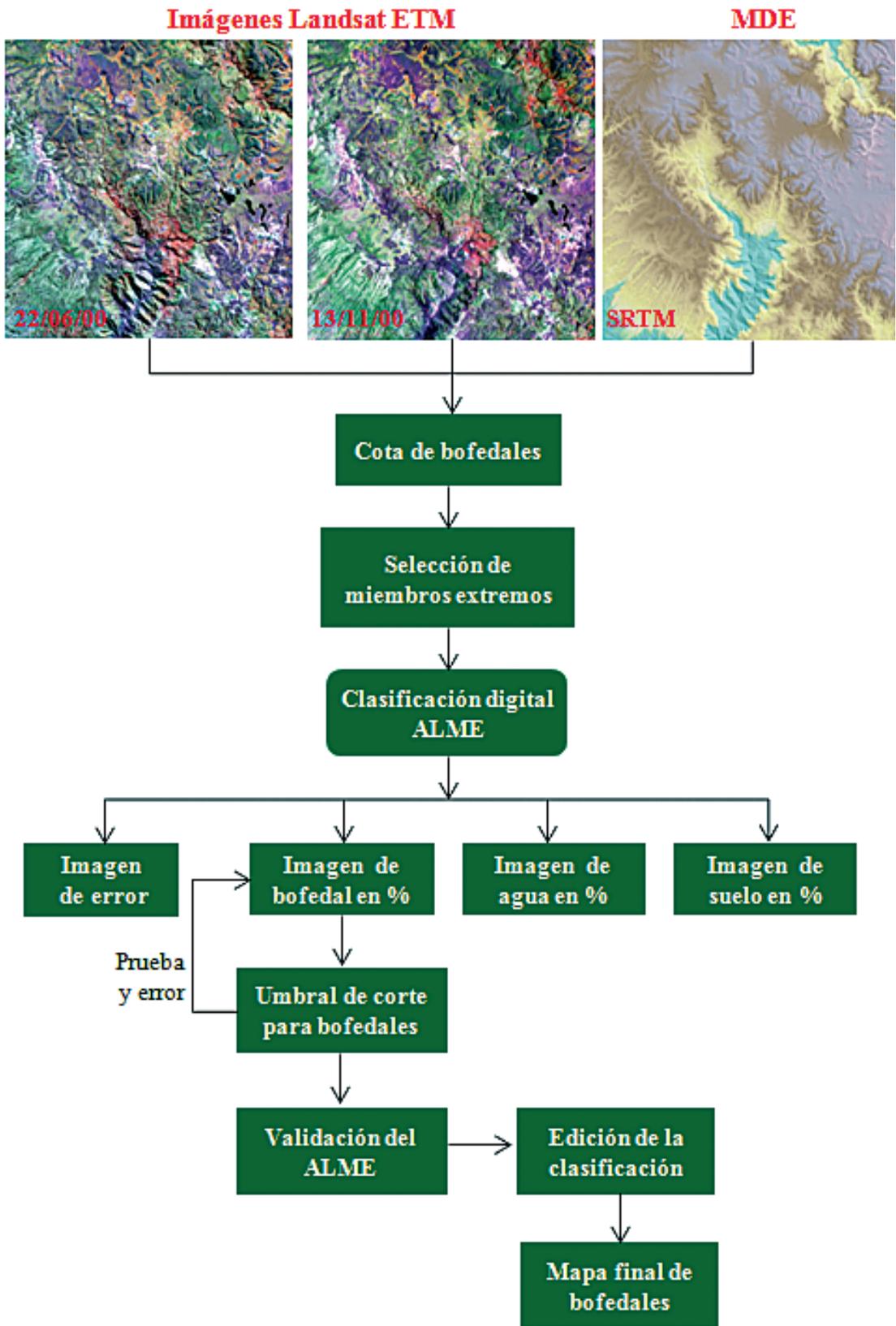


Figura 3. Flujo de trabajo seguido para extraer los bofedales de la cuenca alta del río Acarí usando el algoritmo ALME sobre imágenes Landsat.

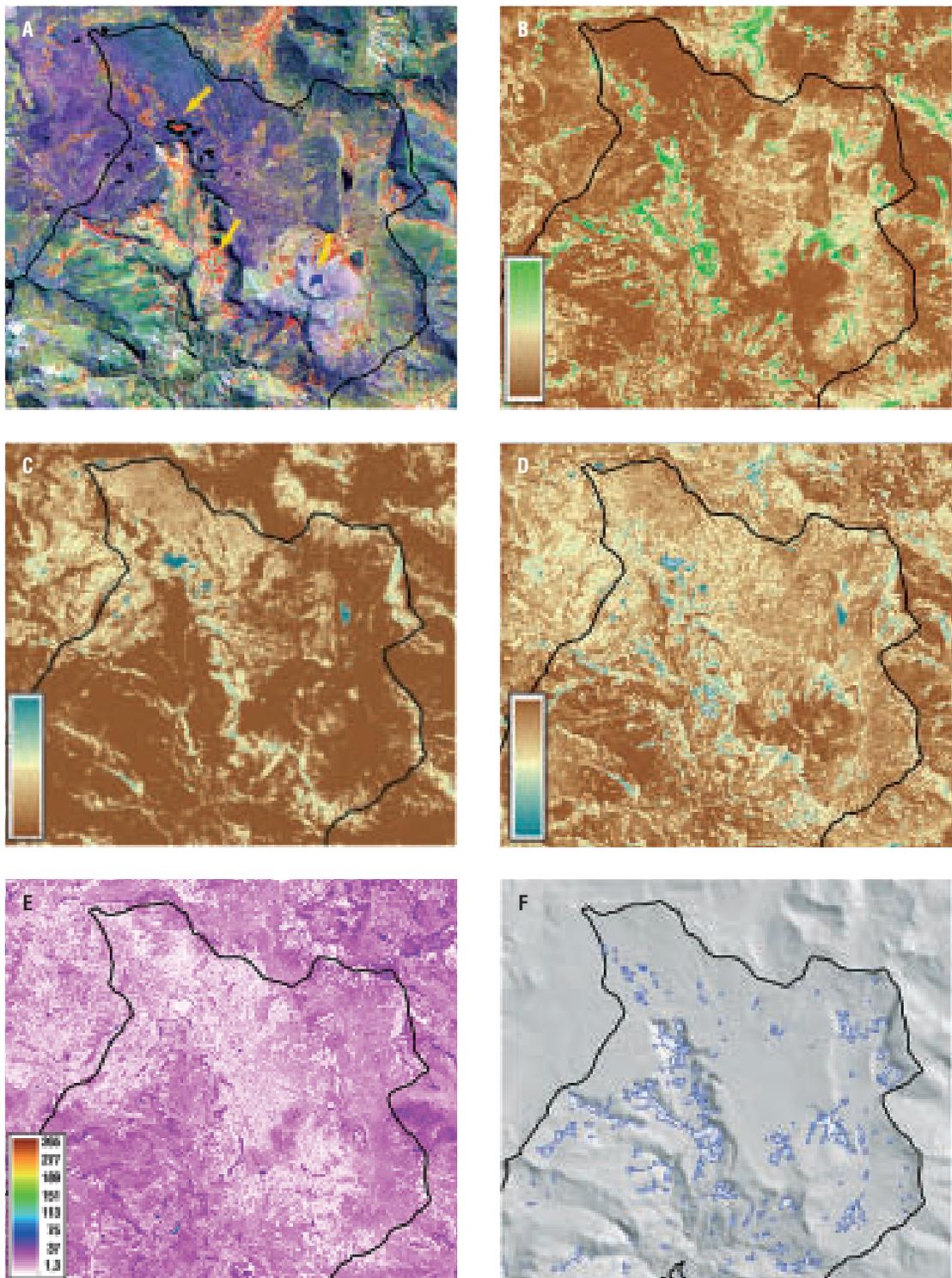


Figura 4. a) Imagen Landsat con la ubicación de los píxeles puros. b) Imagen fracción de bofedales. c) imagen fracción de agua. d) imagen fracción de suelo. e) imagen de error y f) bofedales clasificados

De la misma forma se procedió con la imagen de noviembre, seleccionando los «endmembers» en la misma ubicación que en la imagen

de junio, esto a efectos de comparar sus resultados y evaluar la mejor fecha para la identificación de los bofedales. En este trabajo se

optó al final por sumar las clasificaciones de bofedales de las dos fechas utilizadas (junio y noviembre), aunque como se discutirá más adelante esto no fue significativo estadísticamente.

Sobre las imágenes de fracción de bofedales de junio y noviembre, se aplicaron dos tipos de filtrados. Por un lado, uno para suavizar los píxeles de borde evitando el efecto escaleras de la clasificación digital y por el otro para disminuir el ruido inherente a la clasificación digital, eliminando las agrupaciones de píxeles que no están por encima de la MUC seleccionada (0.8 ha). Igualmente, se hicieron algunas correcciones manuales donde ambos filtros fallaban, especialmente por la confusión entre los bofedales y los cultivos de ladera que existen en las cotas más bajas de la cuenca alta por su similar reflectividad espectral.

El mapa de bofedales en formato raster se importó dentro del programa Arcgis para convertirlo al formato vectorial *shapefile* de tipo polígono (Figura 4-f), ya que este tipo de información es de uso más frecuente en los SIG.

Evaluación de la clasificación digital

Es necesario, luego del proceso de clasificación en imágenes de satélite, reflejar de alguna manera la fiabilidad de sus resultados. Para esto, se puede comparar un conjunto de puntos escogidos aleatoriamente en el mapa clasificado con otras fuentes que se consideren fiables (Sobrino, 2000).

La evaluación de la fiabilidad de los mapas de bofedales obtenidos para la parte alta de la cuenca del río Acarí usando el algoritmo ALME, se hará usando matrices de contingencias con sus respectivos descriptores estadísticos, como la fiabilidad global (F) y el análisis Kappa, definido este último por el valor del estadístico KHAT (Tabla 1). Una matriz de contingencia es una tabla cuadrada que indica la correspondencia entre las clases del producto a evaluar y las clases de referencia. La diagonal principal indica el número de píxeles que han sido correctamente clasificados para cada categoría, mientras que los elementos ubicados fuera de la diagonal indican los errores de

Tabla 1. Expresión matemática de la matriz de contingencia y de sus estadísticos F y KHAT

		j = Columnas (referencia)			Total de filas
		1	2	k	n ⁱ⁺
i = Filas (clasificación)	1	n ₁₁	n ₁₂	n _{1k}	n ₁₊
	2	n ₂₁	n ₂₂	n _{2k}	n ₂₊
	k	n _{k1}	n _{k2}	n _{kk}	n _{k+}
Total de columnas	n ^{-j}	n ₊₁	n ₊₂	n _{+k}	n

$$F = \frac{\sum_{i=1,k} x n_{ii}}{n} \quad KHAT = \frac{n \sum_{i=1,k} n_{ii} - \sum_{i=1,k} n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1,k} n_{i+} n_{+i}}$$

Fuente: adaptado de Congalton & Green, 2007.

asignación. La matriz de contingencia también permite evaluar el error y la fiabilidad con respecto a las perspectivas del productor y del usuario del mapa. La fiabilidad del productor, es una medida del error de omisión, mientras que la fiabilidad del usuario, es una medida del error de comisión (Congalton, 1991). El valor de F, se calcula dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados por el número total de píxeles de referencia y expresándolo como porcentaje, mientras que el valor de KHAT es un estadístico que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad que cabría esperar simplemente por azar, más detalle en Congalton & Green, 2007.

Congalton *et al.* (1983) describe de qué manera un test de significancia estadística puede ser aplicado sobre el KHAT de una sola clasificación para determinar si el acuerdo entre la clasificación por sensores remotos y la información de referencia es estadísticamente significativa (mejor que una clasificación al azar). Igualmente, describe otro test aplicado sobre un par de KHAT calculados independientemente, con el que es posible comparar estadísticamente dos tipos de clasificaciones o dos fechas de imágenes para evaluar cual produce resultados más fiables.

En este trabajo, los datos para alimentar la matriz de contingencia se obtendrán de las imágenes de satélite de alta resolución del programa Google Earth disponibles para un sector de la parte alta de la cuenca de río Acarí. En base a estas imágenes y usando la interpretación vi-

sual se extraerán de manera aleatoria los puntos que representarán la verdad-terreno que servirán para la validar la clasificación digital usando el algoritmo ALME. La misma información también será usada para evaluar la fiabilidad del mapa de bofedales que se encuentra en el estudio del INRENA (2003b) de la microcuenca San José y que ha sido elaborado por métodos analógicos.

Resultados y discusión

Los mapas clasificados con el algoritmo ALME fueron evaluados a través de cuatro matrices de contingencia (Tablas 2-5) que se calcularon en base a 177 puntos extraídos de manera aleatoria de las imágenes de alta resolución del programa Google Earth. De los 177 puntos, 137 puntos corresponden a bofedales, y el resto a otro tipo de cubierta del suelo.

Las cuatro matrices de contingencias calculadas, obedecían a criterios y métodos de clasificación distintos, estos fueron: i) en base a los bofedales cartografiados por el ALME en la imagen del mes de junio versus la información puntual extraída de las imágenes de alta resolución (Tabla 2). ii) en base a los bofedales cartografiados por el ALME en la imagen del mes de noviembre versus la información puntual extraídas de las imágenes de alta resolución (Tabla 3). iii) en base a los bofedales cartografiados por el método ALME luego de efectuar la integración de las clasificaciones

Tabla 2. Matriz de contingencia para la clasificación de la imagen de junio (i)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	121	0	121	100.0	0.0
	No Bofedal	16	40	56	71.4	28.6
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	88.3	100.0		F = 91.0	
	Ex.O.	11.7	0.0		KHAT = 0.77	

Tabla 3. Matriz de contingencia para la clasificación de la imagen de noviembre (ii)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	119	0	119	100.0	0.0
	No Bofedal	18	40	58	69.0	31.0
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	86.9	100.0		F = 89.8	
	Ex.O.	13.1	0.0		KHAT = 0.75	

de las imágenes de junio y noviembre versus la información puntual extraídas de las imágenes de alta resolución (Tabla 4). iv) en base a los bofedales cartografiados por el método ALME luego de efectuar la integración de las clasificaciones de las imágenes de junio y noviembre versus la información extraídas por método analógicos de interpretación y delimitación manual en imágenes impresas y con comprobación de campo (Tabla 5).

Del análisis de las matrices se desprende la siguiente información: en la matriz (i), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente por el ALME en el mes de junio 121 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 88.3% y un error de omisión de 11.7%. En

el caso de la fiabilidad del usuario esta es del 100% por lo que el error de comisión es nulo. La fiabilidad global (F) es de 91% y el valor de KHAT es de 0.77, lo que quiere decir que nuestra clasificación es mejor en 77% que una clasificación hecha al azar. En la matriz (ii), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente por el ALME en el mes de noviembre 119 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 86.9%, algo menor que para la imagen de junio, y un error de omisión de 13.1%, algo mayor que en el mes de junio. En el caso de la fiabilidad del usuario esta es del 100% por lo que el error de comisión es nulo. La fiabilidad global (F) es de 89.9% y el valor de KHAT es de 0.75, lo que quiere decir que nues-

Tabla 4. Matriz de contingencia para la suma de clasificaciones de las imágenes de junio y noviembre (iii)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	125	0	125	100.0	0.0
	No Bofedal	12	40	52	76.9	23.1
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	91.2	100.0		F = 93.22	
	Ex.O.	8.8	0.0		KHAT = 0.82	

Tabla 5. Matriz de contingencia para la delimitación manual (iv)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	112	0	113	99.1	0.9
	No Bofedal	25	39	64	60.9	39.1
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	81.82	97.5		F = 85.3	
	Ex.O.	18.2	2.5		KHAT = 0.65	

tra clasificación es mejor en 75% que una clasificación hecha al azar. En la matriz (iii), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente en la integración de la imagen clasificada por el ALME en los meses de junio y noviembre 125 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 91.2%, ligeramente mayor a la clasificación independiente del mes de junio y mayor que en la clasificación independiente del mes de noviembre. El error de omisión fue de 8.8%, ligeramente menor que en la clasificación independiente del mes de junio y menor que en la clasificación independiente del mes de noviembre. En el caso de la fiabilidad del usuario esta fue del 100%, por lo que el error de comisión es nulo, igual que los casos anteriores (clasificación independiente de junio y noviembre). La fiabilidad global (F) fue de 93.2% y el valor de KHAT es de 0.82, lo que quiere decir que nuestra clasificación es mejor en 82% que una clasificación hecha al azar. Por último, en la matriz (iv), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente en el mapa elaborado por métodos convencionales (INRENA, 2003^b), 112 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 81.8%, la más baja en relación a las matrices anteriores. El error de omisión también fue mayor, 18.2%, en relación a las matrices anteriores. En el caso de la fiabilidad del usuario esta fue del 85.3%, con un error de comisión de 18.2%. La fiabilidad global (F) fue de 85.3% y el valor

de KHAT es de 0.65, lo que quiere decir que nuestra clasificación es mejor en 65% que una clasificación hecha al azar.

La mayor cantidad de aciertos del ALME en la clasificación de bofedales se obtiene con la clasificación que integra las imágenes de junio y noviembre (91.2%), seguida de la clasificación independiente de la imagen de junio (88.3%), seguida de la de noviembre (86.9%) y por último la clasificación obtenida por los métodos analógicos de interpretación y digitalización manual (81.8%). El análisis estadístico de las matrices de contingencia permitió evaluar independientemente y en pares el nivel de significancia estadística, sobre cada criterio de clasificación aplicado para extraer los bofedales de las imágenes de satélite Landsat.

En la Tabla 6 se presenta los resultados del análisis Kappa sobre las matrices de contingencia individuales. Como se mencionó, el valor del estadístico KHAT es una medida de la fiabilidad muy usada para evaluar los resultados alcanzados en una clasificación digital de imágenes de satélite frente una fuente de información de mayor fiabilidad. Landis y Koch (1977) caracterizaron en tres los rangos en que se puede encontrar el valor de este estadístico KHAT: un valor mayor que 0.80 (>80%) representa un acuerdo muy fuerte; un valor entre 0.40 y 0.80 (40-80%) representa un acuerdo moderado; y un valor menor de 0.40 (40%) representa un acuerdo muy pobre. En la Tabla 6 también se muestran el valor del estadístico Z usado para determinar si la clasificación es sig-

Tabla 6. Comparación de la significancia estadística individual para las cuatro clasificaciones

Matriz de contingencia	KHAT	Estadístico Z	Resultado
i	0.77	14.56	S
ii	0.75	13.61	S
iii	0.82	17.07	S
iv	0.65	10.60	S

S = Significativo ($p = 0.95$).

Tabla 7. Comparación de la significancia estadística entre fechas y método de clasificación

Matriz de contingencia	Estadístico Z	Resultado
i vs. ii	0.26	NS
iii vs. i	0.69	NS
iii vs. ii	0.95	NS
iii vs. iv	2.17	S

NS = No significativo, S = Significativo ($p = 0.95$).

nificativamente mejor que una clasificación realizada al azar. Al nivel de 95% de confianza, el valor crítico de Z sería 1.96. En las cuatro clasificaciones conseguimos un valor del estadístico Z mayor que el valor crítico 1.96 ($p = 0.95$), por lo que se puede afirmar que en las cuatro clasificaciones conseguimos resultados mejores que los esperados en una clasificación hecha al azar.

En la Tabla 7, se presentan los resultados del análisis Kappa al comparar en pares las matrices de contingencia de las tablas 2-5 para determinar si son estadísticamente significativas. El resultado de este test de significancia revela que solo para las matrices de contingencia «iii vs. iv», esta diferencia es significativa, ya que el valor del estadístico Z es mayor que el umbral de significancia escogido 1.96 ($p = 0.95$). De lo anterior, se puede afirmar que en el caso de este trabajo, el método de clasificación digital ALME obtiene una mayor fiabilidad en el cartografiado de bofedales que los métodos analógicos de interpretación y digitalización manual. Además, en lo que respecta al uso de imágenes de distintas fechas para el cartografiado de bofedales, este trabajo reveló que la clasificación de imágenes de distintas fechas o la suma de ambas clasificaciones no es estadísticamente sig-

nificativa, ya que en cada caso el valor del estadístico Z fue menor que el umbral de significancia escogido 1.96 ($p = 0.95$). Aunque con la suma de ambas clasificaciones se consiguen un mayor valor de KHAT.

Luego, en el programa ArcGis, se calculó la extensión de la superficie de bofedales para la parte alta de la cuenca del río Acarí se. Existe en total 2.828 ha de bofedales para el año 2000, que equivalen al 1.5% del área de la cuenca alta del río Acarí y al 0.6% del área de toda la cuenca. El mapa final con la distribución y extensión de los bofedales de la cuenca alta del río Acarí se muestra en la Figura 5.

Algunos inconvenientes en el uso de esta metodología son la determinación del valor altitudinal adecuado para considerar la existencia de bofedales, el cual puede variar en función de la cuenca estudiada y está sujeto a la habilidad y conocimiento del intérprete. Se puede notar que mientras que la cota de bofedales sea más baja, los bofedales tenderán a confundirse con zonas cultivadas de la cuenca, ya que presentan similar reflectividad; por lo que los trabajos de edición final serán mayores. En el caso específico de la cuenca alta del río Acarí, el valor de 3.700 msnm fue el más adecuado, no obstante existió alguna confusión entre los bofedales cartografiados con los cul-

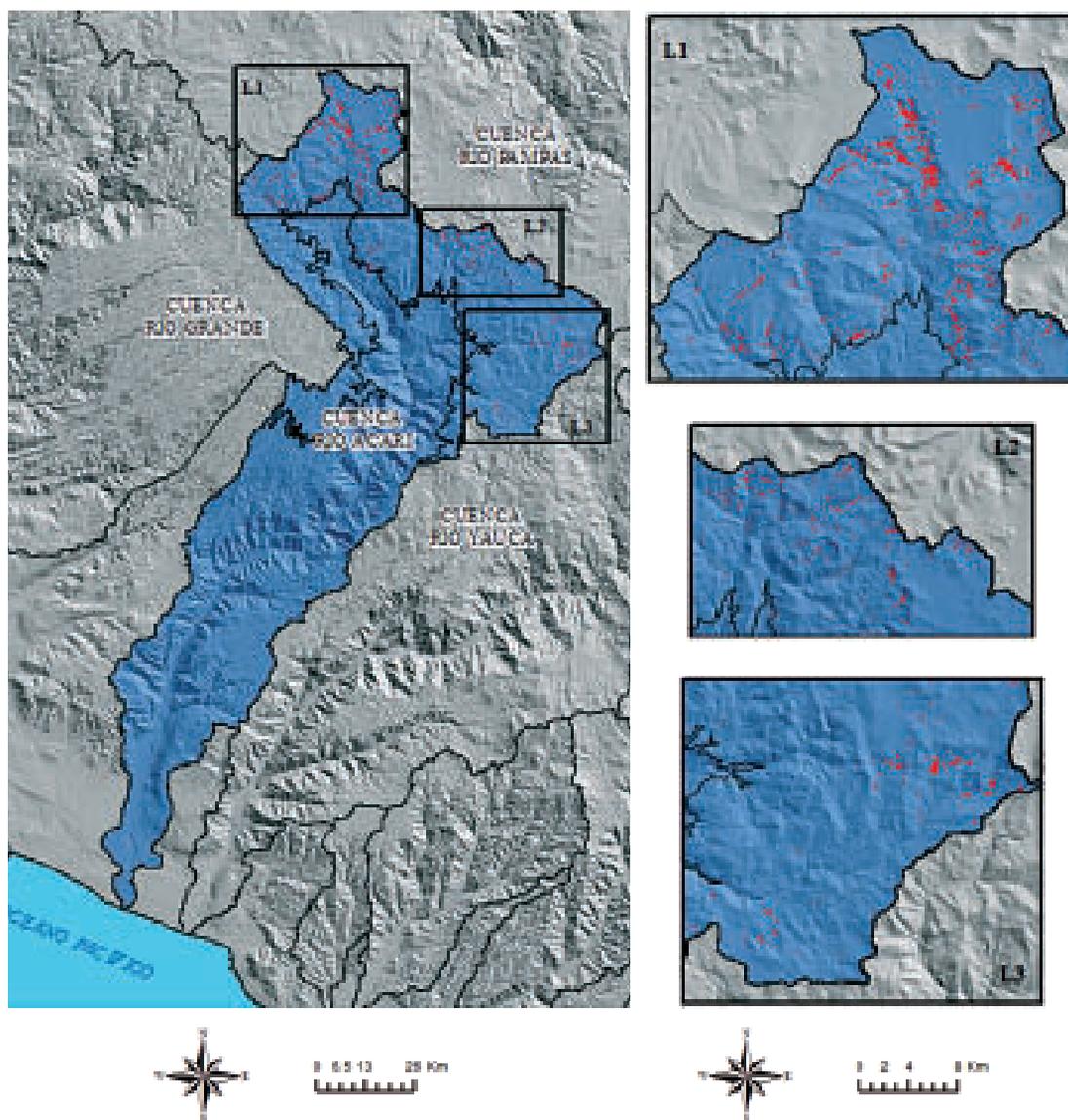


Figura 5. Mapa de bofedales para la cuenca alta del río Acarí extraídos en base a las imágenes Landsat aplicando el algoritmo ALME.

tivos ubicados en zonas de laderas en el límite de la cotas 3.700 msnm, lo que tuvo que editarse de manera manual. Esta metodología es eficiente para cartografiar los humedales altoandinos conocidos como bofedales, que muestran una vegetación permanentemente húmeda todo el año, pero se pudo notar que existen otro tipo de ecosistemas hídricos que no pueden ser representados adecuadamente, ya que si son susceptibles a la temporada húmeda y seca en la parte alta de la cuenca.

En el proceso de clasificación de bofedales, se pudo notar que si el interés es cartografiar

cuerpos de agua (lagos, lagunas), las imágenes de satélite cercanas al final de la estación húmeda, capturarán una mayor extensión de lagunas permanentes y temporales, ya que en la época seca las lagunas más grandes tienden a disminuir su espejo de agua y las lagunas de menor tamaño tienden a secarse.

Si hacemos una comparación de la cartografía a la escala 1:250 000, que actualmente existe en el Perú sobre bofedales a nivel nacional (Figura 6), inmediatamente nos damos cuenta de la generalización y sobrestimación de este tipo de humedales. De aquí la impor-

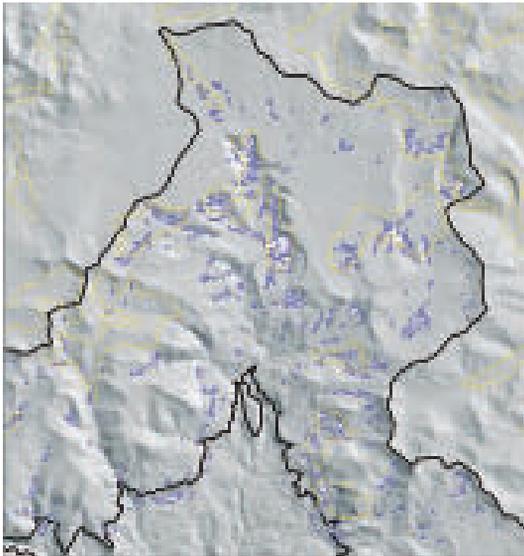


Figura 6. Bofedales extraídos de la imagen de satélite Landsat (en azul) Vs. La información actual de bofedales a nivel nacional a la escala 1:250 000 (en amarillo).

tancia de contar con información más detallada de la superficie de humedales del país que permita cuantificar con mayor fiabilidad la extensión de este tipo de ecosistema.

Conclusiones

Este artículo demuestra que las imágenes de satélite Landsat y el algoritmo ALME pueden ser usadas de manera efectiva para cartografiar los humedales altoandinos conocidos como bofedales, a la escala 1: 100 000 y mayores de 0.8 ha.

La fiabilidad del productor para la cubierta de bofedales en la cuenca alta del río Acarí estuvo entre 86.9-91.2% y la fiabilidad del usuario fue del 100%. La fiabilidad global de la clasificación estuvo entre 89.8-93.2%. La superficie de bofedales estimada para el año 2000 fue de 2.828 ha, que representa el 1.5% de la superficie de la cuenca alta y 0.5% de la superficie de toda la cuenca.

El empleo de imágenes de distintas fechas en un año, permitió evaluar la mejor época para cartografiar los bofedales de la cuenca alta del río Acarí. Los resultados concluyeron que a un nivel de significancia estadística del 95%, es indistinto el uso de imágenes de diferentes

fechas en esta cuenca, aunque la mayor cantidad de aciertos se da cuando se suman las clasificaciones de ambas imágenes, seguida de la clasificación de la imagen de finales de la estación húmeda, y luego de la imagen de finales estación seca.

La comparación entre los bofedales cartografiados manualmente, a través de métodos analógicos y los bofedales clasificados digitalmente con el algoritmo ALME; demostró que este último es superior para el cartografiado de bofedales. La clasificación digital permitió identificar una mayor extensión y nivel de detalle a diferencia de la clasificación manual.

La principal dificultad para cartografiar los bofedales con el algoritmo ALME está en seleccionar un adecuado umbral en el mapa de fracción de bofedales. Además mientras la cota límite de bofedales es más baja, estos pueden confundirse con algunos cultivos de ladera, por su similar respuesta espectral; por lo que se debe hacer una edición manual al final del proceso de clasificación digital.

El uso de imágenes de alta resolución disponibles en el programa Google Earth de manera gratuita, es una fuente de información muy útil para evaluar la fiabilidad de la clasificación digital cuando no se cuentan con información de campo, como quedó demostrado en este trabajo.

El cartografiado de bofedales realizado a través de imágenes de satélite provee de valiosa información para la gestión y conservación de estos humedales altoandinos, a fin de mantener las funciones y servicios ecosistémico en las cabeceras de cuenca, sobre todo aquellos relacionados con la regulación y la provisión de recursos hídricos.

Referencias

- ADAMS, J. B., SABOL, D. E., KAPOV, V., FILHO, R. A., ROBERTS, D. A., SMITH, M. O., *et al.* 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 52(2): 137-154.
- ALVES, P. R., GABOARDI, C. & CASTRO, L. 2006. Avaliação da precisão dos modelos SRTM para a Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 58(1): 101-107.

- ALZÉRRECA, H. A., PRIETO, G. C., LAURA, J. C., LUNA, D. CH., & LAGUNA, S. B. 2001. Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. Proyecto BOL/98/G31, Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca —Desagüadero— Poopó-Salar de Coipasa (T.D.P.S.), Subcontrato 21.12. Asociación Integral de Ganaderos en Camélidos de los Andes (AIGACAA), La Paz, Bolivia, 140 pp.
- BRIVIO, P. A., & ZILIOI, E. 1996. Assessing wetland changes in the Venice lagoon by means of satellite remote sensing data. *Journal of Coastal Conservation*, 2: 23-32.
- COBBING, B.L. 2007. The use of Landsat ETM imagery as a suitable data capture source for alien acacia species for the WFW programme. Master thesis, Rhodes University.
- CONGALTON, R. G., & GREEN, K. 2007. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. Lewis Publishers, New York.
- CONGALTON, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37:35-46.
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R. G., & MEAD, R. A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(12): 1671-1678.
- CONVENCIÓN DE RAMSAR. 2007. Inventario de humedales: un Marco para el Inventario de Humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales 3a. edición, vol. 12. Secretaría de la Convención Ramsar, Gland (Suiza).
- CHAVEZ, P. S. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- CHUVIECO. 1996. *Fundamentos de la Teledetección espacial*, Madrid: Ed. Rialp, 568 p.
- EEA. 1994. CORINE Land Cover: Part 1: Methodology; CORINE Land Cover; Commission of the European Communities: Copenhagen, Denmark.
- HALLS, A. J. 1997. Wetlands, Biodiversity and the Ramsar Convention: The Role of the Convention on Wetlands in the Conservation and Wise Use of Biodiversity. Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland.
- HE, M. M., ZHAO, B., OUYANG, Z., YAN, Y., & LI, B. (2010), Linear spectral mixture analysis of Landsat TM data for monitoring invasive exotic plants in estuarine wetlands. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (16): 4319-4333.
- INRENA. 2003a. Estudio Integral de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Acari y Yauca. Componente: Estudio de Inventario de Fuentes de Agua Superficiales. Ministerio de Agricultura, INRENA, PP. 138. Lima, Peru.
- INRENA. 2003b. Zonificación agroecológica Microcuenca San Jose - Cuenca Acari Semidetalle. Ministerio de Agricultura, INRENA, pp. 117. Lima, Perú
- LUNETTA, R. S. 1998. Applications, project formulation, and analytical approach. In *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*; Ann Arbor Press: Chelsea, MI, USA, Chapter 1, pp. 1-19
- LUNETTA, R. S., & BALOGH, M. E. 1999. Application of Multi-Temporal Landsat 5 TM Imagery for Wetland Identification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65: 1303-1310.
- LANDIS J. R., & KOCH, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33:159-174.
- MICHISHITA, R., GONG, P., XU, B. (2012). Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (11): 3373-3401.
- NASA. 1998. Landsat 7 Science Data Users Handbook. Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html.
- OZESMI, S. L., & BAUER, M. E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetland Ecology and Management*, 10(5): 381-402.
- PALANISWAMI, C., UPADHYAY, A. K., & MAHESWARAPPA, H. P. 2006. Spectral mixture analysis for subpixel classification of coconut. *Current Science*, 91(12): 1706-1711.
- SANG, K., & CHONG, P. 2004. Linear spectral mixture analysis of Landsat imagery for wetland land-cover classification in Paldang reservoir and vicinity, Korean. *Journal of Remote Sensing*, 20 (3) 197-205.
- SHINE, C., & DE KLEMM, C. 1999. Wetlands, Water and the Law: Using law to advance wetland conservation and wise use. IUCN, Gland, Switzerland, Cambridge, UK and Bonn, Germany. pp. xvi + 330.
- SMALL, C. 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 1305-1334.
- SMITH, M. O., USTIN, S. L., ADAMS, J. B., & GILLESPIE, A. R. 1990. Vegetation in deserts: regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, 1098(31): 1-26.
- SOBRINO, J. A., RAISSOUNI, N., KERR, Y., OLIOSO, A., LÓPEZ-GARCÍA, M. J., BELAID, A., *et al.* 2000. Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed), Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia, España.
- THESEIRA, M. A., THOMAS, G., & SANNIER, C. A. D. 2002. An evaluation of spectral mixture modeling applied to a semi-arid environment.

- International Journal of Remote Sensing, 23: 687-700.
- THOMPSON, M., MARNEWECK, G., BELL, S., KOTZE, D., MULLER, J., COX, D., *et al.* 2002. A methodology for a south African National Wetland Inventory. Department of Environmental Affairs and Tourism Report.
- USTIN, S. L., SMITH, M. O., JAQUEMOUD, S., VERSTRAETE, M., & GOVAERTS, Y. 1999. Geobotany: vegetation mapping for Earth Science. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, 3d ed, pp.189-233. New York, USA.
- VAN DER MEER, F. 1999. Can we map swelling clays with remote sensing? International Journal of Earth Observation. 1(1): 27-35.

Caso práctico

Síntesis de la evolución histórica de la teledetección en España (1889-2012)

G. Casal¹ y J. Freire²

¹ *Grupo de Recursos Marinos y Pesquerías, Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña, Rúa da Fraga 10, 15008 A Coruña*

² *Barrabés Next, C. Serrano 16-1, 28001 Madrid*

Resumen

El término teledetección hace referencia a la obtención de información sobre un objeto, área o fenómeno sin un contacto directo con el mismo. A lo largo del tiempo este término ha ido cobrando importancia debido a los avances tecnológicos hasta convertirse en una técnica de obtención de información, clave en muchos y diferentes campos. Sin embargo, hasta llegar a este punto se han sucedido hechos que en su momento han constituido hitos para el avance hacia una información más detallada y precisa y consecuentemente de mayor valor. Sin embargo, especialmente en España, esta información es escasa y se encuentra dispersa en diversas fuentes. El presente texto intenta reunir los principales hitos históricos de la teledetección a nivel nacional y aunque no pretende ser una revisión exhaustiva sí reflejar su evolución a lo largo del tiempo, desde lo que fueron sus orígenes hasta lo que conocemos hoy en día.

Palabras clave: historia, teledetección, fotografías aéreas, satélites, universidades, España.

Abstract

Synthesis of the historical evolution of remote sensing in Spain (1889-2012)

The term remote sensing is related to the action of obtaining information about an object, area or phenomenon without a direct contact. Over time this term has become increasingly important due to technological advances until becoming a technique of obtaining information, key in many and different fields. However, especially in Spain, the information about these issues is scarce and distribute in several sources. For this reason, this text attempts to bring together the main historical milestones in remote sensing at a national level. It is not expected to be an exhaustive review; however it reflects its evolution over time from what its beginnings were to what we know today.

Key words: history, remote sensing, aerial photographs, satellites, universities, Spain.

Introducción

El término teledetección o percepción remota tiene su origen en el término inglés «*remote sensing*», utilizado por primera vez en

1950 (Walter, 2006). La teledetección, podría definirse como la ciencia o el arte de adquirir información sobre un objeto, área o fenómeno a través de los datos adquiridos mediante un dispositivo que no está en contacto

* Autor para la correspondencia: gcasal[at]udc.es

Recibido: 16-10-12; Aceptado: 30-10-12.

directo con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (1). A pesar de que la teledetección tal y como es aplicada hoy en día es una disciplina relativamente reciente esta técnica ha venido utilizándose desde mucho tiempo atrás. Por lo tanto, para poder entender su importancia hoy en día, es necesario tener en cuenta sus orígenes, la evolución de las tecnologías implicadas y sus usos a lo largo del tiempo.

Hacer un artículo histórico sobre teledetección no resulta una tarea fácil dado que dentro de este término, relativamente reciente, se engloban muchas disciplinas y aunque en sus inicios estuvo más relacionada con fines cartográficos y militares posteriormente se han incorporado nuevos sensores, tanto aerotransportados como espaciales, ampliando enormemente sus posibles aplicaciones. En base a su definición, resulta imposible establecer un hecho concreto en el que por primera vez se utilizase teledetección. En el ámbito internacional, quizás una de las referencias más antiguas sean las observaciones astronómicas de Galileo Galilei a comienzos del siglo XVII (2). Hubo que esperar un siglo desde estas observaciones hasta la primera referencia gráfica registrada de un hombre observando el suelo desde el aire. Este hecho ocurrió en 1794 durante la Batalla de Fleurus (hoy en día Bélgica) cuando los hermanos Montgolfier utilizaron un globo aerostático para observar los movimientos del enemigo. A partir de este momento los avances en teledetección estuvieron ligados a fines militares hasta hace relativamente poco tiempo (década de los 60) cuando empezaron a cobrar importancia los sensores civiles. Esta evolución de la teledetección a nivel internacional se puede encontrar en diferentes textos donde se recogen con mayor o menor detalle los avances más importantes en este tipo de técnicas. Sin embargo, en el ámbito nacional existen escasas referencias sobre los acontecimientos que generaron información remota sobre el territorio español y que propiciaron su evolución hasta las modernas técnicas aplicadas hoy en día. Sorprendentemente, no se encontró ningún texto que proporcione una visión global y cronológica del contexto histórico español en teledetección. Por esta razón, hemos pensado que se-

ría útil generar un documento que reuniese este tipo de información. Es necesario mencionar que la presente revisión histórica no pretende ser exhaustiva, sino reflejar la evolución de este tipo de técnicas en el territorio español así como recoger también en la medida de lo posible información histórica disponible, muchas veces desconocida por parte de los posibles usuarios.

Debido a que la información que se pretende incluir en este artículo se encuentra bastante dispersa y dentro del término teledetección se engloban muchas disciplinas (cartografía, fotogrametría, técnicas aeroespaciales, etc.) las fuentes utilizadas incluyen desde artículos científicos, páginas web de diferentes organizaciones, artículos de prensa, material utilizado en cursos y conferencias hasta blogs personales. Utilizando estas fuentes, muchas de ellas no específicamente relacionadas con teledetección, hemos creado la siguiente cronología.

Cronología

1889

En España, como a nivel internacional, las primeras aplicaciones de teledetección estuvieron relacionadas con fines militares y surgieron a finales del siglo XIX. Debido a que la utilidad de los globos aerostáticos con fines militares era evidente los ejércitos europeos, y entre ellos el español, comenzaron a incorporar la aeroestación como servicio militar especializado. Así, en 1884 se creó en España el Servicio de Aeroestación Militar. Sin embargo, problemas presupuestarios provocaron que el funcionamiento real de la Aeroestación fuese pospuesto hasta 1889 (Quirós-Linares y Fernández-García, 1996). Durante este año se realizaron intentos de fotografías desde globos aerostáticos (La ilustración española americana, 1889). Una figura destacada durante esta época es D. Rafael Peralta, uno de los primeros jefes del Servicio de Aeroestación, quién propició el avance de la fotografía aérea diseñando importantes equipamientos para la aplicación de métodos



Figura 2. Fotografía aérea de la ciudad de Zaragoza (1927). Fuente: CHEbro (<http://oph.chebro.es/fotoplanos.htm>).

del catastro (Ruíz de Alda, 1931) sin embargo, los primeros clientes importantes fueron las Confederaciones Hidrográficas creadas en 1926.

En este año la CEFTA hace los primeros trabajos para la Confederación Hidrográfica del Ebro realizando un vuelo fotogramétrico. Este vuelo cubrió una amplia zona de la Cuenca Hidrográfica del Río Ebro a una escala de 1:10.000 (Galván-Plaza, 2007; Montaner *et al.*, 2010) (Fig. 2). Estas fotografías aéreas probablemente correspondan con las más antiguas sobre el territorio español conservadas en la actualidad. Dicho material puede descargarse en la página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHEbro). Durante esta época, debido a la importancia que estas técnicas estaban adquiriendo, surgieron nuevas instituciones dedicadas a su promoción y desarrollo. Así, en este mismo año se creó la Junta Constituyente de la Sociedad Española de Fotogrametría que desarrollaría su actividad hasta 1936 (5).

1928-1932

A finales de los años 20 la Confederación Hidrográfica del Segura encargó a la empresa CEFTA la consecución de una planimetría de determinadas zonas de interés para el desarrollo de los regadíos en el ámbito de la cuenca del Segura. El vuelo que CEFTA realizó para este proyecto posee en la actualidad un gran valor histórico y está siendo digitalizado y georeferenciado por la Dirección General del Medio Natural a partir de un acuerdo con la Confederación Hidrográfica del Segura (7). Este vuelo fotográfico se conoce como vuelo Ruíz de Alda y se realizó sobre amplias áreas de la Región de Murcia a una escala aproximada de 1:10.000 (6).

1936-1939

Durante la Guerra Civil Española el uso de la fotografía aérea fue una manera eficiente de

obtener información territorial útil para ambos bandos del conflicto. Durante este periodo se tomaron un número elevado de mosaicos aéreos y vistas panorámicas. Las fotografías tuvieron fines militares tales como cobertura de los frentes de conflicto y ciudades así como objetivos militares para planificar bombardeos y evaluar sus resultados (Fernández-García, 2004). Durante la Guerra Civil sólo las Fuerzas Aéreas Americanas tomaron más de 171 millones de fotografías con fines cartográficos cubriendo alrededor de 40 millones de kilómetros cuadrados (Servicio Geográfico del Ejército, 1970). Durante toda la guerra también se llevaron a cabo trabajos de fotointerpretación que consistían en la localización de objetivos enemigos (Montaner *et al.*, 2010).

1941

Entre 1941 y 1942 la Fuerza Aérea Británica (RAF) realiza fotografías aéreas sobre el litoral andaluz entre el Peñón de Gibraltar y Málaga, destinadas a detallar un perímetro de seguridad en torno a Gibraltar para prevenir posibles ataques alemanes (8). De 1940 a 1977 la Real Sociedad Geográfica fundada en 1876 representó a España en la Sociedad Internacional en Fotogrametría y Teledetección (9).

1942

En 1942 se creó una organización que sería clave en la teledetección española. Esta organización corresponde al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) que desarrollaría su actividad primero en el campo aeronáutico y posteriormente en el campo espacial (10). Actualmente pertenecen al INTA varios centros a lo largo del territorio español. Estos centros constituyen una unión fundamental entre los programas espaciales de la European Space Agency o Agencia Espacial Europea (ESA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (11). Entre ellos destaca, El Centro Espacial de Maspalomas (Gran Canaria) dedicado al control y seguimiento de satélites de observación de la Tierra.

1945-1946

Durante estos años las Fuerzas Aéreas Americanas realizaron un nuevo vuelo fotográfico sobre el territorio peninsular e Islas Baleares con fines cartográficos. No existe ninguna referencia de que fuese realizado sobre el Archipiélago Canario (Urteaga *et al.*, 2000). Este vuelo se conoce técnicamente con el nombre de «Serie A». La altura del vuelo varió entre 5.700 m y 8.800 m implicando un rango de escala entre 1:34.700 a 1:50.500 (Quirós-Linares y Fernández-García, 1997). El material de este vuelo está formado por 435 rollos de película que tienen correspondencia con la cuadrícula del Mapa Topográfico Nacional (Urteaga *et al.*, 2000). Sin embargo, las características del material y las condiciones de almacenamiento durante más de 50 años dañaron algunos de los rollos (Quirós-Linares y Fernández-García, 1997). Se trata de un material fotográfico que ofrece la instantánea del país en la primera etapa de su larga post-guerra, durante la cual se reforzó el dominio de las actividades agrarias tradicionales, sin que se hubieran iniciado aún los procesos que habrían de tener una gran transcendencia económica y espacial (la industrialización, la emigración, el éxodo rural y el crecimiento de las ciudades, etc.) (Quirós-Linares y Fernández-García, 1997). El material de este vuelo se encuentra a día de hoy conservado en el Centro Fotográfico y Cartográfico del Ejército del Aire (CECAF).

1956-1957

Entre 1956 y 1957 se realizó un segundo vuelo que cubrió todo el territorio español. Este vuelo fue una cooperación entre el Ejército Español y las Fuerzas Aéreas Americanas y fue realizado con fines cartográficos. Se conoce coloquialmente como «Vuelo Americano» y técnicamente como vuelo «Serie B». Estas fotografías fueron tomadas a una altura de 5.000 m con una escala de 1:33.000 (Urteaga *et al.*, 2000). Esta información pertenece al Ministerio de Defensa y algunas Comunidades Autónomas tales como Andalucía, Madrid, Cataluña o Navarra han publicado en internet las fotografías que cubren su territorio. El mate-

rial de este vuelo se encuentra a día de hoy conservado en el Centro Fotográfico y Cartográfico del Ejército del Aire (CECAF). Recientemente, en septiembre de 2011, el Ministerio de Defensa entregó una copia digital de este vuelo (Serie B) al Instituto Geográfico Nacional con el fin de ponerla a disposición de los posibles usuarios. Este vuelo ha sido ampliamente utilizado para muy diversos mapas temáticos, entre ellos el Mapa Forestal Nacional (Rodríguez-Esteban *et al.*, 2003).

1968

En este año se realiza un vuelo fotogramétrico sobre la Sierra de Guadarrama a una escala 1:18.000. Según Sastre (1998) posiblemente sea el primer vuelo a color. El trabajo fue realizado por CETFA a modo de prueba del que se conservan en total 93 fotogramas. Dicho material se encuentra archivado en el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

1974

El primer satélite español, INTASAT, aunque no relacionado directamente con la observación terrestre, fue lanzado el 15 de noviembre de 1974 con una vida útil de 2 años (12). Este pequeño satélite fue desarrollado por el INTA en colaboración con Construcciones Aeronáuticas (CASA), Estándar Eléctrica (actualmente Alcatel), la compañía inglesa *Hawker Siddely Dynamics* (HSD) y la NASA. El objetivo de este satélite era realizar dos experimentos. Uno de ellos era un experimento científico para estudiar la ionosfera y el otro era un experimento tecnológico diseñado para medir los efectos de la radiación espacial en algunos componentes CMOS (Jiménez-Dolera, 1974).

1975

En 1975 se creó la Agencia Espacial Europea (ESA) mediante la unión de dos organizaciones existentes en ese momento. Estas organizaciones fueron la European Launcher

Development Organization (ELDO) y la European Space Research Organization (ESRO). España fue uno de los miembros fundadores junto con Bélgica, Alemania, Dinamarca, Francia, Reino Unido, Italia, Holanda, Suecia y Suiza. Posteriormente, en el mismo año se uniría Irlanda.

Los programas de la ESA están diseñados para investigar a cerca de la Tierra, su ambiente espacial, el Sistema Solar y el Universo, así como desarrollar tecnologías y servicios basados en satélites y promover las industrias europeas. El programa Third Party Missions Program (TPM) Category-1 pone a disposición de la comunidad científica más de 50 instrumentos en más de 30 misiones. Además, la ESA proporciona un portal de observación de la Tierra en <http://eopi.esa.int>. Este sitio web contiene información sobre todos los datos de observación de la Tierra accesibles a través de la ESA, incluyendo los datos TMP. Los usuarios pueden solicitar el acceso a los datos, encontrar publicaciones sobre resultados científicos y noticias además de acceder a una base de datos online de todos los proyectos científicos.

1977

En 1977 se creó la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección (SECFYT). Esta organización está dedicada a integrar las actividades que hasta el momento venían realizando la Real Sociedad Geográfica y el Seminario Español de Estudios Cartográficos de la Asociación Española del Progreso de la Ciencia (13).

En este mismo año, se creó también el Centro para el Desarrollo Industrial y Tecnológico (CDTI). El CDTI es una Entidad Pública Empresarial, dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad, que promueve la innovación y el desarrollo tecnológico de las empresas españolas. Entre sus funciones están la de gestionar y apoyar la consecución, por parte de empresas españolas, de contratos industriales de alto contenido tecnológico generados por diferentes organizaciones nacionales y europeas, como la Agencia Espacial Europea (ESA), el Laboratorio Europeo para

la Física de Partículas (CERN), el Sincrotrón Europeo (ESRF), Hispasat y Eumetsat (14).

Entre 1977 y 1983 se realizó el Vuelo Interministerial mediante colaboración del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Ministerio de Fomento (MFOM), Ministerio de Defensa (MDEF) y el Ministerio de Economía y Hacienda (MEH). Este vuelo es comúnmente denominado IRYDA por ser el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario el principal usuario y custodio del mismo. Dicho vuelo es en blanco y negro y está custodiado actualmente por varios organismos pero en su mayor parte se encuentra en Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRyM), hoy en día Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAAMA). Sus características técnicas (escala 1:18.000), fechas, cobertura nacional y estado de conservación hacen que este vuelo sea uno de los que mayor interés suscita y el más demandado del archivo del MMAMRyM (Vales et al., 2010). El vuelo se realizó en un momento en el que se producían cambios sustanciales en las políticas económicas y territoriales en España. Por ejemplo, en relación a las actuaciones forestales, estas imágenes suponen un antes y un después en el cambio de política de repoblaciones forestales (Vales et al., 2010).

1984-1985

CECAF realiza sobre todo el territorio nacional un Vuelo Fotogramétrico Analógico en blanco y negro a escala 1:30.000. Este vuelo tiene una gran 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 (Vales et al. 2010).

1986

En marzo de 1986 se creó el Grupo de Trabajo en Teledetección (GTT). En septiembre de 1988 este grupo constituyó la Asociación Española de Teledetección (AET). Esta aso-

ciación lleva organizados hasta el momento XIV congresos así como reuniones científicas. Además, ha publicado ininterrumpidamente cada semestre desde 1993 la Revista Española de Teledetección (15).

1989-1990

Durante estos años se llevó a cabo un vuelo fotográfico en color realizado por la Dirección General de Costas sólo del litoral (Vales et al. 2010) a escala 1:10.000.

1998

En 1998, un astronauta español viaja al espacio por primera vez. Pedro Duque (Madrid, 1963) voló como Especialista de Misión en el *Space Shuttle Discovery*, STS-95, STS-95. Los 9 días de misión estuvieron dedicados a la investigación sin gravedad y al estudio del Sol. Duque se responsabilizó, entre otras cosas, de las cinco instalaciones científicas de la ESA a bordo del transbordador, así como del sistema informático empleado (16).

Duque fue también durante cinco años Presidente ejecutivo de *Deimos Imaging, S. L.*, compañía responsable del primer satélite privado español lanzado en 2009. En octubre de 2011 retomó su puesto de astronauta y actualmente lidera la Oficina de Operaciones de Vuelo, con responsabilidad sobre las actividades europeas en la Estación Espacial Internacional (17).

1999

En 1999 se inició un programa nacional de vuelos con el objetivo de cubrir sucesivamente la totalidad del estado, mediante ciclos quinquenales. Este vuelo fotogramétrico Nacional se realiza en diapositiva color, a una escala 1:40.000 (Edeso, 2006).

2000

El programa EUFAR (*European Facility for Airborne Research*) nació en 2000 y es una ac-

tividad integradora de las infraestructuras europeas en investigación aérea. Fue fundada por la Comisión Europea bajo los programas FP5/FP6/FP7. Los objetivos principales del programa EUFAR se podrían resumir en los siguientes: desarrollo del acceso trans-nacional a infraestructuras nacionales, reducir la redundancia y vacío de datos, mejorar el servicio mediante el refuerzo de habilidades a través de intercambio de conocimiento, desarrollo de estándares y protocolos, constitución de bases de datos y promoción del uso de infraestructuras de investigación aerotransportadas, especialmente para jóvenes científicos de países donde tales facilidades están ausentes (Bregier, 2010).

El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) toma parte activamente en el programa EUFAR mediante sus plataformas aéreas e investigación atmosférica en el subprograma *Transnational Access* (TA). El objetivo del subprograma TA consiste en facilitar el acceso de los investigadores a las plataformas más relevantes en Europa financiando en su totalidad este acceso. El INTA pone a disposición del programa sus dos aeronaves CASA 212 y 200. La plataforma de investigación atmosférica posee el equipo de medida, no sólo para los parámetros del vuelo sino también para los parámetros atmosféricos básicos, nubes y microfísica de aerosoles y química atmosférica. Además, INTA contribuye con los siguientes sensores: *Airborne Hyperspectral Scanner* (AHS), *Airborne Thematic Mapper* (ATM) y *Airborne Multispectral Digital Camera* (Serrano y Gómez, 2001).

2003

En 2003 tuvo lugar la Misión Cervantes. El objetivo de esta misión espacial fue el desarrollo de experimentos científicos europeos, la mayoría de ellos españoles y que fueron realizados por el astronauta Pedro Duque. Estos experimentos estuvieron relacionados con ciencias físicas y de la vida, observación de la Tierra, educación y nuevas tecnologías, incluyendo varios experimentos en la *Microgravity Science Glovebox*, una instalación de investigación desarrollada en Europa (18).

2004

En este año se creó el Plan Nacional de Teledetección (PNT) dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). Este plan depende del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y ambas organizaciones pertenecen al Ministerio de Fomento. Su principal objetivo es coordinar la adquisición de imágenes de satélite sobre el territorio español entre Ministerios y Comunidades Autónomas. El PNT se encarga de la realización de un pre-procesado básico (corrección geométrica y radiométrica) de las imágenes así como su distribución sin cargo económico a las Administraciones Públicas como pueden ser universidades e institutos de investigación. Las adquisiciones periódicas realizadas por el PNT incluyen imágenes satelitales de alta, media y baja resolución espacial (19).

Desde el año 2004, el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea proporciona imágenes aéreas, ortofotos y modelos digitales de elevaciones (MDE) de todo el territorio, con una periodicidad de dos años. El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) es un proyecto cofinanciado y cooperativo entre la Administración General del Estado (AGE) y las comunidades autónomas que se enmarca dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), siendo coordinado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Tiene como objetivo la obtención de productos fotogramétricos comunes para todo el territorio nacional, con especificaciones técnicas consensuadas entre todas las administraciones implicadas y cuyo resultado es el proceso y obtención de ortofotografías digitales, incluyendo: el vuelo fotogramétrico, apoyo de campo, aerotriangulación y el modelo digital de elevaciones (20).

2007

El gobierno español pone en marcha el Plan Estratégico para el Sector Espacial 2007-2011. Este plan es gestionado por el Ministerio de Industria a través del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) que contribuye

con una elevada inversión económica en el desarrollo y promoción de la teledetección.

2008

En este año se inauguran las instalaciones del Centro Europeo de Ciencias Planetarias y Astronomía Espacial (ESAC) (21) de la Agencia Europea del Espacio (ESA) situado en Villanueva de la Cañada (Madrid). Fue inaugurado el 7 de febrero de 2008 y tiene un papel fundamental en las misiones astronómicas y planetarias de la ESA. Este centro recibe datos del espacio profundo desde estaciones terrestres de todo el planeta. El gran volumen de datos que regresa a la Tierra procedente del espacio debe ser calibrado y convertido en un formato explotable por los científicos. ESAC ha sido elegido por el Centro de Operaciones de la Ciencia (SOCs) como el lugar de misiones científicas de la ESA tanto de astronomía como del Sistema Solar. Esto significa que ESAC constituye un punto de encuentro a nivel internacional para los científicos espaciales que trabajan en diferentes pero relacionadas áreas.

Hasta el momento el tipo de teledetección utilizada era de tipo pasiva sin embargo, la teledetección activa empieza a cobrar importancia y nuevos datos son generados utilizando este tipo de técnicas. En este año comienza el proyecto PNOA 2008-2012 de cobertura LIDAR cuyo objetivo consiste en generar la primera cobertura LIDAR a nivel nacional. Los datos obtenidos se están utilizando para generar un modelo digital de superficies con una densidad media de 0.5 pto/m², con una distribución de hojas de 2 × 2 km (22).

2009

En 2009 se lanza al espacio el primer satélite español de carácter privado, Deimos-1. Expertos pertenecientes al Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid asociados a *Deimos imaging* son los encargados del procesado de los datos obtenidos con este satélite. Sus aplicaciones están relacionadas con todo tipo de información sobre la Tierra como

por ejemplo la agricultura, la monitorización y el control de fuegos, vertidos, etc (23).

El servicio que ofrece en la actualidad el satélite Deimos-1 se completará con el que proporcionará Deimos-2, que será el segundo satélite de observación de la Tierra de Elecnor Deimos. El nuevo satélite, que incorporará importantes avances, producirá imágenes de la Tierra con una resolución hasta 400 veces mayor que la proporcionada por su predecesor (24). El lanzamiento de Deimos-2 está previsto para finales de 2013.

Hacia el futuro

Los datos de teledetección permiten la obtención de información geográfica y ambiental de la superficie de la tierra de una forma periódica y con gran variedad de resoluciones espectrales, radiométricas y espaciales. Por estas razones, cada día más empresas y administraciones públicas integran este tipo de datos en sus proyectos. El Ministerio de Defensa y el Ministerio de Industria han realizado una elevada inversión en la construcción de dos nuevos satélites: Ingenio anteriormente conocido como SEOSAT y Paz previamente conocido como SEOSAR que pertenecen al Sistema Español de Observación de la Tierra. Ingenio estará dedicado a la adquisición de imágenes ópticas y se espera que esté en órbita en 2014 mientras que Paz estará equipado con un sensor radar y será lanzado en 2012. La constelación tendrá usos civiles y militares como el estudio de desastres naturales, vigilancia de fronteras o proporcionar diversa información al ejército español. Mientras, que Ingenio será controlado por el CDTI, el Ministerio de Defensa controlará el satélite Paz, y ambos serán operados por la compañía Hidesat (25,26). Serán los primeros satélites de observación de la tierra construidos en España. Además de Ingenio y Paz, el liderazgo español está confirmado en futuras iniciativas tales como SmallGeo (2012), Sentinel-3 (2013) o PROBA-3 (2016) entre otros.

Las universidades han jugado también un papel importante en el desarrollo y divulgación de la teledetección. En los últimos años se han creado nuevos cursos de especialización y el estudio de este tipo de técnicas ha sido inclui-

do en planes de estudio de grados, máster y doctorado. Esta información ya había sido recogida en Martín *et al.*, (1992), sin embargo la tendencia no sólo ha continuado sino que se ha visto acentuada en los años siguientes. Además, las universidades han apostado también por el futuro de estas técnicas en sus líneas de investigación como puede ser observado en el incremento de las publicaciones científicas y tesis doctorales. Con el fin de obtener datos cuantitativos sobre esta tendencia se realizó una búsqueda en la *Web of Knowledge* utilizando las palabras clave «remote sensing» como «topic» y «Spain» como «address». Esta última palabra clave permite encontrar publicaciones con al menos un autor perteneciente a un organismo español. Los resultados muestran un claro incremento del número de publicaciones en el tiempo. El trabajo más antiguo que aparece en la búsqueda se publicó en 1983 y estuvo relacionado con la teledetección en la región térmica del espectro electromagnético (Bolomey *et al.*, 1983). Desde entonces, especialmente desde 1997, el número de publicaciones ha ido incrementándose (Fig. 3).

Por otra parte se realizó otra búsqueda en la misma base de datos, *Web of Knowledge*, comparando el número de publicaciones hasta el momento (agosto, 2012) entre diferentes países europeos. Para ello se utilizaron las palabras clave «remote sensing» como *topic* y los diferentes países como *address*. En el resultado de esta búsqueda se puede observar que aunque lejos de países como Alemania, Francia o Italia, España contribuye de manera significativa a la producción científica en este campo (Fig. 4).

Para hacer una estimación del número de tesis defendidas en España relacionadas con la teledetección se realizó una búsqueda en la base de datos TESEO utilizando las palabras clave «teledetección», «percepción remota» y «remote sensing» en título y resumen. Como resultado de esta búsqueda se aprecia que 43 de las 76 universidades españolas han presentado tesis relacionadas con teledetección. Las universidades que han contribuido en mayor medida a este campo hasta día de hoy (julio 2012) son la Universidad de Alcalá (29 tesis), Universidad Politécnica de Cataluña (27 tesis), Universidad de Valencia (26 tesis) y Universidad Politécnica de Madrid (24 tesis).

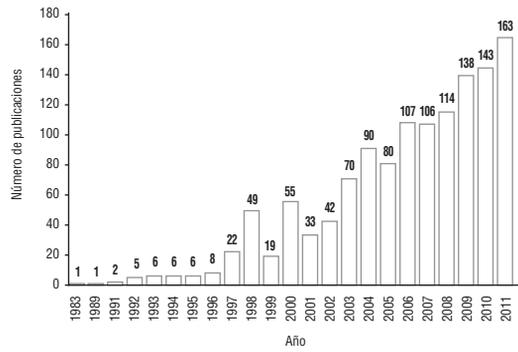


Figura 3. Número de publicaciones en la Web of Knowledge utilizando las palabras clave «remote sensing» como *topic* y «Spain» como *address*.

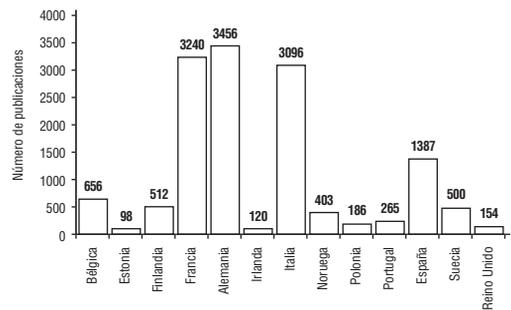


Figura 4. Resultado de la búsqueda en la Web of Knowledge para diferentes países Europeos utilizando las palabras clave «remote sensing» como *topic* y los diferentes países como *address*.

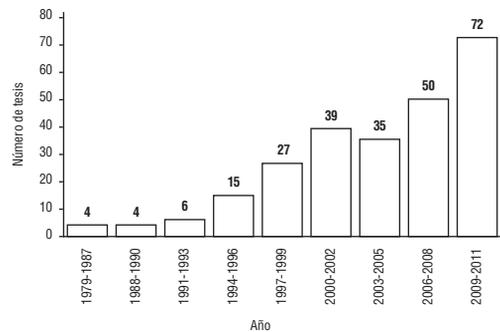


Figura 5. Número de tesis defendidas en universidades españolas entre 1979 y 2011. Los datos representados en el gráfico proceden de una búsqueda realizada en la base de datos TESEO utilizando las palabras clave «teledetección», «percepción remota» y «remote sensing».

Analizando la tendencia en el número de tesis defendidas se observa una distribución similar a la de artículos científicos mostrando un incremento claro en el tiempo (Fig. 5). Como resultado de la búsqueda, cabe mencionar

que la primera tesis defendida sobre teledetección fue presentada en la Universidad Autónoma de Madrid en 1979. Desde entonces, cada año el número de tesis ha ido en aumento con un remarcable incremento en el periodo entre 1991-1993 a 1994-1996.

Conclusiones

Los datos presentados en este artículo reflejan el creciente interés que la teledetección está provocando en España. Organizaciones públicas y privadas están invirtiendo en este campo lo que resulta en la aparición de cada vez más aplicaciones y productos. Como ha sido mencionado anteriormente, se podría afirmar que España ha apostado fuerte por la teledetección y en los últimos años nuevas organizaciones y proyectos han surgido en relación a este campo. El gobierno español ha realizado una gran inversión económica haciendo posible que España tome parte activamente en importantes proyectos de investigación, construcción de nuevos satélites, recepción de datos o instalaciones. Además, las universidades han apostado también por el futuro de estas técnicas como puede ser observado en el incremento de las publicaciones científicas y tesis doctorales. Sin embargo, a pesar del esfuerzo realizado en los últimos años aún existen cuestiones que deberían ser mejoradas en el futuro para facilitar el uso de la teledetección y para aumentar la generación de productos derivados. Entre estas cuestiones están el gran esfuerzo económico, la gestión burocrática y las restricciones de licencia o copyright que dificultan la divulgación de los datos y su reutilización. No obstante, estos antecedentes hacen de España un país competitivo a nivel internacional y se espera que esta situación continúe en el futuro debido a que nuevos proyectos continúan siendo desarrollados.

Referencias

- BOLOMEY, J. C., JOFRE, L., PERONNET, G. 1893. On the possible use of microwave-active imaging for remote thermal sensing. *IEE Transactions on Microwave theory and techniques*, 31(9): 777-781.
- BRENGIER, J. L. 2010. EUFAR. Integrating activity of the EC FP7. EUFAR/COPAL presentation. ESA/EUMESAT, 26/27 mayo, 2010. ESRIN, Frascati (Italia).
- EDESO FITO, J. M. 2006. Los datos de los SIG. Fuentes y recursos referidos a la Comunidad Autónoma Vasca. *Lurralde: Investigación y espacio*, 29: 27-55, ISSN 0211-5891.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, F. 1998. Las primeras aplicaciones civiles de la fotografía aérea en España 1: El catastro y las Confederaciones Hidrográficas. *Ería*, 46: 117-130.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, F. 2004. Los principales fondos históricos de fotografía aérea sobre Madrid. *Ería*, 64-65: 319-336.
- GALVÁN-PLAZA, R. 2007. El vuelo fotográfico de 1927 de la Confederación Sindical Hidrográfica del Ebro. *Cimbra*, 373: 50-53.
- JIMÉNEZ-DOLERA, J. 1974. INTASAT. Descripción general. *Comunicaciones Eléctricas*, 49(3): 287-293.
- MARTÍN, M.P., VIEDMA, O., & DOMÍNGUEZ, L. 1992. La enseñanza de la teledetección en España: inventario de cursos, medios y programas docentes. *Serie Geográfica*, 2: 11-21.
- MONTANER, C., NADAL, F., & URTEAGA, L. 2010. El servicio de cartografía de la Confederación Hidrográfica del Ebro durante la Guerra Civil Española. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52: 273-294.
- NADAL, F., URTEAGA, L., & MURO, J. I. 2000. El mapa topográfico del Protectorado de Marruecos en su contexto político e institucional (1923-1940). *Doc. Anál. Geogr.*, 36: 15-46.
- PÉREZ, D. 1927. El procedimiento fotogramétrico-aéreo. Confederación Sindical Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, Año I, nº 1.
- QUIRÓS-LINARES, F., & FERNÁNDEZ-GARCÍA, F. 1996. Los orígenes de la fotografía aérea en España. El Servicio de Aerostación Militar (1896-1913). *Ería*, 41: 173-188.
- QUIRÓS-LINARES, F., & FERNÁNDEZ-GARCÍA, F. 1997. El vuelo fotogramétrico de la «Serie A». *Ería*, 43: 190-198.
- RODRÍGUEZ-ESTEBAN, J. A., PÉREZ BLANCO, M., & RODRÍGUEZ DALDA, F. 2003. Análisis de cambios espacio-temporales a partir de la creación de ortoimágenes del vuelo fotogramétrico de 1933 (MTN 509, Comunidad de Madrid). IX Conferencia Iberoamericana SIG. VII Congreso Nacional AESIG. II Reunión GMC SIGT Cáceres 2003 - Universidad de Extremadura: Servicio de Publicaciones. ISBN: 84-7723-661-5.
- RUIZ DE ALDA, J. 1931. Catastro rápido nacional. *Anales de la Sociedad Española de Estudios Fotogramétricos*, 74-100.
- SASTRE DOMINGO, J. 1998. Recuperación de documentos cartográficos. *Topografía y Cartografía*, 84: 2-18.

- SERRANO, O., & GÓMEZ, J. A. 2001. EUFAR: Una iniciativa para mejorar el acceso a la flota europea de aeronaves de investigación medioambiental. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 621-625.
- URTEAGA, L., NADAL, F., & MURO, J. I. 2000. Los mapas de España del *Army Map Service*, 1941-1953. *Eria*, 51: 31-43.
- VALES, J. J., CARPINTERO, I. R., GRANADO, L., MÉNDEZ, E., MONTOYA, G., PINO, I., PRIETO, R., GIMÉNEZ DE AZCÁRATE, F., CÁCERES, F., & MOREIRA, J. M. 2010. Producción de ortofotos históricas para la generación de bases de datos temáticas. Cartografía de usos y coberturas del suelo. REDIAM. En: OJEDA, J., PITA, M.F., & VALLEJO, I. (Ed.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. pp. 370-384.
- WALKER, H. J. 2006. Evelyn Lord Pruitt, 1918-2000. *Annal of American Geographers*, 96 (2): 432-439.
- (8) <http://www.diariodesevilla.es/articulo/ocio/387080/alemanes/y/aliados/cartografia-ron/andalucia/durante/la/ii/guerra/mundial.html>
- (9) <http://www.secft.org/secft,1,1,quienes-somos.html>
- (10) <http://www.inta.es/NuestraHistoria.aspx>
- (11) <http://www.inta.es/DondeEstamos.aspx>
- (12) <http://www.inta.es/noticias/documentos/INTASAT.pdf>
- (13) <http://www.secft.org/einzelartikel.php?kat=1&subkat=11&subid=11>
- (14) http://www.cdti.es/index.asp?MP=6&MS=5&MN=1&r=1920*1080
- (15) <http://www.aet.org.es/?q=presentacion>
- (16) http://www.esa.int/esaCP/ESASZCZ84UC_Spain_0.html
- (17) http://www.esa.int/esaHS/ESAREUZUMOC_astronauts_0.html
- (18) http://www.esa.int/esaMI/Cervantes_mission_Spanish/index.html
- (19) <http://www.ign.es/PNT/documentacion.html>
- (20) <http://www.01.ign.es/ign/layoutIn/actividadesFotoTelePNOA.do>
- (21) http://www.esa.int/SPECIALS/ESAC/SEM329HY50H_0.html
- (22) <http://www.ign.es/PNOA/productos.html>
- (23) <http://www.elecnor.es/proyectos/deimos-1-primer-satelite-comercial-de-observacion-de-la-tierra>
- (24) <http://www.deimos-imaging.com/noticias/deimos-1-primer-satelite-espanol-de-observacion-de-la-tierra-cumple-su-tercer-aniversario>
- (25) http://www.concursoespacial.com/tematico/LaTierra5_2.asp
- (26) <http://www.rtve.es/noticias/20110801/ingenio-primer-satelite-optico-espanol-entrara-orbita-2014/451517.shtml>

Referencias digitales¹

- (1) <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/>
- (2) http://www.gis.usu.edu/~doug/RS5750/lectures/L2_Sensors.pdf
- (3) http://patrimonioculturalmelillense.blogspot.com.es/2009_04_01_archive.html
- (4) <http://www.ejercitodelaire.mde.es>
- (5) <http://www.secft.org/secft,1,1,quienes-somos.html>
- (6) http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=a,0,c,365,m,2705&r=ReP-13487-DETALLE_REPORTAJESPADRE
- (7) http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,a,0,m,2705&r=ReP-13486-DETALLE_REPORTAJES

¹ Último acceso 05 de septiembre de 2012.

Tesis doctoral

**Análisis de la estructura de una población de Piruétano
(*Pyrus bourgaeana*) basado en técnicas
de teledetección y SIG****Autor:** Salvador Arenas Castro**Directores:** Prof. Dr. Juan Fernández Haeger y Prof. Dr. Diego Jordano Barbudo**Lugar:** Área de Ecología (Departamento de Botánica, Ecología y F. Vegetal).
Universidad de Córdoba (España).**Fecha:** Enero de 2012**Calificación:** Sobresaliente *Cum Laude***Disponible:** Tesis Doctorales UCO: <http://hdl.handle.net/10396/7832>**Teseo:** <https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=959202>

En la actualidad, la gestión del bosque mediterráneo está orientada a objetivos múltiples como la conservación de la biodiversidad, la protección de cuencas, la explotación de ganado en extensivo, de la caza, del corcho, la educación ambiental y las actividades de ocio en la naturaleza, entre otros. Realizar una gestión sostenible adecuada, que logre conciliar objetivos tan diversos, requiere un conocimiento sólido de la vegetación leñosa, la cual juega un papel crucial en la estructura y dinámica de este ecosistema. Sin embargo, se conoce muy poco acerca de la ecología de algunas especies leñosas que pueden jugar un importante papel trófico y funcional, tanto en el bosque mediterráneo, como en las dehesas. Un ejemplo paradigmático es el piruétano o peral silvestre (*Pyrus bourgaeana*, Decne.) presente en la mitad sur de la Península Ibérica y algunos enclaves del N de África. Este árbol caducifolio de pequeño tamaño (5-6 m), perteneciente a la subfamilia *Pomoideae* (Rosáceas), de copa amplia e irregular y frecuentes espinas, presenta un gran interés desde el punto de vista ecológico, ya que produce hojas palatables y abundantes frutos carnosos en verano, muy atractivos para diversas especies de mamíferos y de aves, cuando otros recur-

sos tróficos son muy escasos. El objetivo principal de la Tesis es investigar la abundancia y distribución espacial del piruétano a distintas escalas, aplicando herramientas de teledetección y SIG sobre imágenes de satélite y fotografías aéreas, con objeto de distinguir y mapear perales silvestres sobre grandes zonas de dehesa o matorral de difícil acceso. Además, se investigó la estructura de edades y de tamaños de los árboles, su patrón de crecimiento, la variabilidad interindividual y la debida a distintos manejos, la producción de frutos y semillas, así como el reclutamiento de nuevos individuos.

Según el mapa de distribución geográfica, resultante tras la aplicación de un modelo empírico predictivo, sugiere que *P. bourgaeana* se restringe al SW de la Península Ibérica, más concretamente a lo largo de toda Sierra Morena, tratándose prácticamente de un endemismo.

A una mayor escala de detalle, en un área de estudio representativa de Sierra Morena (Córdoba), con una extensión de 230 ha ocupadas por dehesa de encinas y por un olivar abandonado, se localizaron mediante un GPS *Garmin 60Cx* todos los individuos de *P. bourgaeana* (n=122; 0,6 árboles/ha), registrándose datos de

altura, diámetro de tronco y de copa, producción de frutos, etc., y se determinó su edad mediante el análisis de los anillos de crecimiento. En este sentido, la comparación entre los árboles de la zona de dehesa y de olivar abandonado, reportó diferencias significativas en el tamaño de los árboles y en la producción de frutos. También se encontraron notables diferencias en la estructura de edades de los árboles de las dos zonas, evidenciándose un colapso del reclutamiento en los últimos 20 años. Existen fuertes indicios de que este colapso ha sido causado por la intensificación del aprovechamiento agrícola y ganadero durante dicho periodo. Por otro lado, la regeneración natural de los piruétanos en el área de estudio, no parece limitada por la disponibilidad de semillas viables. Además, se investigó la estructura espacial de los árboles, que a distintas escalas presentan un claro patrón en agregados, así como su relación con los distintos manejos a los que han estado sometidas durante el último lustro.

Un análisis comparativo entre firmas espectrales, mediante la aplicación de dos modelos de espectroradiómetros diferentes (*GER2600* y *GER1500*) y en base a los datos registrados en conocidas bibliotecas espectrales (*ASTER*, *USGS*, *ESPECTRA*, entre otras), confirmó que éstas permiten discriminar piruétano del resto de especies acompañantes.

Se utilizaron dos imágenes del área de estudio obtenidas por el satélite *Quickbird*, correspondientes a verano de 2008 y a primavera de 2009, y un ortomosaico elaborado con imágenes aéreas obtenidas con el sensor *ADS40 (SH52-2nd Generation)*, con el objetivo de realizar una clasificación supervisada (*Maximum Likelihood*) dirigida a constatar a qué resolución espacial, espectral y temporal se pueden discriminar y mapear los perales silvestres, del resto de la vegetación acompañante en el área de estudio. Además, y para reducir el efecto sobre las imágenes, de la dispersión de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, se realizó un estudio comparado de la eficacia de distintos métodos de corrección atmosférica (*Pixel Dark-ness Subtraction* y *Fast Line-of-Sight*

Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube o *FLAASH*). A continuación, y con el fin de maximizar la resolución espacial y espectral de las imágenes *Quickbird* para su posterior análisis, y mejorar los resultados de la clasificación, se utilizaron distintos métodos de fusión de imágenes (*Pan-Sharpening*): Método de Transformación *Wavelet «à trous»*, algoritmo de Fusión Espectral *Color Normalizado (CN)*, Método Multiplicativo de *Gram-Schmidt (G-S)*, Método de transformación al espacio *IHS (Intensidad-Saturación-Brillo)*, Metodología de fusión de imágenes *Multidirección-Multiresolución (MDMR)* y Método de *Componentes Principales (CP)*.

Así, la imagen *Quickbird* de verano, sometida a la corrección atmosférica *FLAASH* y al método de fusión *IHS*, fue la que reportó unos valores de precisión global e índice *kappa* de 80,60% y 78,4%, respectivamente, consiguiendo discriminar los piruétanos con una probabilidad de más del 50%. Este valor es relevante, si se considera que se trata de árboles individuales de pequeño porte y copa difusa, entremezclados con encinas y matorrales. Este método podría facilitar la investigación de la abundancia y la estructura espacial de los piruétanos en una escala espacial mucho más amplia, en zonas diferentes, desconocidas o de difícil acceso, con el fin de desvelar si los valores de los índices de clasificación son similares.

A modo de conclusión, los resultados de esta tesis ponen de manifiesto que la excesiva presión de herbivoría, provocada por la ganadería en extensivo como principal aprovechamiento tradicional en Sierra Morena Occidental, ha modulado la estructura actual de la población de piruétanos en el área de estudio. No obstante, y teniendo en cuenta la actual situación de cambio global y la acelerada pérdida de diversidad biológica que está teniendo lugar en todo el mundo, la metodología aquí descrita, basada en el análisis de imágenes multiespectrales de alta resolución, podría facilitar la investigación de la abundancia y la estructura espacial de los piruétanos en una escala espacial mucho más amplia. Añadir al estudio imágenes de diferentes formatos, como las producidas por sensores hiperespectrales, así como nuevas técnicas de

identificación, podrían ayudar a ampliar el conjunto de datos de campo y de imágenes existentes, a escala regional. Esta metodología permitiría a los científicos dedicados a la conservación, explorar, describir y cuantificar el estatus y requerimientos ambientales de

determinadas especies leñosas, sobre zonas más amplias que las limitadas a sus parcelas de trabajo, a una escala de detalle más fina, con el fin de priorizar mejor los esfuerzos de conservación.

Tesis doctoral

Análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) y aprendizaje automático para la obtención de mapas de coberturas del suelo a partir de imágenes de muy alta resolución espacial. Aplicación en la Unidad de Demanda Agraria n.º 28, Cabecera del Argos

Autor: Fulgencio Cánovas García

Director: Francisco Alonso Sarria

Lugar: Departamento de Geografía. Universidad de Murcia

Fecha: Mayo de 2012

Calificación: Sobresaliente *Cum Laude*

El lanzamiento del primer satélite *Landsat* en los inicios de la década de los 70 señaló el comienzo de la era de la teledetección espacial. Hasta finales de los 90, los satélites de media resolución espacial como este eran la fuente de información de mayor resolución espacial para la comunidad científica dedicada a la teledetección. Todo cambió en 1999 con el lanzamiento del satélite IKONOS-2, de un metro de resolución, lo que supuso la disponibilidad de imágenes de satélite de alta resolución espacial para aplicaciones civiles. En poco tiempo al IKONOS-2 le siguió el QuickBird, el OrbView-3, etc. Con estos la resolución de las imágenes se acerca a la de las fotografías aéreas, de algunas decenas de centímetros a un metro.

En este contexto surge el análisis de imágenes basado en objetos (OBIA por sus siglas en inglés), técnica que permite explotar gran parte de las dimensiones contenidas en las imágenes de teledetección, incluyendo aspectos espectrales, espaciales, contextuales, morfológicos y temporales; superando algunos de los inconvenientes asociados a los clasificadores estadísticos basados únicamente en la respuesta espectral de los píxeles.

Una clasificación basada en objetos se compone siempre de dos etapas: la segmen-

tación de la imagen y la clasificación. La primera consiste en la formación de objetos mediante la unión de píxeles, posteriormente la clasificación se realiza utilizando las características de los objetos. Se ha comprobado que este enfoque es capaz de ofrecer mejores resultados que los obtenidos por un enfoque tradicional basado en píxeles, muy especialmente cuando se trata con imágenes de alta resolución espacial.

Con respecto al aprendizaje automático, hasta mediados de la década de los 90, los métodos de clasificación supervisada aplicados al análisis de imágenes de satélite se basaban principalmente en técnicas estadísticas convencionales, como la clasificación por máxima verosimilitud o por mínima distancia. Aunque estas técnicas pueden dar buenos resultados, su capacidad para resolver problemas de confusión entre clases es muy limitada. Como consecuencia, en los últimos años, a raíz de los avances experimentados en el campo tecnológico de la computación, se han propuesto estrategias alternativas, particularmente el uso de redes neuronales artificiales, árboles de decisión, máquinas de vectores soporte o métodos derivados de la teoría de la lógica borrosa.

El objetivo general de esta investigación es profundizar en algunos elementos del análisis de imágenes basado en objetos, de manera que se reduzca el desfase existente entre el uso estandarizado de técnicas de clasificación de imágenes de teledetección y la disponibilidad de datos procedentes de sensores de muy alta resolución espacial. Concretamente, en esta investigación se atiende a las coberturas agrícolas.

Para aceptar que los resultados sean representativos, se ha considerado necesario realizar la investigación en un área de estudio de una extensión y complejidad considerables, como es la Unidad de Demanda Agraria denominada Cabecera del Argos, una de las unidades territoriales sobre las que se realiza la caracterización de demandas agrarias del plan hidrológico de la cuenca del Segura. En esta se dan distintos tipos de paisaje agrario y queda bien representada la variabilidad intra-clase propia de la agricultura del espacio rural mediterráneo. Se ha elegido un área de estudio más extensa de lo habitual, más de 9.000 ha, en investigaciones que emplean imágenes de menos de 0,5 m de resolución espacial, con la intención de acercarse lo más posible a la escala de aplicación real.

La segmentación de imágenes es un aspecto específico del análisis de imágenes basado en objetos cuando se aplica a imágenes de teledetección. En esta tesis se propone un método para la optimización del parámetro de escala del algoritmo de segmentación multirresolución. Tras el análisis de los resultados de este método se detectan ciertas deficiencias que tratan de superarse con la introducción de dos nuevos algoritmos de segmentación, mejorando sensiblemente la correspondencia espacial entre los objetos y los elementos de la realidad que pretenden ser clasificados.

El análisis y la selección de variables es una cuestión muy tratada en las investigaciones relacionadas con el aprendizaje automático y a

la que cada vez se presta más atención en teledetección. En análisis de imágenes basado en objetos el número de variables explicativas con el que se cuenta es muy elevado, por lo que es posible que los resultados de una clasificación estadística achaquen lo que se ha denominado efecto *Hughes*. Para afrontar esta cuestión se proponen cuatro métodos de ordenación de variables y un proceso de búsqueda heurístico como estrategia para seleccionarlas. El método de ordenación que ofrece mejores resultados es el basado en el índice de *Gini*.

También se pone en práctica un sistema clasificador de tipo supervisado. Se emplean cinco algoritmos de clasificación tratando de que queden representados los enfoques más importantes en el campo de la clasificación de imágenes de teledetección: del ámbito de la estadística paramétrica se incluyen dos métodos de técnicas bayesianas, análisis discriminante lineal y *naive Bayes*; del ámbito de los árboles de decisión se utiliza el algoritmo *Random Forest*; de los métodos basados en *kernels* se prueban las máquinas de vectores soporte; y del ámbito de los métodos basados en la vecindad se aplica el método de *k*-vecinos más próximos ponderados. Finalmente se genera una clasificación por votos, obteniendo un índice *kappa* de 0,68.

Se concluye con un proceso de posclasificación, a la que se puede definir como la modificación de la clase asignada por alguno de los métodos anteriores, atendiendo a diversos criterios como la clase asignada previamente; las características que posean los objetos; o la posición con respecto a otros objetos. Al aplicar los procesos de posclasificación se aumenta la exactitud de la cartografía temática cuatro puntos porcentuales, alcanzando un índice *kappa* de 0,72, además se reduce notablemente la existencia de incoherencias contextuales, muy frecuentes si únicamente se realiza una clasificación estadística.

Tesis doctoral

Assessment of passive optical remote sensing for mapping macroalgae communities on the galician coast

Autor: Gema Casal Pascual (gcasal@udc.es)

Director: Juan Freire

Lugar: Grupo de Recursos Marinos y Pesquerías, Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña

Fecha: Octubre de 2012

Calificación: Apto *Cum Laude*

Resumen

Las zonas costeras representan la transición entre el ambiente terrestre y el acuático siendo uno de los ecosistemas más dinámicos y productivos de la Tierra. Las comunidades de algas bentónicas juegan un papel clave en los ecosistemas costeros debido a sus funciones ecológicas. Debido a su importancia ecológica y económica, son necesarios métodos que permitan reunir información cualitativa y cuantitativa sobre estas comunidades para su eficiente valoración, seguimiento y gestión.

La teledetección se ha aplicado en muchas partes del mundo para el cartografiado de las comunidades de algas en una gran variedad de condiciones ambientales. Existen estudios que para tal fin utilizan una gran variedad de sensores multispectrales e hiperspectrales así como modelos bio-ópticos. En España el uso de técnicas de teledetección en la zona terrestre está bien reconocido, sin embargo el número de estudios aplicados a la zona costera y especialmente al cartografiado de hábitats bentónicos someros decrece considerablemente. Por esta razón las referencias científicas relacionadas con estas aplicaciones son escasas. Entre ellas podemos mencionar los estudios realizados por Fornes *et al.* (2006) quienes cartografiaron *Posidonia oceanica* utilizando el sensor multispectral IKONOS, Méndez *et al.*

(2011) que cartografiaron *P. oceanica* y *Cymodocea nodosa* utilizando los sensores hiperspectrales CASI y CHRIS o el estudio llevado a cabo por Chust *et al.* (2010) utilizando LIDAR para el cartografiado de hábitats costeros en un estuario Vasco.

En Galicia la escasez de estudios relacionados con el cartografiado bentónico utilizando teledetección es más acusado que a nivel nacional. Algunos de los estudios realizados en la zona costera están relacionados con el seguimiento de mareas rojas (e.g. Mosquera *et al.*, 2006), vertidos (e.g. Torres-Palenzuela *et al.* 2006) o fenómenos de afloramiento (e.g. Spyarakos *et al.*, 2011) a escala regional. Sin embargo, la única referencia encontrada en relación al cartografiado bentónico fue el estudio llevado a cabo por Catoira *et al.* en 1993. Estos autores realizaron un trabajo preliminar utilizando imágenes multispectrales Landsat 5TM sin obtener resultados significantes. Por esta razón, el trabajo realizado en esta tesis abre una nueva línea de investigación en la costa gallega en relación a la utilización de este tipo de técnicas aplicadas al cartografiado bentónico.

Durante la realización de esta tesis se valoraron sensores de teledetección pasivos multispectrales (SPOT-4), hiperspectrales espaciales (CHRIS-Proba) y aeroportados (AHS y CASI-2) para el estudio de comunidades de al-

gas. Además, los resultados obtenidos contribuyen a la generación de datos espaciales referentes a las algas presentes en el litoral gallego.

El satélite multiespectral SPOT-4 mostró resultados positivos en la detección de la presencia de comunidades de algas pardas hasta 10 m de profundidad. Sin embargo, la relativamente baja resolución espacial y espectral no permitió diferenciar grupos de algas (verdes, pardas y rojas) entre sí. Este satélite presenta cuatro bandas espectrales y sólo las dos primeras XS1 (500-590 nm) y XS2 (610-680 nm) son útiles en la detección de sustratos sumergidos debido a la absorción de longitudes de onda infrarrojas por la columna de agua. Por otra parte, su resolución espacial permite solamente detectar asentamientos homogéneos de algas mayores a su tamaño de píxel (20 m). Por estas razones, este satélite ha sido utilizado con éxito para el cartografiado de asentamientos homogéneos de algas de gran tamaño (e.g. Augenstein *et al.*, 1991; Chauvaud *et al.*, 2001; Pascualini *et al.*, 2005 o Torrusio, 2009). En la costa gallega, existen algunas especies de algas pardas que pueden formar grandes asentamientos homogéneos tales como *Laminaria* spp., *Cystoseira baccata* o *Sargassum muticum* y detectables por el satélite SPOT-4. A pesar de su baja resolución espectral y media resolución espacial, cada imagen puede cubrir 60x60 km. Por esta razón, este sensor puede ser utilizado en estudios a escalas regionales.

Por otra parte, el sensor hiperespectral CHRIS-Proba presenta 18 bandas espectrales que comprenden un rango espectral entre 411 y 1019 nm, 17 m de tamaño de píxel y un *swath* de 13 × 13 km. Sus características espectrales mejoran la capacidad de diferenciación entre grupos de algas en comparación con las obtenidas por el satélite SPOT-4. Sin embargo, durante el desarrollo de este trabajo se observó que después de la corrección atmosférica algunas de las bandas presentaron valores anómalos y éstas no fueron incluidas en el análisis. La dificultad de procesar los datos CHRIS a nivel 2 ha sido mencionado por otros autores tales como Alonso *et al.* (2009) debido probablemente a su naturaleza experimental. Comparando la configuración espectral de CHRIS modo 2 y MERIS se observa que el sensor

CHRIS tiene 14 bandas espectrales entre 400 y 750 nm mientras que MERIS solamente presenta 9 bandas. Estudios previos utilizando MERIS demostraron el éxito de este sensor en la diferenciación de algas verdes, pardas y rojas (Kutser *et al.*, 2006a). Una mejor resolución espectral y espacial hace esperar que el sensor CHRIS sea más apropiado que MERIS en el cartografiado de las comunidades algales. Sin embargo, en este estudio los valores anómalos en algunas bandas de CHRIS no permitieron el máximo aprovechamiento de sus capacidades espectrales. Esta asunción es también confirmada en el estudio realizado por Pauly *et al.* (2011) quienes cartografiaron algas verdes, pardas y rojas en regiones intermareales y de aguas poco profundas.

CHRIS Proba presenta capacidad para la toma de imágenes multiangulares que ha sido utilizada de forma exitosa en estudios terrestres (Begiebing y Bach, 2004; Sykioti *et al.*, 2011) y es especialmente efectivo en terrenos con diferente pendiente. Las imágenes multiangulares fueron también utilizadas para estudios de calidad de agua (Van Mol y Ruddik, 2004; Ruiz-Verdú *et al.*, 2005) donde se estudiaron parámetros de la superficie del agua. Sin embargo, la capacidad multiangular de CHRIS-Proba no es una ventaja en el caso del cartografiado bentónico. Con ángulos diferentes al nadir, la luz tiene que viajar más distancia en la columna de agua. Diferentes estudios (Vahtmäe *et al.* 2006; Kutser *et al.* 2006b) muestran que pequeñas variaciones de profundidad (la distancia que la luz tiene que viajar hacia y desde el sustrato) tienen un impacto importante sobre la posibilidad de reconocer los diferentes tipos de fondo. Además los ángulos, diferentes del nadir, pueden incrementar la cantidad de *sun glint* y *sky glint*. Pauly *et al.* (2011) y Méndez *et al.* (2011), las únicas referencias encontradas en relación al cartografiado de fondos costeros utilizando el sensor CHRIS, también excluyeron estas imágenes angulares de sus estudios. Por lo tanto, el sensor CHRIS-Proba presenta una ventaja en la diferenciación de los grupos macroalgales respecto a sensores multiespectrales como el HRVIR de SPOT-4. Sin embargo, la cobertura de cada imagen es mucho menor implicando una limitación en el cartografiado a escalas regionales. No obstante, los análisis rea-

lizados en esta tesis muestran que la resolución espacial de CHRIS no es suficiente para cartografiar en detalle los diferentes grupos de algas (verdes, pardas y rojas) en la costa gallega, debido a que la cobertura bentónica en esta zona es bastante heterogénea.

La valoración de sensores hiperespectrales para el cartografiado de comunidades algas bentónicas fue realizada utilizando métodos basados en imágenes así como métodos físicos. Los resultados obtenidos muestran que el sensor AHS es capaz de separar los tres tipos de grupos de algas cuando están emergidos. Sin embargo, cuando las algas se encuentran sumergidas la diferenciación entre algas pardas y rojas no es posible. Utilizando el modelo bioóptico desarrollado por Maritorena *et al.* (1994) para valorar las imágenes CASI-2, se observaron mejores resultados que los obtenidos para el sensor AHS. Utilizando este sensor se pudieron separar los tres grupos de algas hasta una profundidad de 4 m. Esto puede explicarse debido a la posición de las diferentes bandas espectrales en ambos sensores así como al ruido presente en las imágenes AHS. Como fue mencionado por Mumby *et al.* (1997) los sensores aeroportados presentan mayor resolución espacial y espectral que los sensores satelitales, proporcionando una mayor información espectral sobre objetivos puros, y así mayor precisión en el cartografiado detallado de hábitats. La resolución espacial del sensor AHS y CASI-2 es de alrededor de 2 m y el *swath* (varios metros) es también mucho menor que el presente en satélites. Estas características permiten el cartografiado detallado de hábitats bentónicos poco profundos a escalas locales.

Después del trabajo realizado en esta tesis, si tuviéramos que recomendar un sensor para el estudio de las comunidades de algas en la costa gallega, podríamos decir que la mejor elección dependerá de los objetivos específicos de cada estudio. En esta tesis se demostró que satélites multiespectrales como SPOT-4 o incluso sensores hiperespectrales espaciales como CHRIS-Proba pueden ser útiles en el cartografiado de comunidades de macroalgas a una escala regional sin demasiado detalle. Los sensores multiespectrales podrían ser de utilidad en la realización de estudios retrospectivos así como en la monitorización de estas co-

munidades en el futuro debido a la elevada cantidad de datos de archivo y su periodo de revisión. Por otra parte, para estudios más detallados se necesita una mayor resolución espacial y espectral. En el caso de la costa gallega la resolución espacial es considerada prioritaria al igual que afirmaron Vahtmäe y Kutser (2007). Además, todas estas valoraciones deberían ser realizadas teniendo en cuenta el presupuesto disponible. Algunas iniciativas como por ejemplo *Third-Party Missions* o el Programa *EU-FAR* permiten a la comunidad científica el acceso a imágenes remotas de forma gratuita o a coste de reproducción. En otros casos, la adquisición de este tipo de información puede resultar prohibitiva especialmente en imágenes de elevada resolución.

A pesar del elevado potencial de las técnicas de teledetección y su combinación con Sistemas de Información Geográfica (SIG) debería de tenerse en cuenta que los mapas resultantes son una imagen instantánea en el tiempo y la fiabilidad de su representación en cualquier momento posterior dependerá del grado de variabilidad natural presente en el área representada en el mapa (MESH, 2008). Para investigar y gestionar eficientemente los hábitats bentónicos es necesario una continua actualización de los datos. Por esta razón, la interoperabilidad y la promoción de colaboración así como el compartir información entre usuarios serían una buena opción en el estudio de hábitats bentónicos poco profundos. En los últimos años esta tendencia está ganando importancia y nuevas iniciativas *Free-Libre Open Source Software* están apareciendo debido a que garantizan la interoperabilidad a largo plazo de manera sostenible. Algunos ejemplos que podrían ser mencionados aquí serían *MapServer* que es una plataforma *Open Source* para la publicación de datos espaciales y aplicaciones de cartografiado interactivo en la web. Proyectos importantes como *MESH (Mapping European Seabeds Habitats)* han apostado por esta plataforma para publicar sus datos. Haciendo un esfuerzo adicional por compartir los datos en internet se expandirían de forma importante los recursos disponibles para los usuarios finales ayudando así a una mejor gestión de las actividades humanas y promoviendo un desarrollo sostenible.

Además, durante los últimos años se han lanzado nuevos satélites tales como WorldView-2, Formosat-2 o Rapid-eye que mejoran las características técnicas de los ya operativos. Este desarrollo tecnológico parece continuar en el futuro debido a que se espera el lanzamiento de nuevos satélites. Por esta razón, las posibilidades que podrá ofrecer el cartografiado de hábitats bentónicos poco profundos y su nivel de detalle, a día de hoy, es impredecible.

Referencias

- ALONSO, L., GÓMEZ-CHOVA, L., MORENO, J., GUANTER, L., BROCKMANN, C., FOMFERRA, N., QUAST, R., & REGNER, P. 2009. CHRIS/PROBA Toolbox for hyperspectral and multiangular data exploitations. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, IGARSS 2009.
- AUGENSTEIN, E. W., STOW, D.A., & HOPE, A. S. 1991. Evaluation of SPOT HRV-XS data for kelp resource inventories. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 57:501-509.
- BEGIEBING, S., & BACH, H. 2004. Analyses of hyperspectral and directional CHRIS data for agricultural monitoring using a canopy reflectance. Proc. of the 2nd CHRIS-Proba Workshop, Frascati, Italy.
- CATOIRA, J. L., SOLÓRZANO, F., SERRANO, F., CARRASCAL, J. L., VELEIRO, M. J., LÓPEZ, E., DE URRUTIA, J. M., ACUÑA, R., DURÁN, C., ALCALDE, A., FERNÁNDEZ, M., FRANCESCH, O., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, P., FERNÁNDEZ, P., & PÉREZ, J. L. 1993. Prospección, análisis y cartografía de microalgas y erizo de mar en el litoral de Galicia. Consellería de Pesca. Dirección Xeral de Pesca, Marisqueo e Acuicultura.
- CHAUVAUD, S., BOUCHON, C., & MANIÈRE, R. 2001. Cartographie des biocénoses marines de Guadeloupe á partir de données SPOT (récifs coralliens, phanérogames marines, mangroves). *Oceanologica Acta*, 24(1): 3-16.
- CHUST, G., GRANDE, M., GALPARSORO, I., URIARTE, A., & BORJA, A. 2010. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89: 200-213.
- FORNES, A., BASTERRETXEA, G., ORFILA, A., JORDI, A., ÁLVAREZ, A., & TINTORE, J. 2006. Mapping *Posidonia oceanica* from IKONOS. *ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 315-322.
- KUTSER, T., MILLER, I., & JUPP, D. L. B. 2006b. Mapping coral reef benthic substrates using hyperspectral space-borne images and spectral libraries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70: 449-460.
- KUTSER, T., VAHTMÄE, E., & MARTIN, G. 2006a. Assessing suitability of multispectral satellites for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters by means of model simulations. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 67: 521-529.
- MARITORENA, S., MOREL, A., & GENTIL, B. 1994. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters. Influence of water depth and bottom albedo. *Limnology and Oceanography*, 39(7):1689-1703.
- MÉNDEZ, E., CABELLO, A., FRIEYRO, J. E., HAYAS, A., GRANADO, L., MONTOYA, G., PINO, I., & DOMÍNGUEZ, J. A. 2011. Desarrollo de una metodología para la caracterización de praderas de fanerógamas marinas en el litoral andaluz mediante técnicas de teledetección con sensores hiperespectrales. *Revista de Teledetección*, 36: 73-83.
- MESH (Mapping European Seabed Habitats). 2008. The MESH Blue Book. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, UK.
- MOSQUERA, A., TORRES, J. M., GONZÁLEZ-VILAS, L., MARTÍNEZ-IGLESIAS, G., & PAZOS, Y. 2006. Estudio de una floración tóxica de *Pseudonitzschia ssp.* en las costas de Galicia usando una imagen MERIS y datos in situ. *Revista de Teledetección*, Número Especial: 75-79.
- MUMBY, P. J., GREEN, E. P., EDWARDS, A. J., & CLARK, C. D. 1997. Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide? *Marine Biology*, 130:193-202.
- PASQUALINI, V., PERGENT-MARTINI, C., PERGENT, G., AGREIL, M., SKOUFAS, G., SOURBES, L., & TSIRIKA, A. 2005. Use of SPOT-5 for mapping seagrasses: an application to *Posidonia oceanica*. *Remote Sensing of Environment*, 94 (1): 39-45.
- PAULY, K., GOOSSENS, R., & DE CLERCK, O. 2011. Mapping coral-algal dynamics in a seasonal upwelling area using spaceborne high resolution sensors, in: Pauly, K. (2011). GIS-based environmental analysis, remote sensing and niche modeling of seaweed communities. pp. 149-168.
- RUIZ-VERDÚ, A., DOMÍNGUEZ-GÓMEZ, J. A., & PEÑA-MARTÍNEZ, R. 2005. User of CHRIS for monitoring water quality in Rosarito reservoir. Proc. Of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21-23 March, ESRIN, Frascati, Italy, (ESA SP-593, June 2005).
- SPYRAKOS, E., GONZÁLEZ-VILAS, L., TORRES-PALENZUELA, J. M., & DESMOND-BARTON, E. 2011. Remote sensing chlorophyll a of optically complex waters (Rías Baixas, NW

- Spain): Application of a regionally specific chlorophyll a algorithm for MERIS full resolution data during an upwelling cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115 (10): 2471-2485.
- SYKIOTI, O., PARONIS, D., STAGAKIS, S., & KYPARISSIS, A. 2011. Band depth analysis of CHRIS/PROBA data for the study of a Mediterranean natural ecosystem. Correlations with leaf optical properties and ecophysiological parameters. *Remote Sensing of Environment*, 115: 752-766.
- TORRES-PALENZUELA, J. M., VILAS, L. G., & CUADRADO, M. S. 2006. Use of ASAR images to study the evolution of the Prestige oil spill off the Galician coast. *International Journal of Remote Sensing*, 27 :1931-1950.
- TORRUSIO, S. 2009. Mapping Marine Macrophytes along the Atlantic Coast of Tierra Del Fuego (Argentina) by Remote Sensing. In. Yang, X. (2009). Remote sensing and geospatial technologies for coastal ecosystem assessment and management. Ed. Xiaojun Yang. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 279-293.
- VAHTMÄE E., KUSTER T., MARTIN G., & KOTTA J. 2006. Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping macroalgal cover in turbid coastal waters- a Baltic Sea case study. *Remote Sensing of Environment*, 101: 342-351.
- VAN MOL, B., & RUDDICK, K. 2004. The Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS): the future of hyperspectral satellite sensors. Imagery of Oostende coastal and inland waters. Airborne Imaging Spectroscopy Workshop, 8 October 2004, Bruges.
- VATHMÄE, E., & KUTSER, T. 2007. Mapping bottom type and water depth in shallow coastal waters with satellite remote sensing. *Journal of Coastal Research*, 50: 185-189.

Revista de Teledetección

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN

Nº 38

DICIEMBRE 2012

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Estudio de la dependencia angular de la emisividad de los suelos sin vegetación en el infrarrojo térmico.

V. García-Santos, E. Valor, V. Caselles, M. A. Burgos y C. Coll

Caracterización multiescala de objetos como herramienta para la clasificación de imágenes de alta resolución espacial.

C. Gonzalo-Martín y M. Lillo-Saavedra

Análisis de la respuesta de la temperatura de superficie al crecimiento urbano utilizando series temporales MODIS.

L. Paolini

Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección.

C. Mattar, A. Santamaría-Artigas y C. Durán-Alarcón

Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009).

C. Giner, B. Martínez, M. A. Gilabert y D. Alcaraz-Segura

Propuesta metodológica para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe: estado de situación y avances.

P. Blanco, G. López Saldaña, R. Colditz, L. Hardtke, N. Mari, A. Fischer, C. Caride, P. Aceñolaiza, H. del Valle, S. Opazo, W. Sione, M. Lillo-Saavedra, P. Zamboni, I. Cruz López, J. Anaya, F. Morelli y S. de Jesús

Validación del método de Nanni y Dematte para obtener mapas de propiedades del suelo en una isla del Danubio.

E. Caselles, C. Pitarch y V. Caselles

CASOS PRÁCTICOS

Contribution to the management of the sensitive spaces by the geographical information systems and remote sensing: the case of the basin of the Gharb (Morocco).

A. Amrani, M. El Wartiti, M. Zahraoui, A. Calle and J-L. Casanova

Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú.

E. García y M. A. Lleellish

Síntesis de la evolución histórica de la teledetección en España (1889-2012).

G. Casal y J. Freire

TESIS DOCTORAL: Análisis de la estructura de una población de Piruétano (*Pyrus bourgaeana*) basado en técnicas de teledetección y SIG

TESIS DOCTORAL: Análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) y aprendizaje automático para la obtención de mapas de coberturas del suelo a partir de imágenes de muy alta resolución espacial. Aplicación en la Unidad de Demanda Agraria n.º 28, Cabecera del Argos

TESIS DOCTORAL: Assessment of passive optical remote sensing for mapping macroalgae communities on the galician coast