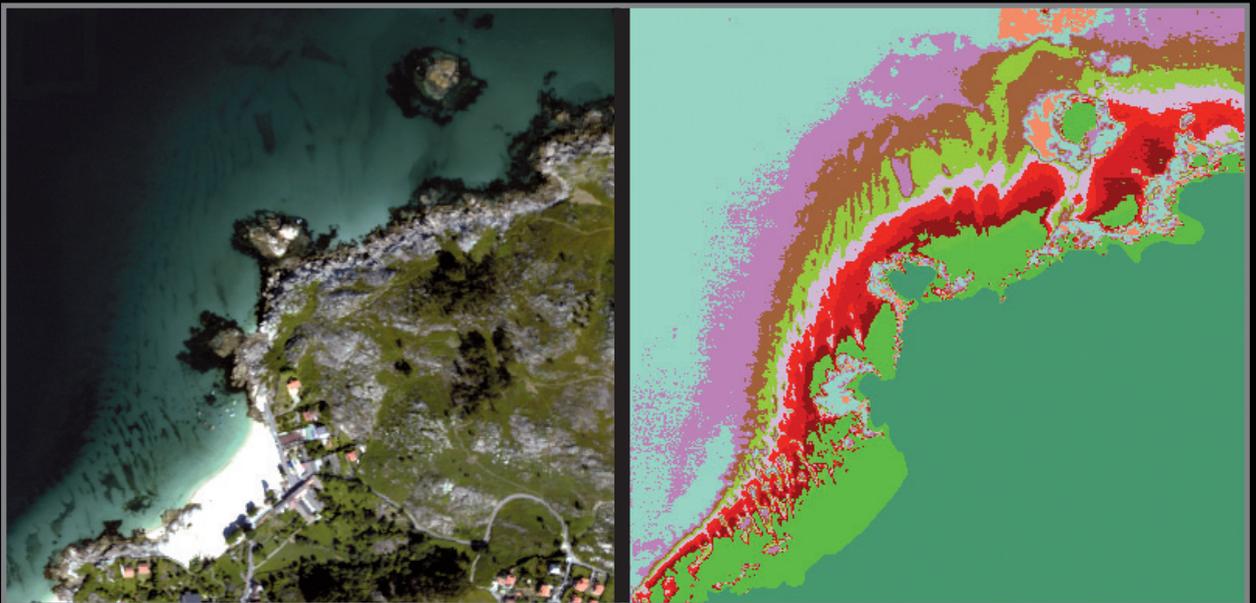


Revista de Teledetección

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

• Comparación de la temperatura de la superficie del mar calculada a partir de datos AVHRR y MODIS. <i>C. Robles-González, N. López Gordillo, A. Fernández-Renau, A. García-Sevilla y J. Santana-Suárez.....</i>	5
• Utilización del sensor de imagen Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) para la cartografía de bosques de <i>Sargassum muticum</i> en la Ría de Vigo (Galicia). <i>G. Casal, J. A. Domínguez, N. Sánchez-Carnero y J. Freire.....</i>	17
• Evaluación de distintos métodos de medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico. <i>V. García Santos, E. Valor, M. Mira, C. Coll, J. M. Galve y V. Caselles.....</i>	23
• Efecto de la atmósfera en la resolución óptica de la Z/I Digital Mapping Camera. <i>L. Martínez, M. E. Soler, F. Pérez y R. Arbiol.....</i>	32
• Delimitación de zonas forestales afectadas por vendaval mediante fotogrametría. <i>R. Riera.....</i>	41
• Airborne soil moisture determination at regional level: a data fusion mission approach for Catalan territory. <i>F. Martín, J. Corbera, J. F. Marchan, A. Camps y A. Aguasca.....</i>	47
• Aplicación de técnicas de teledetección y GIS sobre imágenes quickbird para identificar y mapear individuos de peral silvestre (<i>Pyrus bourgeana</i>) en bosque esclerófilo mediterráneo. <i>S. Arenas, J. F. Haeger y D. Jordano.....</i>	55
• Estimación de la reflectividad superficial mediante datos del sensor aéreo AHS y comparación con el producto MODIS en la campaña CEFLES2. <i>J. A. Sobrino y B. French.....</i>	72

CASOS PRÁCTICOS

• Aplicación de técnicas de teledetección para la gestión y control del pago de ayudas agrícolas en España. <i>J. M. Vidal Serrano.....</i>	80
• A MODIS generated land cover mapping of Honduras: a base-line layout to create a national monitoring center. <i>S. Rivera, J. L. Lowry, A. J. Hernández, R. Douglas Ramsey, R. Lezama y M. Velázquez.....</i>	94
• ¿QUIÉN ES QUIÉN?: La Unidad de Observación del Territorio del Instituto Geográfico Nacional.....	109
• TESIS DOCTORAL: Estimación de parámetros térmicos mediante datos de alta frecuencia temporal: aplicación al sensor MSG2/SEVIRI.....	112

Director

José Antonio SOBRINO

Dep. de Física de la Terra 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 Terra 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. jcmj@uv.es

Consejo de Redacción

Carlos GARCÍA-SOTO. Instituto Español de Oceanografía (IEO).

Pablo J. ZARCO-TEJADA. Instituto de Agricultura Sostenible (IAS)-CSIC. Córdoba.

Juan DE LA RIVA. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.

Vicente CASELLES. Universidad de Valencia. Valencia.

Santiago CASTAÑO FERNÁNDEZ. Universidad Complutense. Madrid.

Jordi FONT. Institut de Ciències del Mar (CSIC). Barcelona.

Graciela Isabel METTERNICHT. Universidad de Australia del Sur (Adelaide).

Alfredo R. HUETE. Universidad de Arizona.

Carlos M. DI BELLA. CIRN-INTA Castelar y Universidad de Buenos Aires. 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. LSIIT/TRIO. 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: FEDERICO GONZÁLEZ ALONSO. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA AGRARIA Y ALIMENTARIA (INIA). Departamento de Protección Forestal. Centro de Investigación Forestal. Carretera de la Coruña, km 7. 28040 Madrid. Tel.: 91 347 68 28. alonso@inia.es

Vicepresidente: ABEL CALLE MONTES. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Laboratorio de Teledetección LATUV. Edificio I+D. Paseo de Belén, 1. 47011 Valladolid. Tel.: 98 342 39 52. abel@latuv.uva.es

Secretario: JUAN JOSÉ PECES MORERA. INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. Servicio de Teledetección. C/ General Ibáñez Ibero, 3. 28003 Madrid. Tel.: 91 597 95 26. jjpeces@fomento.es

Tesorera: CONSUELO GONZALO MARTÍN. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos. Campus de Montegancedo Boadilla del Monte. 28660 Madrid. Tel.: 91 336 73 82. chelo@fi.upm.es

Vocal: SILVIA MERINO DE MIGUEL. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. UD Topografía. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid. Tel.: 91 336 76 68. silvia.merino@upm.es

Vocal: MARÍA DEL CARMEN RECONDO GONZÁLEZ. UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. C/ Gonzalo Gutierrez Quirós. 33600 Mieres. Tel.: 98 545 80 34. crecondo@etsimo.uniovi.es

Vocal: SALOMÓN MONTESINOS ARANDA. GEOSYS, SL. Sector Foresta, 23, locales 7 y 8. Tres Cantos. 28760 Madrid. Tel.: 91 279 72 32. Fax: 91 229 83 94. smontesinos@geosys.es

Foto portada: Detalle de la imagen resultado de la clasificación no supervisada *cluster k-means*. Imagen original (izquierda), y cluster con 20 clases (derecha) donde se aprecia el efecto de la profundidad en la clasificación, marcado por franjas de diferente coloración de tierra a mar

Editorial

Estimados socios y lectores,

En este número 35 de la Revista de Teledetección se publican un total de 8 artículos correspondientes a diversas temáticas, entre las que se encuentran la medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico, la delimitación de zonas forestales afectadas por vendaval mediante fotogrametría, la estimación de la temperatura del mar mediante datos AVHRR y MODIS, la identificación de peral silvestre mediante imágenes Quickbird, el efecto de la atmósfera en la resolución óptica de una cámara digital aerotransportada, la estimación de la humedad del suelo a nivel regional mediante sensores aerotransportados, la estimación de la reflectividad superficial a partir de datos del sensor aerotransportado AHS y su comparación con el producto MODIS, y la cartografía de bosques de *Sargassum muticum* en una ría de Vigo mediante datos AHS.

Este número incluye también la publicación de dos casos prácticos: «aplicación de técnicas de teledetección para la gestión y control del pago de ayudas agrícolas en España» y «A MODIS generated land cover mapping of Honduras: a base-line layout to create a National Monitoring Center».

La sección «¿Quién es quién?» corresponde a la *Unidad de Observación del Territorio (UOT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN)*, constituida en 2009 unificando en una estructura común los servicios de Teledetección, Fotogrametría, Levantamientos Topográficos, Ocupación del Suelo y Sensores Aerotransportados y Ortoproyección. Entre sus numerosas actividades destacan los tres Planes Nacionales: PNOA, PNT y SIOSE.

En «Reseñas de Tesis» se incluye una tesis doctoral desarrollada en el seno de la Unidad de Cambio Global (UCG) del Laboratorio de Procesado de Imágenes (IPL) perteneciente a la Universidad de Valencia, y dedicada a la estimación de parámetros térmicos mediante datos del sensor MSG2/SEVIRI.

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 *erevist@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.

Comparación de la temperatura de la superficie del mar calculada a partir de datos AVHRR y MODIS

C. Robles-González*, N. López Gordillo, A. Fernández-Renau,
A. García-Sevilla y J. Santana-Suárez

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. de Ajalvir, km 4. 28850 Torrejón de Ardoz

Resumen

Desde 1997, el programa CREPAD (Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de datos de Observación de la Tierra) del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) facilita gratuitamente el acceso a algunos de los productos de observación remota de la Tierra de baja resolución más demandados.

En el marco de este programa se ha realizado una comparación entre la temperatura superficial del mar (TSM) calculada con el software MATIAS (Mar Tierra Atmósfera Software) a partir de datos AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y la calculada con el software SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) a partir de datos MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sobre la zona de cobertura de la antena del Centro Espacial de Canarias (CEC). Para ello se han usado todas las imágenes AVHRR y MODIS de 2008 tomadas con menos de 4 horas de diferencia y en el rango de temperatura entre 10°C y 30°C. La comparación de TSM de AVHRR y de MODIS se ha realizado píxel a píxel, de esta comparación obtenemos una imagen diferencia de la que sacamos los datos estadísticos.

Se observó que los resultados menos favorables correspondían a comparaciones con pocos datos ya fuera por estar las imágenes muy escoradas, es decir, con ángulos de observación elevados o con muchas nubes. Los resultados por tanto se muestran en función del porcentaje de píxeles comparados respecto del total. Para aquellas imágenes en las que el porcentaje de píxeles comparados es mayor al 30% la diferencia media entre la TSM de AVHRR y de MODIS es de 0,1°C, la desviación típica es de 0,5 y la correlación entre las imágenes es de 0.90. En el 61% de los píxeles comparados la diferencia entre las TSM de ambas imágenes es menor a 0,5°C y en el 82% la diferencia es menor a 0,8°C.

Como en el área de cobertura de la antena hay zonas con muy distintas características en este estudio los datos se presentan detallados en unas zonas preestablecidas en CREPAD, estas son denominadas: África, Alborán, Atlántico, Azores, Canarias, Cantábrico y Mediterráneo.

Palabras clave: TSM, AVHRR, MODIS, CREPAD, ángulo cenital de observación.

Abstract

Inter-comparison of AVHRR and MODIS sea surface temperature

Since 1997, the INTA (National Institute for Aerospace Technology)-CREPAD (Centre for REception, Processing, Archiving and Dissemination of Earth Observation Data) program distributes freely some of the most demanded low-resolution remote sensing products.

In the frame of the CREPAD program a comparison between the SST (Sea Surface Temperature) computed with the MATIAS software from AVHRR data and the SST computed with SeaDAS from MODIS data has been done and is presented in this paper. Images over the finger print of the Canary Space Centre (Centro Espacial de Canarias, CEC) acquired in 2008 have been used in this study. Time acquisition difference between the images to be compared should be lower than 4 hours and the temperature range should be in between 10°C and 30°C.

In this study less favourable results are observed in images with few pixels compared. These images are usually cloudy images or images with the compared area falling in the edge of the image with high

* Autor para la correspondencia: crepadpa@inta.es

Recibido: 17-02-10; Aceptado: 04-04-11.

satellite zenith angle values. Therefore results have been studied related to the percentage of compared pixels in each image. Images with more than 30% pixels compared showed a mean SST difference of about 0.1°C, the standard deviation was 0.5 and the correlation between AVHRR and MODIS SST images was 0.90. The mean SST difference is lower than 0.5°C in 61% of the pixels and lower than 0.8% in 82% of the pixels.

The finger print of the CEC covers areas with different behaviour therefore results are shown over preselected CREPAD areas. Those areas are: Africa, Alborán Sea, Atlantic Ocean, Azores, Canaries, Cantábrico and Mediterranean Sea.

Key words: SST, AVHRR, MODIS, CREPAD, satellite zenith angle.

Introducción

La temperatura de la superficie del mar (TSM) es un parámetro que juega un papel fundamental en la comprensión de procesos tanto oceánicos como atmosféricos (Houghton *et al.*, 1990). El conocimiento de la temperatura de la superficie del mar es también una fuente importante de información en los estudios sobre cambio climático (Hutchison *et al.*, 1999; Donlon *et al.*, 2002). Para estudiar los flujos de energía entre el océano y la atmósfera y por supuesto también para conocer el balance radiativo global, entre la Tierra y el exterior es imprescindible conocer la temperatura de la superficie del mar. La TSM es también una importante herramienta para el estudio, conservación y explotación de recursos naturales.

La radiación que llega al sensor proveniente de la superficie del mar es atenuada por la atmósfera. Por tanto a la hora de calcular la TSM por medio de radiómetros a bordo de satélites hay que tener en cuenta este efecto. Vapor de agua, CO₂, CH₄ o aerosoles son algunos de los componentes atmosféricos que pueden influir en la radiación infrarroja que llega a los satélites. Para corregir dicho efecto se han desarrollado varios algoritmos a lo largo de las últimas décadas. Anding y Kauth (1970) observaron que la diferencia entre las temperaturas de brillo en dos bandas del infrarrojo era proporcional a la cantidad de corrección atmosférica necesaria. Diferentes algoritmos como los de Walton (1988), McClain *et al.* (1985), Barton *et al.* (1989) o Sobrino *et al.* (1993) entre otros, se han desarrollado desde entonces para calcular la TSM basándose en esta dependencia lineal. Posteriormente se desarrollaron algoritmos no lineales (Walton *et al.*,

1998) para zonas con altas concentraciones de vapor de agua o ángulos cenitales grandes.

A partir de medidas obtenidas por radiómetros a bordo de satélites se puede conocer este parámetro de forma global y regional. Sensores como el AVHRR a bordo de los satélites NOAA y MetOp o el MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua han demostrado su gran utilidad en este campo.

El proyecto CREPAD lleva desde 1997 calculando y proporcionando gratuitamente productos de observación de la Tierra obtenidos a partir de datos de AVHRR y más tarde de SeaWiFS y MODIS a usuarios científicos para aplicaciones medioambientales. En el caso de la TSM se obtiene a partir de datos AVHRR con un software propio de CREPAD denominado MATIAS (Mar, Tierra y Atmósfera Software) y que está basado en el algoritmo de McClain *et al.* (1985).

En un continuo esfuerzo por mantener y asegurar una buena calidad de sus productos, en CREPAD se ha validado la TSM calculada a partir de datos AVHRR comparándola tanto con medidas in situ de boyas como realizando una inter-comparación de las TSM calculadas a partir de datos AVHRR con la TSM derivada de datos MODIS obtenida con el software de libre distribución de la NASA SeaDAS (<http://seadas.gsfc.nasa.gov/>). Validaciones previas con datos in situ medidos por boyas de Puertos del Estado y por boyas de la NOAA han sido realizadas por Robles-González y Fernández-Renau (2006). Hay que tener en cuenta que en esta validación se compararon datos «bulk» medidos por la boya con datos «skin» que son los que se obtienen a partir de datos de sensores remotos. Tanto este estudio como otros estudios previos, por ejemplo Donlon *et al.* (2002), han demostrado que las diferencias

entre TSM_{skin} y TSM_{bulk} durante el día son significativas. Por tanto para complementar esta validación una comparación entre las TSM de los sensores remotos AVHRR y MODIS se ha llevado a cabo y se presenta en este artículo.

En la primera parte del artículo se dará una breve descripción de los dos sensores y de los algoritmos empleados para calcular la TSM a partir de datos del sensor AVHRR y del sensor MODIS. Posteriormente presentaremos la metodología de comparación, los resultados y las conclusiones de este trabajo.

Procesado de datos AVHRR

Características del sensor

El sensor AVHRR/3 a bordo de los satélites NOAA-17 y 18 es un espectro-radiómetro de banda ancha capaz de medir radiación en 3 canales en el visible e infrarrojo cercano (NIR, Near Infra Red) (0,63, 0,86, 1,6 μm) y otros 3 en el infrarrojo térmico (3,74, 11 y 12 μm). Solo 5 de ellos son adquiridos al mismo tiempo, los canales 3A (1,58-1,64 μm) y 3B (3,55-3,93 μm) se alternan de forma que el 3A mide durante el día y el 3B durante la noche.

El AVHRR tiene un campo de visión de $1,3 \times 1,3$ miliradianes que dan en la superficie una resolución espacial en el nadir de $1,09 \times 1,09$ km² y genera una imagen de 2.048 píxeles por línea. El ángulo de visión de cada línea abarca de $-55,4^\circ$ hasta $+55,4^\circ$ desde el nadir. Cuando este ángulo se mide con respecto a la normal a la superficie, que incluye la curvatura de la Tierra puede variar entre $\pm 65^\circ$.

Imágenes adquiridas

Hay tres tipos de transmisión de datos AVHRR desde el satélite a Tierra, HRPT (High Resolution Picture Transmission), LAC (Local Area Coverage) y GAC (Global Area Coverage). La transmisión de datos HRPT se realiza de forma continua, estos son los datos que se reciben en la Estación Espacial de Canarias y son los que proporciona el programa CREPAD. Los datos LAC se almacenan a bordo y se envían a tierra posteriormente. Los datos GAC se

obtienen a partir de los LAC promediando valores muestreados.

Actualmente CREPAD genera datos de valor añadido derivados del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA-17 y NOAA-18 a partir del formato L1B ESA-Sharp y dispone de un archivo de datos procesados de los satélites NOAA-14, 15 y 16. El nivel L1B ESA-Sharp contiene datos auxiliares y parámetros radiométricos.

Algoritmos

Uno de los pasos previos a la obtención de productos es la georreferenciación de las imágenes. Esta se lleva a cabo siguiendo los protocolos de georreferenciación de CREPAD. Para ello se utilizan, en primera instancia, datos orbitales y un conjunto de tie points, dando como resultado una sub-escena de la imagen que corresponde con la zona considerada. Posteriormente, los datos pasan por dos funciones propias de IDL, la primera, llamada «Triangulate», que genera una triangulación del tipo Delaunay y la segunda denominada «Trigid» que devuelve una rejilla regular de valores interpolados.

Es necesario también reconocer y eliminar los píxeles que contengan nubes ya que las nubes pueden falsear los resultados. Para eliminar los píxeles nubosos, en el marco del programa CREPAD se ha desarrollado un algoritmo de detección basado en Saunders and Kriebel (1998). Este algoritmo se basa en cuatro tests. En este procedimiento el píxel es considerado como nuboso si cualquiera de los 4 test da positivo. En este proceso se eliminan los píxeles más brillantes o más fríos que un valor límite prefijado, si el cociente entre los canales 1 y 2 está entre 0,9 y 1,3 o si la homogeneidad espacial sobre el océano es mayor que un valor límite. En el caso de la temperatura el valor límite es seleccionado automáticamente y varía dependiendo de la zona y fecha de adquisición de la imagen.

Una vez enmascarados los píxeles contaminados con nubes, MATIAS proporciona datos de TSM basándose en el algoritmo de McClain et al (1985) que usa la siguiente ecuación:

$$TSM = B_{11}(T_{11}) + B_2(T_{11} - T_{12}) + B_3(T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1)B_4 \quad [1]$$

Tabla 1. Coeficientes de la ecuación para el cálculo de la TSM

	B_1	B_2	B_3	B_4
NOAA-17	0,992818	2,49916	0,915103	271,206
NOAA-18	1,008410	2,23459	0,736946	276,075

donde T_{11} y T_{12} son las temperaturas de brillo de los canales 11 y 12 μm en Kelvin; TSM es la temperatura de la superficie del mar en grados centígrados; θ es el ángulo cenital del satélite y B_1 - B_4 son coeficientes globales proporcionados por la NOAA/NESDIS (National Environmental Satellite, Data and Information Service) que se pueden encontrar en <http://noaa-aasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/sst.html> y que se muestran en la Tabla 1.

Procesado de datos MODIS

Características del sensor

MODIS es un instrumento que viaja a bordo de los satélites TERRA y AQUA de la NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). TERRA viaja en órbita descendente, cruzando el Ecuador por la mañana mientras que AQUA lleva una órbita ascendente y cruza el Ecuador por la tarde.

MODIS es un radiómetro con 36 bandas situadas entre 0,4 μm y 14,4 μm . La resolución espacial varía dependiendo de las bandas, dos de ellas tienen una resolución espacial de 250 m en el nadir, cinco de 500 m y las 29 restantes tienen una resolución de 1 km. MODIS tiene un espejo que rota $\pm 55^\circ$ generando imágenes de 2.330 km de ancho y proporciona una cobertura total de La Tierra cada uno o dos días. El ángulo cenital de observación medido con respecto a la normal a la superficie en el punto de observación varía entre $\pm 65^\circ$, al igual que en el caso de AVHRR.

Imágenes adquiridas

Los datos MODIS se procesan a partir del formato L0 utilizando el software SEADAS de libre distribución de la NASA. Este nivel 0 contiene datos en bruto recibidos en formato NA-

SA, mientras que el nivel 2 son productos de valor añadido que contienen calibración radiométrica y corrección geométrica.

Algoritmos

La descripción del algoritmo usado por SEADAS para calcular la TSM viene dada en http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/modis_sst/. Las ecuaciones usadas son:

Si $(T_{11} - T_{12}) \leq 0.5$

$$TSM = A_{00} + A_{01}(T_{11}) + A_{02}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{03}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

Si $(T_{11} - T_{12}) \geq 0.9$

$$TSM = A_{10} + A_{11}(T_{11}) + A_{12}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{13}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

Si $0.5 < (T_{11} - T_{12}) < 0.9$

$$TSMLO = A_{00} + A_{01}(T_{11}) + A_{02}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{03}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

$$TSMHI = A_{10} + A_{11}(T_{11}) + A_{12}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{13}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

$$TSM = TSMLO + ((T_{11} - T_{12}) - 0.5) / (0.9 - 0.5) (TSMHI - TSMLO)$$

En este caso las T_{11} y T_{12} son en grados centígrados y $BTSM$ es una temperatura base y los coeficientes A_{ij} son empíricos y pueden variar según la fecha y otros parámetros.

Comparación

Se ha realizado la comparación píxel a píxel de productos TSM de AVHRR y de MODIS. Para esta comparación se han usado archivos de imágenes AVHRR (NOAA17 y NOAA18) y MODIS (AQUA). El periodo de estudio comprende de 01/01/2008 a 31/12/2008. Se dispone de una o dos imágenes diarias MODIS frente a seis u ocho de AVHRR, por lo que se seleccionan aquellas imágenes de AVHRR que coincidan en fecha y área con la de MODIS, eligiendo aquella cuya diferencia horaria con el pase de MODIS sea el mínimo de entre todas las imágenes encontradas y nunca superior a 4 horas (IOCCG, 2000). Los pases cotejados estarán en la franja horaria de 12:00-16:00 horas. Además se eliminan los píxeles fuera del rango de temperatura entre 10°C-30°C.

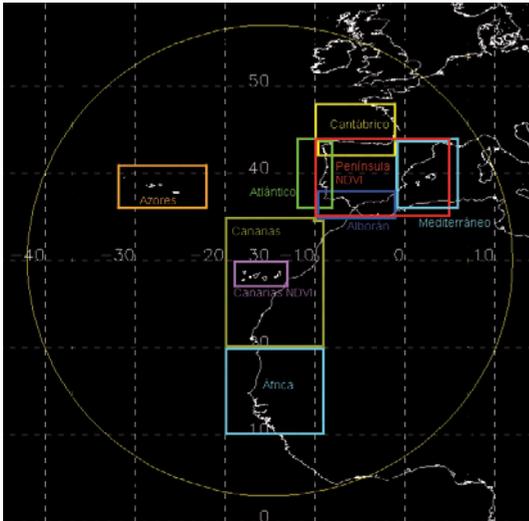


Figura 1. Zonas preseleccionadas sobre las que CREPAD proporciona imágenes.

Los productos TSM se generan sistemáticamente sobre unas zonas estándar preestablecidas en CREPAD. Éstas son: África, Alborán, Atlántico, Azores, Canarias, Cantábrico y Mediterráneo, ver Figura 1. En la Figura 1 se muestra con un círculo amarillo la cobertura de la antena del Centro Espacial de Canarias y con rectángulos de colores las zonas preseleccionadas por CREPAD. Debido a las diferentes características de cada una de estas zonas la comparación se ha hecho independientemente en cada una de ellas y por tanto los resultados se muestran por zonas. A pesar de esto también se incluyen los resultados totales de la comparación.

Resultados

Esta comparativa se ha llevado a cabo de dos formas distintas, primero un estudio general incluyendo todas las imágenes de 2008 que cumplieran los requisitos mencionados en el apartado anterior y el segundo más pormenorizado en el que se han seleccionado automáticamente imágenes que además de cumplir los requisitos tuvieran un porcentaje de píxeles comparados mayor al 30%. Los dos procesos se explican a continuación.

En la Figura 2a se presenta la temperatura media de las imágenes MODIS en el Eje X frente a la de las imágenes AVHRR (Eje Y). La línea continua negra representa la línea de ajuste de los puntos y su ecuación, en este caso el coeficiente de determinación R^2 del ajuste es de 0,947, la línea discontinua es la línea que seguiría el ajuste si este fuera perfecto y se muestra solo como referencia. En este gráfico se observa que en algunas de las zonas preseleccionadas la diferencia de temperaturas entre los datos de los sensores AVHRR y MODIS es mayor de 1°C y en algunos casos puede llegar a casi 8°C . Estudiando estas zonas una a una se vio que casi todos los casos eran imágenes en las que el área comparable cae en los extremos de la imagen, o imágenes con muchas nubes, siendo el número de píxeles usados en la comparación es muy bajo respecto del total de píxeles de la zona. Para eliminar estos resultados de baja calidad se ha estudiado la TSM, la diferencia de TSM, la desviación tí-

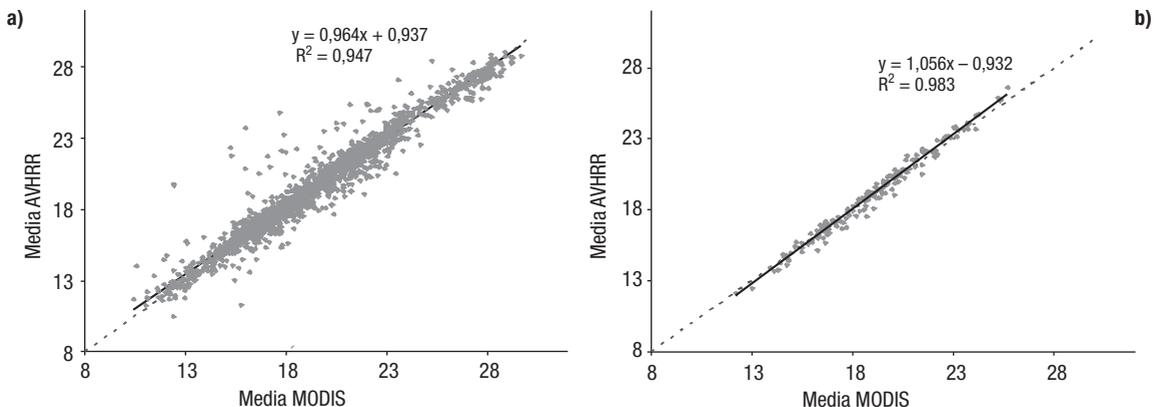


Figura 2. Gráfico de dispersión de puntos en el que se representa la temperatura media de las imágenes MODIS (Eje X) frente a la de las imágenes AVHRR (Eje Y). En la figura a) se presentan todos los puntos mientras que en la figura b) se presentan solo aquellos cuyo porcentaje de píxeles usados en la comparación es mayor al 30%. La línea continua es el ajuste y la línea discontinua es la que daría si el ajuste fuera perfecto.

pica y la correlación en función del porcentaje de píxeles usados en la comparación respecto del total. En la Figura 2b se muestra el mismo gráfico que el de la Figura 2a pero en este caso sólo se han representado las imágenes en las que el porcentaje de píxeles comparados es superior al 30% para eliminar automáticamente las imágenes de baja calidad. Además, este porcentaje permite un estudio estadístico robusto de los resultados al quedar un número suficientes de imágenes sin eliminar. En este caso vemos que la dispersión de los puntos es menor y que el R^2 del ajuste aumenta a 0,983. Este porcentaje ha sido seleccionado porque nos parece una cantidad de datos significativa y razonable a la vista de los resultados que se muestran en la Figura 3. En ella se muestran 8 gráficas en las que dicho porcentaje se representa en el eje X y en el eje Y se representa la media de las diferencias de la TSM (rombo azul), la desviación típica (cuadrado rosa) y la correlación (triángulo amarillo) para cada una de las 7 zonas preestablecidas (Fig. 3a-g) y otra para el total (Fig. 3h). En ellas se ve que cuanto mayor es el porcentaje de datos comparados menor es la diferencia de la TSM, menor también es la desviación típica mientras que la correlación aumenta, acercándose a 1. Es decir mejoran los resultados cuando seleccionamos imágenes con menor número de píxeles problemáticos, tales como píxeles nubosos o píxeles en los bordes de las nubes. En cambio, en las imágenes con porcentajes de píxeles comparados menor a 30% vemos que hay

mucha dispersión, variando los valores de casi cero hasta 4 para la desviación típica. Vemos también que en estos casos la correlación es muy variable pudiendo llegar a tomar valores negativos en algunos casos.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la comparación del año 2008 por zonas en las que el porcentaje de píxeles comparados es mayor a 30%. La columna «Media» presenta los datos de la diferencia media de TSM al restar las imágenes. La columna «Desv típica» presenta la desviación típica resultante y la columna «Correlación» muestra la relación entre las imágenes comparadas. Las dos últimas columnas presentan los porcentajes de datos dentro de un margen de error de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y $\pm 0,8^\circ\text{C}$ respecto al total de píxeles comparados. La columna N° Img muestra el número de imágenes usadas en la comparación.

En la tabla vemos como los valores medios varían entre $0,1^\circ\text{C}$ en la zona de Alborán, Atlántico y Canarias hasta $0,3^\circ\text{C}$ en la zona del Mediterráneo. La desviación típica varía entre 0,4 y 0,5 y la correlación va desde 0,86 en la zona de Azores hasta 0,93 en el Mediterráneo.

Dos ejemplos de imágenes con alto porcentaje de datos comparados que han dado excelentes resultados se muestran en la Figura 4. En ella se muestra la TSM en la zona del mar Atlántico el 6 de marzo de 2008, en la Figura 4a se presenta la imagen de AVHRR y en la Figura 4b la de MODIS. La diferencia horaria entre los pases de NOAA y AQUA es de 44 minutos, la diferencia de TSM entre los dos sensores es de

Tabla 2. Estadísticas básicas para la comparación entre TSM obtenida a partir de datos AVHRR y la obtenida para datos MODIS para las distintas zonas preestablecidas en el Proyecto CREPAD. Sólo se han usado las zonas en las que el porcentaje de píxeles comparables es mayor a 30%. En la tabla se muestra la Media, Desviación Típica y la Correlación. Las dos últimas columnas presentan los porcentajes de datos en los que la diferencia de TSM está dentro de un margen de error de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y $\pm 0,8^\circ\text{C}$ respecto al total de píxeles comparados. La columna N° Img muestra el número de imágenes usadas en la comparación

	Media	Desv típica	Correlación	0,50%	0,80%	N° Img
África	—	—	—	—	—	—
Alborán	-0,1	0,5	0,89	69,0	85,4	29
Atlántico	-0,1	0,5	0,91	60,8	81,3	61
Azores	-0,4	0,5	0,86	49,7	74,9	35
Canarias	-0,1	0,4	0,91	72,2	90,3	10
Cantábrico	-0,2	0,4	0,92	62,2	83,6	14
Mediterráneo	-0,3	0,4	0,93	63,9	83,0	16
Total	-0,1	0,5	0,90	61,0	81,5	165

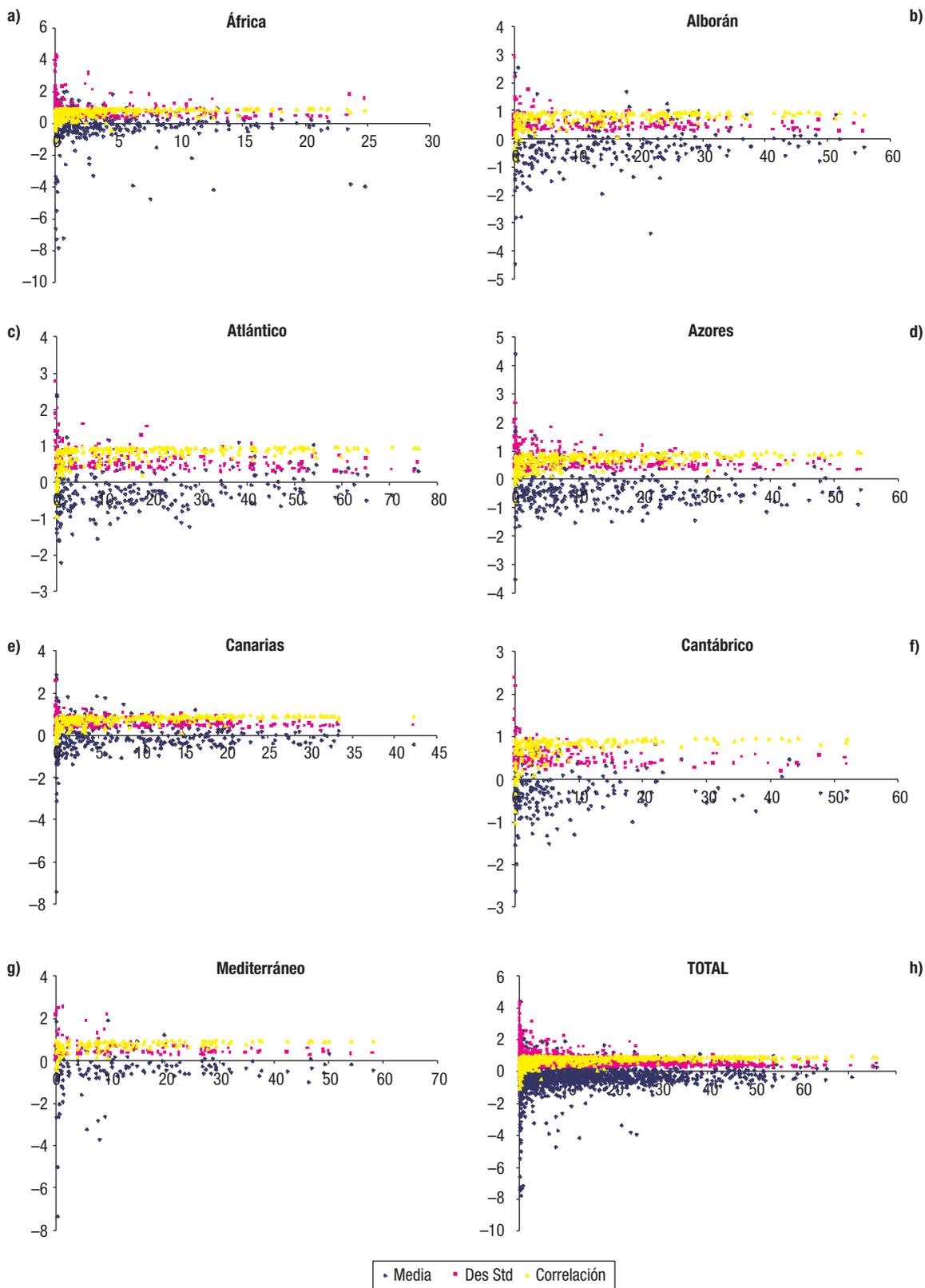


Figura 3. Gráficos de la diferencia media de las temperaturas, la desviación típica y la correlación en función del porcentaje de píxeles usados en la comparación para cada zona: a) África, b) Alborán, c) Atlántico, d) Azores, e) Canarias, f) Cantábrico, g) Mediterráneo y h) total.

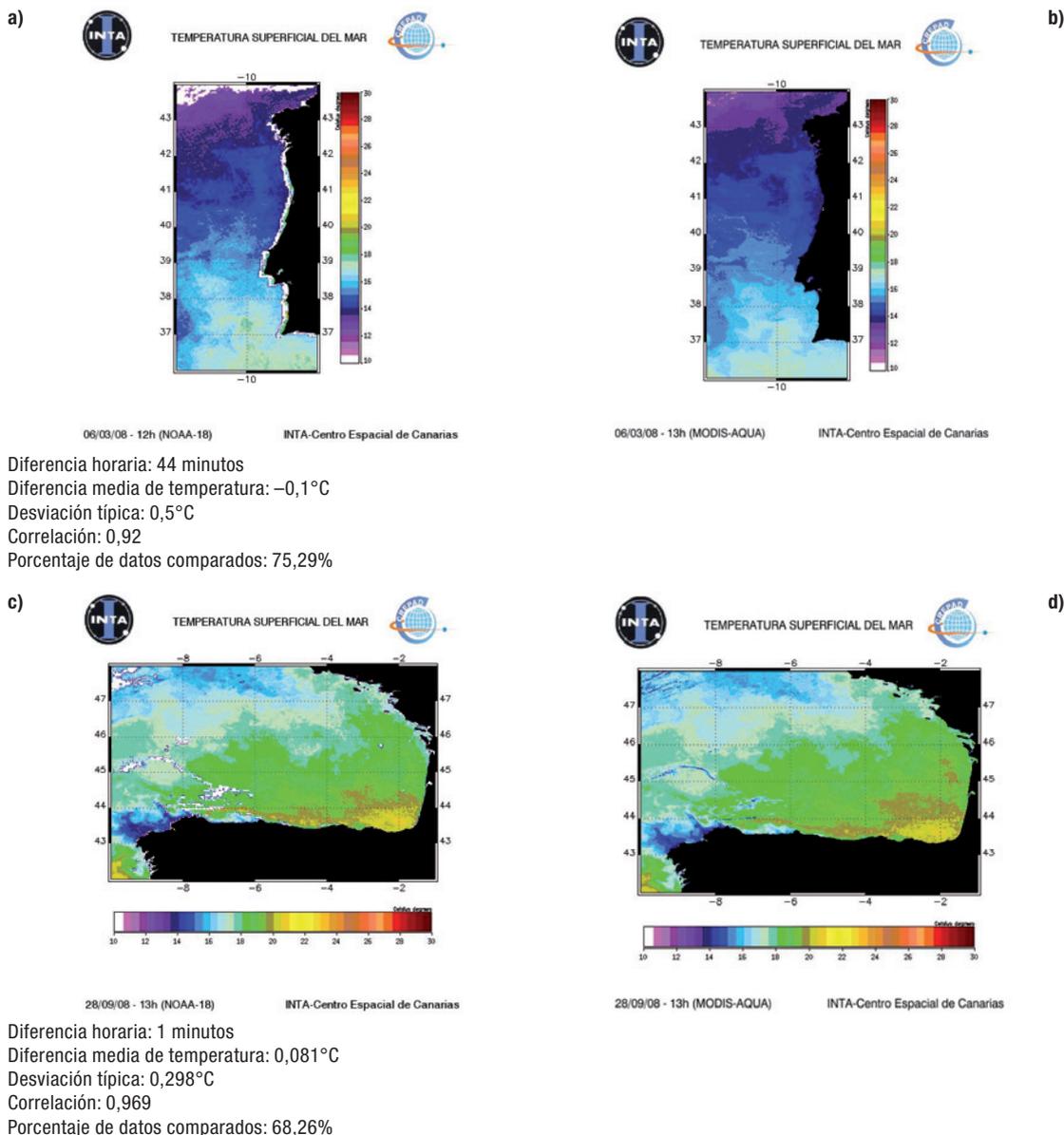


Figura 4. Comparación de imágenes con alto porcentaje de píxeles y por tanto pocas nubes. Las figuras a) y b) son imágenes de la zona del Atlántico del 6 de marzo de 2008 de AVHRR y MODIS respectivamente, las c) y d) son de la zona del Cantábrico del 28 de septiembre de 2008 de AVHRR y MODIS respectivamente.

$0,1^{\circ}\text{C}$, la desviación típica de 0,5, la correlación es de 0,92 y el porcentaje de datos comparados es el 75,3%. Mientras que en la Figura 4c y d se ven datos del Mar Cantábrico del 28 de septiembre de 2008 también para AVHRR y MODIS respectivamente. En esta comparación la diferencia temporal es de 1 minuto, la diferencia media de temperaturas es de $0,1^{\circ}\text{C}$, con una desviación típica de 0,3 y la correlación entre ambas imágenes de 0,97, en ella el porcentaje de datos comparados es de 68,3%.

Variación de la TSM con el ángulo cenital de observación

Una posible fuente de incertidumbre en los datos es el ángulo cenital de observación (a partir de ahora lo llamaremos «zensat»). Por ello se ha estudiado la dependencia de la TSM con dicho ángulo. Se han elegido diez imágenes de abril y junio de 2008, se han procesado los pases completos y se han generado imágenes de TSM y del zensat. Después estas imá-

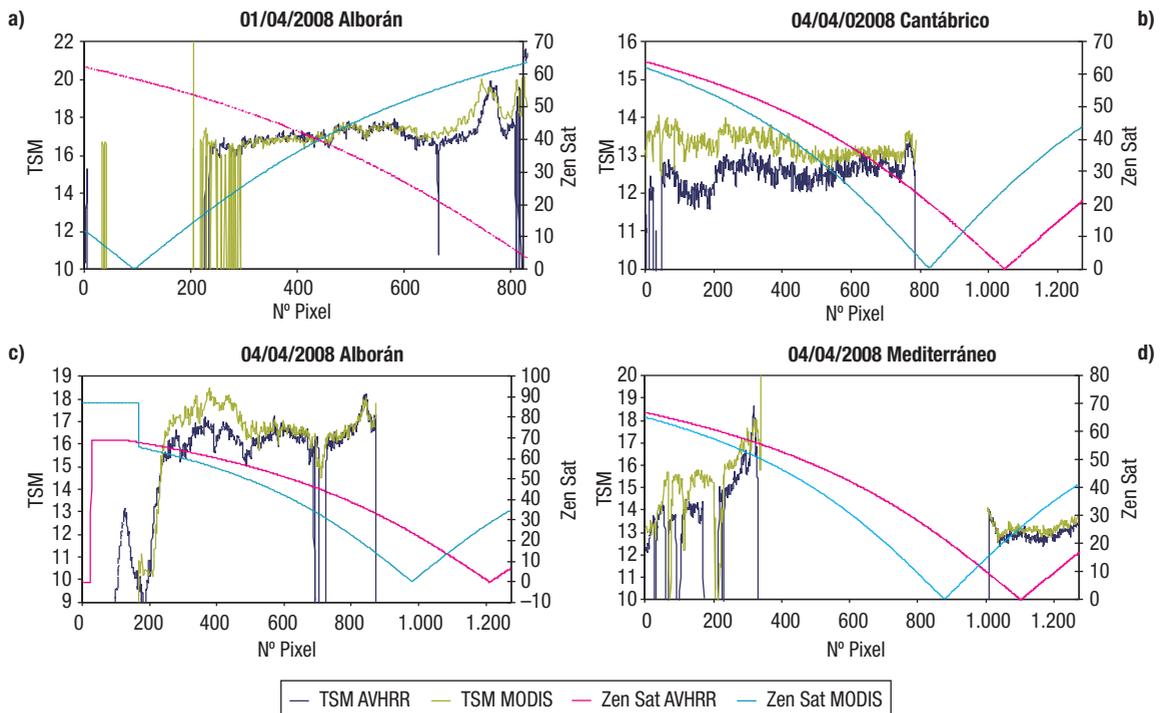


Figura 5. Temperatura superficial del mar (TSM) derivada a partir de datos AVHRR (línea azul oscura) y MODIS (línea verde). Las líneas rosa y cian representan los ángulos cenitales de observación (zensat) de los sensores AVHRR y MODIS respectivamente que están referidos al eje secundario. Las zonas sin datos de temperatura se encuentran sobre la superficie terrestre o están enmascaradas por tener nubes. En la gráfica (a) se presenta un perfil de temperaturas y zensat del 1 de abril de 2008 a $35^{\circ} 58' 29''$ N en una línea que va desde el Atlántico hasta el Mediterráneo, pasando por el Estrecho de Gibraltar. Las demás gráficas son del 4 de abril de 2008, la (b) desde el Atlántico hasta el Mediterráneo a $35^{\circ} 57' 29''$ N, la (c) sobre el Mar Cantábrico a $44^{\circ} 1' 30''$ N y la (d) en el Mediterráneo Norte a $41^{\circ} 27' 30''$ N.

genes se han recortado a la zona de coincidencia entre MODIS y AVHRR. En la Figura 5 presentamos resultados del 1 y 4 de abril de 2008 ya que son las imágenes con menos nubes en las que mejor se puede trazar un perfil longitudinal con los resultados y estudiar su dependencia con zensat. La línea azul oscura presenta la TSM de AVHRR, la verde la TSM de MODIS y las líneas rosa y cian presentan el zensat de AVHRR y MODIS, respectivamente, referidos al eje secundario. Las zonas sin datos de temperatura se encuentran sobre la superficie terrestre o están enmascaradas por tener nubes. En el caso de la Figura 5 (a) son datos del 1 de abril de 2008, y se presenta un perfil de temperaturas y zensat a $35^{\circ} 58' 29''$ N en una línea que va desde el Atlántico hasta el Mediterráneo, pasando por el Estrecho de Gibraltar. Las demás gráficas son del 4 de abril de 2008, la (b) desde el Atlántico hasta el Mediterráneo a $35^{\circ} 57' 29''$ N, la (c) sobre el Mar Cantábrico a $44^{\circ} 1' 30''$ N y la (d)

en el Mediterráneo Norte a $41^{\circ} 27' 30''$ N. En todas ellas vemos que para ángulos menores de alrededor de 50° , las TSMs son similares, dentro de los márgenes aceptables de error y tienen comportamientos similares. En cambio, cuando alguno de los ángulos es mayor de alrededor de 50° las líneas de temperatura empiezan a separarse (notar que las escalas de temperaturas no son iguales en todos los gráficos). Es decir, las diferencias de temperaturas aumentan pero también se ve un ligero desplazamiento de forma que los máximos y mínimos no coinciden como se puede observar claramente en las gráficas de la Figura 5. Este último efecto se puede explicar por que la georreferenciación en los márgenes de las imágenes es complicada y los píxeles son cada vez más grandes (hasta 4 km para AVHRR). Estos datos deben ser tratados con cuidado.

En la Figura 6 se presentan las diferencias de temperaturas de los perfiles mostrados en la Figura 5. En este caso las escalas de tempe-

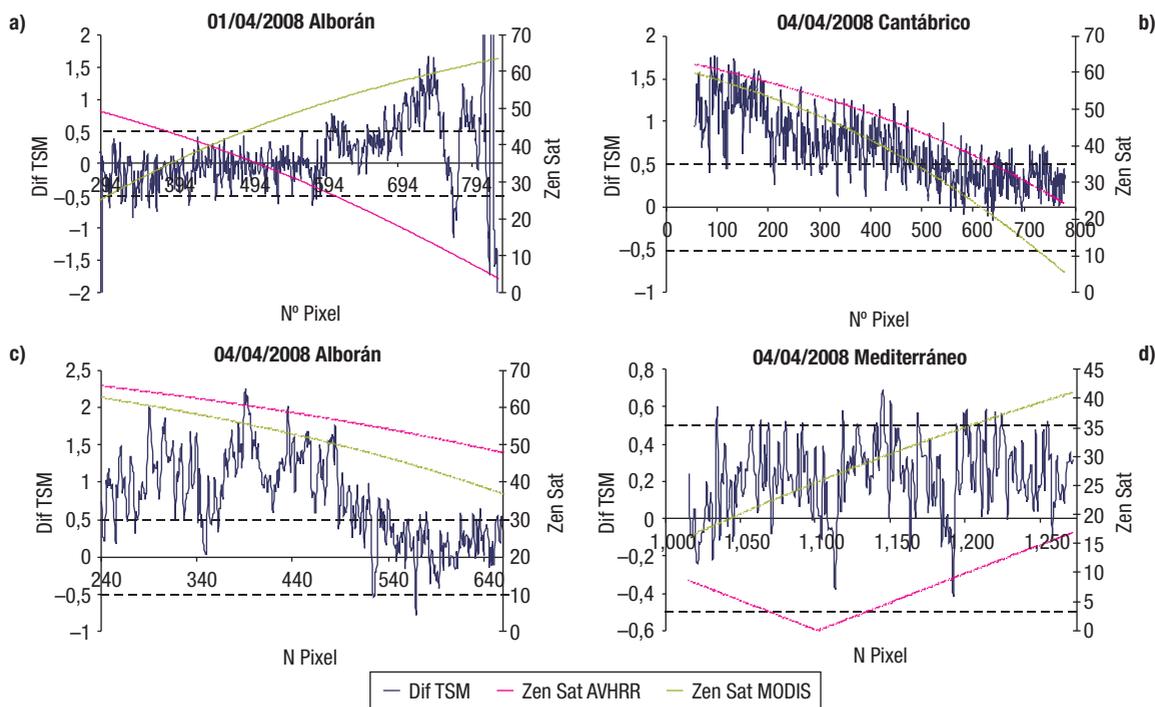


Figura 6. Representa las diferencias de temperaturas de los perfiles mostrados en la Figura 5. Se representa solo la parte de estos perfiles que no contienen nubes ni pixeles sobre tierra. La línea azul representa la diferencia de temperatura en el eje Y principal, la rosa el ángulo cenital de observación de AVHRR, la verde el de MODIS ambos referidos al eje Y secundario. Las dos líneas discontinuas negras se presentan como referencia donde la diferencia entre las imágenes esta entre $\pm 0,5^\circ$. En la Figura (a) se muestra la diferencia de TSM para el 1 de abril de 2008, a $35^\circ 58' 29''$ N y entre $-11^\circ 47'$ y $-2^\circ 58'$ E. La (b) presenta los resultados del 4 de abril de 2008 sobre una zona del Mar de Alboran a $35^\circ 57' 29''$ y entre $-10^\circ 29'$ y $-2^\circ 59'$ E. La (c) muestra las diferencias de temperatura del día 4 de abril a una latitud de $44^\circ 1' 30''$ N sobre el Mar Cantábrico, entre $-13^\circ 40'$ y $-1^\circ 35'$ E. Y la (d) es también del día 4 de abril de 2008 y muestra el perfil situado en $41^\circ 27' 30''$ N y entre $2^\circ 14'$ y $6^\circ 41'$ E.

raturas también son distintas entre los gráficos y se representa solo una parte de estos perfiles, los más limpios de nubes. La línea azul representa la diferencia de temperatura en el eje Y principal, la rosa el ángulo cenital de observación de AVHRR, la verde el de MODIS ambos referidos al eje Y secundario, y la dos líneas discontinuas negras se presentan como referencia donde la diferencia entre las imágenes esta entre $\pm 0,5^\circ$. En la Figura 6a se muestra la diferencia de TSM para el 1 de abril de 2008, a $35^\circ 58' 29''$ N y entre $-11^\circ 47'$ y $-2^\circ 58'$ E. En este caso vemos que para ángulos cenitales de observación de MODIS mayores que 51° la diferencia de temperatura empieza a aumentar paulatinamente. En cambio para AVHRR, estos ángulos se encuentran entre 0° y 50° aproximadamente y posiblemente no influyen en el aumento de la diferencia. La Figura 6b presenta los resultados del 4 de abril de 2008 sobre una zona del Mar de Alboran a

$35^\circ 57' 29''$ N y entre $-10^\circ 29'$ y $-2^\circ 59'$ E. En esta gráfica se observa que las diferencias aumentan cuando el ángulo de observación de AVHRR es mayor que 54° , que corresponde con alrededor de 46° de MODIS. Además a partir de unos 57° de AVHRR (unos 50° de MODIS) la diferencia es mayor a $0,5^\circ$ en prácticamente todos los casos. La Figura 6c muestra las diferencias de temperatura del día 4 de abril a una latitud de $44^\circ 1' 30''$ N sobre el Mar Cantábrico, entre $-13^\circ 40'$ y $-1^\circ 35'$ E. Este caso es un poco distinto de los anteriores ya que la diferencia de temperatura aumenta con los ángulos de observación a partir de los 42° o 44° para AVHRR y para los 32° - 35° de MODIS. Aún así se ve una clara dependencia de los resultados con los ángulos de observación. En cambio en la Figura 6d, que muestra el perfil situado en $41^\circ 27' 30''$ N y entre $2^\circ 14'$ y $6^\circ 41'$ E, esta dependencia no se observa debido a que los ángulos de observación en ambos ca-

Los valores de diferencia de temperatura permanecen dentro de los márgenes aceptables de incertidumbre en prácticamente toda la gráfica, solo unos píxeles sueltos lo superan.

Este estudio preliminar de una pequeña muestra de imágenes parece indicar que las TSM para zensat elevados es crítica y esos datos deben ser tratados con sumo cuidado. Un estudio más a fondo sería necesario para poder confirmar este resultado. Las principales causas que explicarían el aumento de incertidumbre en los resultados con el ángulo cenital de observación son la atmósfera, la emisividad de la superficie y la georreferenciación de los datos. Cuanto más grandes son los zensat más camino atmosférico y por tanto cualquier error en la estimación de parámetros atmosféricos tales como el vapor de agua, CO₂, CH₄ o aerosoles puede provocar una mayor incertidumbre en la estimación de la TSM. En el caso de la dependencia de la emisividad con los zensat, algunos autores como Niclós *et al.* (2004) observaron que diferencias en la estimación de la emisividad del agua para ángulos de observación de 55° podían provocar errores en la estimación de la TSM del orden de ±0,5 K. Por último, un error en la georreferenciación produciría que los píxeles comparados no fueran los mismos.

Conclusiones

Este trabajo muestra los resultados de validar datos de TSM obtenidos por medio del software MATIAS a partir del sensor satelital AVHRR con respecto a los obtenidos aplicando el software SeaDAS a datos MODIS. Para ello se ha calculado la diferencia media de temperatura, la desviación típica y el coeficiente de correlación. La comparación ha mostrado que para imágenes con más del 30% de los píxeles comparados el promedio de la diferencia de temperatura es de -0,1°C, la desviación es 0,5 y el coeficiente de correlación 0.90.

La TSM obtenida a partir de datos AVHRR revela un ajuste favorable con respecto a la de MODIS. También observamos que en general las medidas de TSM en el primer sensor son mayores.

En esta validación la diferencia promedio entre pases de ambos satélites es de 32 minutos, lo cual lleva a mencionar que la no correlación temporal de los datos prácticamente no influye en los resultados obtenidos. El 88% de los datos han sido comparados con una diferencia entre pases inferior a una hora.

El análisis comparativo de las temperaturas medidas por ambos sensores muestra que los productos TSM generados con el software MATIAS de CREPAD son buenos, teniendo en cuenta que la diferencia media de temperatura con respecto a MODIS es inferior a 0,1°C. Este valor como promedio de las diferencias es favorable, ya que la precisión en la determinación absoluta de la temperatura de AVHRR está estimada en 0,5°C. (IOCCG Report Number 5, 2006). Estos resultados posiblemente mejorarían si se eliminaran de la estadística aquellas áreas en las que los ángulos cenitales de observación sean superiores a unos 55°.

Referencias

- ANDING, D. & KAUTH, R. 1970. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of the Environment*, 1: 217-220.
- BARTON, I. J., ZAVODY, D. M., O'BRIEN, D. M., CUTTEN, D. R., SAUNDERS, R. W. & LLEWELLYN-JONES, D. T. 1989. Theoretical algorithms for satellite derived sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 94: 365-3375.
- DONLON, C. J., MINNETT, P. J., GENTEMANN, C., NIGHTINGALE, T. J., BARTON, I. J., WARD, B. & MURRAY, M. J. 2002. Toward Improved Validation of Satellite Sea Surface Skin Temperature Measurements for Climate Research. *J. Climate*, 15: 353-369.
- HOUGHTON, J. T., JENKINS, G. J. & EPHRAUMS, J. J. 1990. *Climate Change – The IPCC Scientific Assessment*. University of Cambridge, 364 pp.
- HUTCHISON, K. D., MARUSA, S., HENDERSON, J. R., KENLEY, R. C., TOPPING, P. C., UPLINGER, W. G. & TWOMEY, J. A. 1999. System Design Considerations for the Retrieval of Sea Surface Temperatures in the NPOESS Era. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 107-116.
- IOCCG, International Ocean-Colour Coordinating Group. 2000. Report number 3. 145.
- McCLAIN, E. P., PICHEL, W. G. & WALTON, C. C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based Multichannel Sea Surface Temperatures. *J. Geophys. Res.*, 90, No. C6, 11587-11601.

- NICLÓS 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: 83-93.
- ROBLES-GONZALEZ, C. & FERNANDEZ-RENAU, A. 2006. «Review and validation of CREPAD productos». *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Ed. José A. Sobrino. Servicio de Publicaciones. Universitat de Valencia. Valencia.
- SAUNDERS R. W., & KRIEBEL, K. T. 1998. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 9, No. 1, 123-150.
- SOBRINO J. A., LI, Z. L. & STOLL, M. P. 1993. Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31: 946-952.
- WALTON, C.C. 1988. Nonlinear multichannel algorithm for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 27: 115-124.
- WALTON, C. C., PICHEL, W. G., SAPPER, F. J. & MAY, D. A. 1998. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environmental satellites. *Journal of Geophysical Research*, 103: 27999-28012.

Utilización del sensor de imagen Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) para la cartografía de bosques de *Sargassum muticum* en la Ría de Vigo (Galicia)

G. Casal^{1*}, J. A. Domínguez², N. Sánchez-Carnero¹ y J. Freire¹

¹ Grupo de Recursos Marinos y Pesquerías. Universidad de A Coruña.
Campus de A Zapateira, s/n. A Coruña

² Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). P.º Bajo de Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid

Resumen

Debido al rápido avance en la Península Ibérica del alga invasora *Sargassum muticum*, que compite con algas autóctonas de elevada importancia ecológica, se han impulsado iniciativas dirigidas a la búsqueda de metodologías que permitan una rápida evaluación y un seguimiento continuo del avance de esta especie. En este contexto se desarrolla el presente estudio que pretende evaluar la utilidad de las imágenes hiperespectrales para la cartografía de *S. muticum*. Con el fin de validar esta metodología, en junio de 2008 se realizó un vuelo en la Ría de Vigo (Galicia) con el sensor hiperespectral AHS. Durante esta campaña se llevaron a cabo simultáneamente radiometría de campo y muestreos de vegetación intermareal e infralitoral, con el fin de obtener información sobre la variabilidad espacial en la cobertura algal que permitiera calibrar los resultados obtenidos mediante teledetección. En este trabajo se presentan los resultados de una clasificación *cluster-kmeans* y *Spectral Angle Mapper* que ha permitido cartografiar de modo eficiente la distribución de tipos de sustrato (arenoso y rocoso) y de las zonas de cobertura algal. En este momento se continúan realizando nuevas clasificaciones que permitan una mejora de los resultados obtenidos hasta el momento.

Palabras clave: hiperespectral, AHS, *Sargassum muticum*, cartografiado bentónico, zona costera.

Abstract

Use of Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) for mapping *Sargassum muticum* forest in Ría de Vigo (Galicia)

The invasive algae *Sargassum muticum* in the Iberian Peninsula competes with other native algae with important ecological value. The development of new methodologies are necessary in order to evaluate and monitor efficiently the spread of the *S. muticum*. The aim of this project is to validate the use of hyperspectral images to map *S. muticum* forests. Therefore in June of 2008 an hyperspectral flight was carried out over the Ría de Vigo (Galicia) with an Airborne Hyperspectral Scanner (AHS). During this survey, radiometric and algae abundance measures were taken in order to validate the remote sensing data. This study presents some preliminary results of *cluster k-means* and *Spectral Angle Mapper* classifications which has allowed to successfully map sandy and rocky substrates as well as algae areas. Currently, new classifications are being carried out in order to improve these results.

Key words: hyperspectral, AHS, *Sargassum muticum*, benthic mapping, coastal zone.

Introducción

Al severo impacto ecológico y al coste económico de las especies de plantas invasoras

(Drake *et al.*, 1989; Mooney y Cleland, 2001; Pimentel *et al.*, 2002) hay que sumar la pérdida de diversidad biológica que estas especies provocan. (Pimm y Gilpin, 1989; Scott y Willcove, 1998). El desarrollo de técnicas innovadoras para su cartografiado es fundamental no solo para entender su comportamiento y rela-

* Autor para la correspondencia: gcasal@udc.es
Recibido: 25-02-10; Aceptado: 11-05-11.

ciones con el medio sino también para tomar decisiones sobre su control y seguimiento.

La abundancia y distribución de la vegetación litoral ha sido tradicionalmente estimada utilizando métodos de campo, lo que conlleva un coste importante en tiempo y dinero, así como limitaciones de cobertura espacial y temporal. La utilización de imágenes adquiridas con sensores remotos ofrece una alternativa a los métodos de muestreo tradicionales, permitiendo inventariar grandes extensiones de organismos bentónicos fotosintéticos, a veces de difícil acceso, y realizar un seguimiento continuo sin necesidad de un trabajo de campo exhaustivo.

En este trabajo se aborda el estudio de los hábitats bentónicos de la Ría de Vigo utilizando imágenes adquiridas con el sensor AHS, como un primer paso para el establecimiento de una metodología que permita el cartografiado de comunidades algales y, concretamente, de *Sargassum muticum*.

Metodología

Área de estudio

La zona de estudio comprende parte de la Ría de Vigo, definida por la cobertura del vuelo y limitada a su vez por las condiciones meteorológicas en el momento de adquisición de las imágenes. Esta zona comprende desde el límite externo de la Ría de Vigo, entre Cangas y Nigrán, hasta la zona más interna, entre Chapela y Palmás, además de parte de la Ría de Aldán ($42^{\circ} 09' N$, $8^{\circ} 36' W$ y $42^{\circ} 21' N$, $8^{\circ} 54' W$) (Fig. 1).

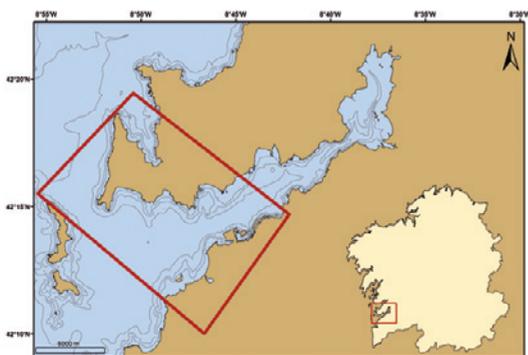


Figura 1. Ría de Vigo (SW Galicia). El recuadro marca la zona de estudio cubierta por el vuelo hiperespectral.

Datos de campo

La adquisición de los datos de reflectividad en el campo se realizó tres espectrorradiómetros: un espectrorradiómetro ASD FieldSpec FR y dos espectrorradiómetros Ocean Optics USB 2000, que permitieron obtener registros de reflectividad de superficies fuera del agua e irradiancia solar dentro del agua a diferentes profundidades. La toma de datos desde fuera del agua se realizó con el espectrorradiómetro ASD, fijándolo a la proa de la embarcación para minimizar la influencia de los reflejos de la misma (Fig. 2). El dispositivo utilizado permite controlar los ángulos de medida así como medir la irradiancia solar (E_s) una superficie lambertiana, concretamente un Spectralon del 25%, la radiancia del agua (L_{sfc}) con $\theta = 40^{\circ}$ y la radiancia solar difusa (L_{sky}) con $\theta' = 40^{\circ}$. El campo de visión (FOV) utilizado fue de 8° , de acuerdo con los protocolos establecidos en estudios oceánicos (Fargion y Mueller, 2000). El tiempo transcurrido en la toma de las medidas de irradiancia solar, radiancia del agua y radiancia solar difusa fue inferior a un minuto en todos los puntos de muestreo, lo que asegura que las variaciones de iluminación fueran mínimas.

Las dos fibras ópticas de los espectrorradiómetros Ocean Optics USB 2000, utilizados para la obtención de los perfiles de irradiancia de la columna de agua, se fijaron a un soporte con forma de T invertida, de manera que ambos receptores quedan orientados uno respec-

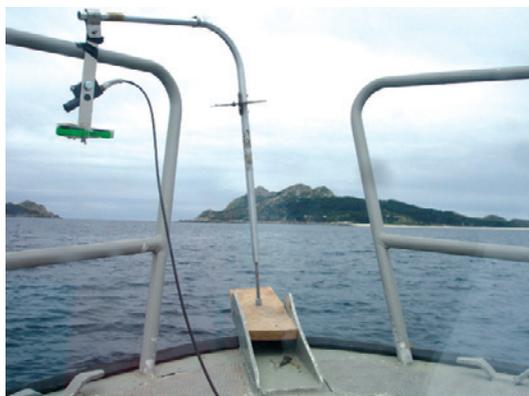


Figura 2. Fotografía del soporte fijado a la proa de la embarcación con la fibra óptica del espectrorradiómetro ASD FieldSpec FR y la superficie lambertiana del 25%.

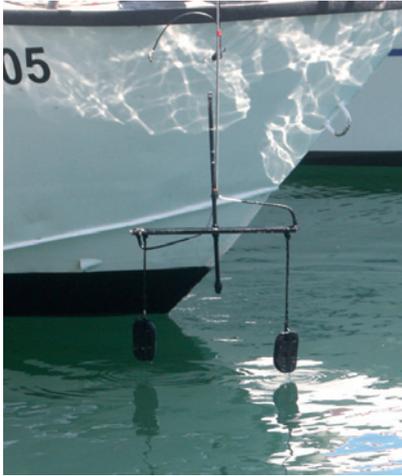


Figura 3. Soporte en forma de T invertida al que se fijaron las fibras ópticas de los espectrorradiómetros Ocean Optics USB 2000. Al soporte se le colocaron plomadas que permitían la toma de medidas perpendiculares a la superficie del fondo.

to al otro con un ángulo de 180° . A los extremos de la T se les colocaron plomadas con el fin de obtener una medida perpendicular a la superficie del agua (Fig. 3).

Con estos equipos se realizaron medidas sincrónicas al vuelo hiperespectral. Además, cada punto de muestreo fue posicionado mediante GPS, y se tomaron medidas de velocidad de viento, profundidad y visibilidad del fondo. A esta información se sumaron fotografías y videos tanto de la superficie como submarinos.

En momentos inmediatamente anteriores y posteriores al vuelo, se recogieron medidas de

reflectividad en la zona terrestre tanto de cubiertas de suelo o vegetación homogéneas, como apoyo al pre-tratamiento de las imágenes AHS, como de diferentes tipos de algas (sumergidas y descubiertas por la marea en el intermareal) (Fig. 4), con el fin de construir una librería espectral. Estas medidas se realizaron con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec FR y como blanco de referencia se utilizó una superficie lambertiana del 99%.

Para la obtención de datos de presencia y densidad de las comunidades algales que pudiesen ser comparados con las reflectividades medidas, se realizaron muestreos intermareales (en áreas identificadas previamente con presencia de *Sargassum muticum*) y submareales (en aquellos puntos donde se tomaron medidas de reflectividad de fondo). En ambos casos se estimó la abundancia relativa de los diferentes tipos de algas mediante cuadrados de 50×50 cm.

Imágenes del sensor AHS

Las imágenes fueron adquiridas entre las 8:46 y las 11:21 h del 21 de junio de 2008 mediante el sensor aerotransportado AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*). Este sensor es un escáner lineal de tipo whiskbroom, que registra la radiación procedente de la superficie en 80 bandas espectrales dentro de las ventanas atmosféricas del visible al infrarrojo térmico (entre 0,43 y 12,5 micrómetros). En este

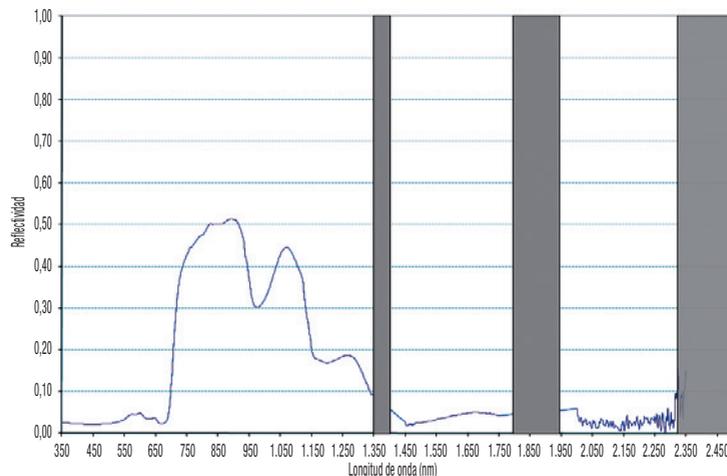


Figura 4. Espectro de un alga medido con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec FR.

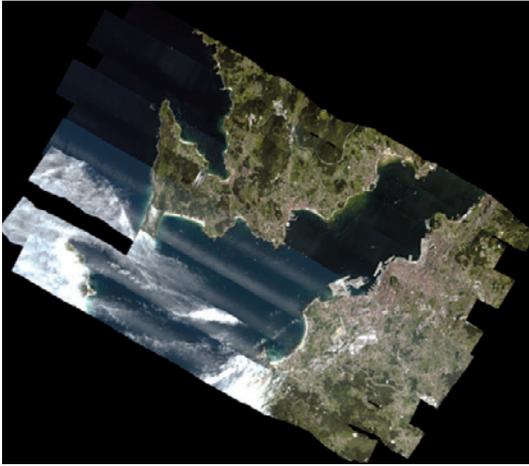


Figura 5. Mosaico del vuelo hiperspectral realizado con el sensor AHS. El mosaico comprende 10 pasadas válidas de 18 km de longitud. En la zona externa de la Ría aparecen zonas afectadas por nubosidad y *sun glint*.

caso el sensor estaba instalado en una aeronave CASA-212-200 del INTA (Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales) e integrado con un equipo GPS/INS POS-AV 410. El vuelo se realizó a una altura de 32.000 pies lo que permitió obtener una resolución espacial de 2,5 m. Se realizaron en total 10 pasadas válidas con una longitud total de 18 km (Fig. 5). A partir de las 11:00 h el área comenzó a cubrirse por una nubosidad baja, por lo que las imágenes correspondientes a la zona más externa de la

Ría se encuentran parcialmente cubiertas y afectadas por *sun glint*.

Análisis de las imágenes

El tratamiento previo de las imágenes fue realizado por el INTA en 3 fases: a) corrección geométrica utilizando un MDT de 5 metros de tamaño de píxel (SIXPAC, Xunta de Galicia), b) corrección radiométrica, y c) una corrección atmosférica con ATCOR 4 (Richter, 2004).

Posteriormente, a las imágenes se les aplicó una máscara terrestre y batimétrica, utilizando la isobata de 10 m, con el fin de eliminar la variabilidad espectral que aportarían a la clasificación dichas zonas. Las zonas afectadas por *sun glint* fueron también enmascaradas.

Con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos con diferentes clasificaciones, se utilizó una de las pasadas en la que se conocía la presencia de *Sargassum muticum* en grandes extensiones, según observaciones recogidas en la campaña de campo. A la imagen elegida se le aplicó una clasificación no supervisada *cluster k-means* que agrupa los píxeles de la imagen en un número predefinido de clases, basándose en la distancia mínima entre ellos. Aunque el objetivo del análisis fue identificar un grupo reducido de clases espectralmente di-

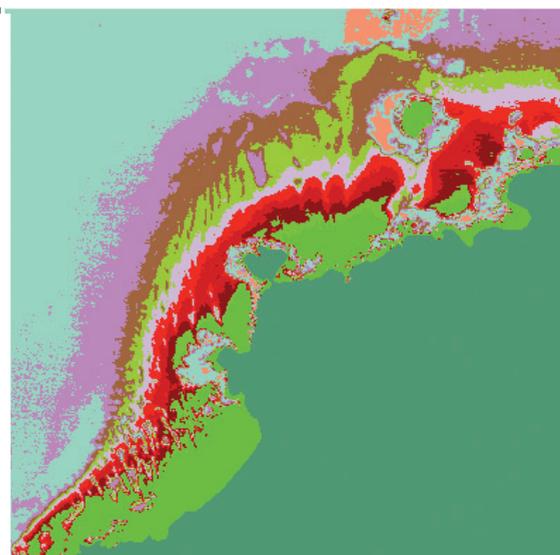


Figura 6. Detalle de la imagen resultado de la clasificación no supervisada *cluster k-means*. Imagen original (izquierda), y cluster con 20 clases (derecha) donde se aprecia el efecto de la profundidad en la clasificación, marcado por franjas de diferente coloración de tierra a mar.

ferentes, en muchos casos la variabilidad espectral dentro de las clases supera a la variabilidad entre las mismas, por lo que el análisis se realizó para 20 y 10 clases. A esta imagen también se le aplicó una clasificación supervisada *Spectral Angle Mapper* que calcula la similitud entre dos espectros comparando espectros desconocidos con otros de referencia, en nuestro caso de estudio, entre los espectros de la imagen y los medidos en el campo, respectivamente. Para esta clasificación se utilizaron espectros de arena, roca y varias especies de algas, entre ellas, *Sargassum muticum*. En ambas clasificaciones se emplearon las 20 primeras bandas entre 0,4567 y 1,0094 micrómetros.

Resultados y discusión

La clasificación no supervisada no muestra una separación efectiva de los sustratos aunque sí puede observarse claramente el efecto que la profundidad provoca en la clasificación. Áreas cubiertas por un sustrato homogéneo fueron cartografiadas como diferentes sustratos, presentando una distribución que sigue las líneas batimétricas de la zona (Fig. 6). Este resultado remarca la necesidad de utilizar la «reflectividad de fondo» definida por (Mobley, 1993) para estudios bentónicos.

El método de clasificación supervisada (*Spectral Angle Mapper*) permitió diferenciar los sustratos: roca emergida, arena emergida y alga (Fig. 7). Las extensiones de *Sargassum muticum* fueron reconocidas por la información recogida en la campaña de campo en el momento de adquisición de las imágenes. En algunas áreas en las que se conocía la presencia de este alga se observó una correlación con observaciones directas elevada (superior al 85% según la matriz de confusión).

Aunque este resultado no es definitivo, pues solo se observó en algunas zonas donde la especie era especialmente densa, nuevos análisis están siendo dirigidos a la cartografía de esta y otras especies en la zona de estudio. Las líneas de investigación a seguir, teniendo en cuenta estos resultados, consisten en la eliminación del efecto de la profundidad y en la aplicación de diferentes métodos de clasificación supervisada a modo de estudio comparativo, con el fin de establecer cuál de ellos proporciona una clasificación más efectiva.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (SARGAL PROJECT 030/SGTB/2007/1.4),

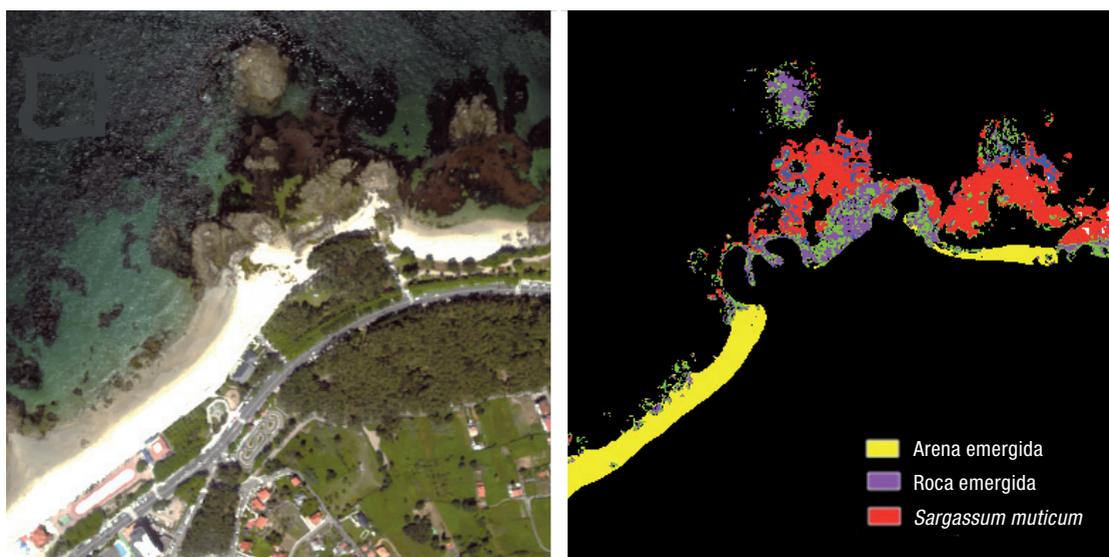


Figura 7. Detalle de la imagen resultado de la clasificación supervisada (*Spectral Angle Mapper*). En la imagen se diferencian zonas de roca, arena y alga. La clase correspondiente a *Sargassum muticum* se puede establecer debido a observaciones directas de la zona y a que esta alga forma grandes extensiones.

Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, INCITE (PROJECT 07MDS010CT) y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Esta investigación fue también parcialmente financiada por una beca pre-doctoral del programa María Barbeito (Xunta de Galicia) y una beca de investigación de la Diputación de A Coruña.

Referencias

- DRAKE, J. A., MONEY, H. A., DI CASTRI, F., GROVES, R. H., KRUGER, F. J., REJÁMAEK, M. & WILLIAMSON, M. 1989. *Biological Invasions. A Global Perspective*. John Wiley & Sons, Chichester, U.K.
- FARGION, G. S. & MUELLER, J. L. (editors). 2000. *Ocean Optics Proto-cols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 2*, NASA/TM-2000-209966.
- MOBLEY, C. D., GENTILI, B., GORDON, H. R., JIN, Z., KATTAWAR, G. W., MOREL, A., REINERSMAN, P., STAMMENES, K. & STAVN, R. H. 1993. Comparison of numerical models for computing underwater light fields, *Appl. Opt.*, 32: 7484-7505.
- MOONEY, H.A. & CLELAND, E. 2001. The evolutionary impact of invasive species. *Proceedures of Nat. Acad. Sci.*, 98(10): 5446-5451.
- PIMENTEL, D., LACH, L., ZUNING, R. & MORRISON, D. 2002. Environmental and economic cost associated with non-indigenous species in the United States. *Bioscience*, 50: 53-65
- PIMM, S. L. & GILPIN, M. E. 1989. Theoretical issues in conservation biology. In: J. Roughgarden, R. May y S. A. Levin (eds), *Perspectivas in Ecological Theory*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 287-205.
- RICHTER, R. 2004. Atmospheric/Topographic Correction for Airborne Imagery. ATCOR-4 User Guide Version 3.1. DLR, Wessling, Germany, 75 pp.
- SCOTT, J. M. & WILCOVE, D. S. 1998. Improving the future for endangered species. *Bioscience*. 48(8): 579-580.

Evaluación de distintos métodos de medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico

V. García-Santos*, E. Valor, M. Mira, C. Coll, J. M. Galve y V. Caselles

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universitat de Valencia.

C/ Dr. Moliner, 50. Burjassot. Valencia

Resumen

La medida de la temperatura de la superficie terrestre (TST) a nivel de suelo es necesaria para la validación de los productos TST obtenidos mediante teledetección en el infrarrojo térmico (IRT). En las campañas de validación, un factor importante a tener en cuenta, es la irradiancia atmosférica descendente (F_{sky}), la cual se ha de medir casi simultáneamente a las medidas de superficie. F_{sky} es un parámetro clave para eliminar la radiancia, de atmósfera y alrededores, reflejada en la superficie de la medida sobre ésta. La forma correcta de medir F_{sky} sería realizando medidas directas del cielo para todos los ángulos cenitales y acimutales, integrando luego estas medidas en el hemisferio superior. Como realizar estas medidas resulta un arduo trabajo, consumiendo una gran cantidad de tiempo, resulta un método poco útil, debido al continuo cambio de las condiciones atmosféricas durante el proceso de medida. En este estudio se comparan varios métodos capaces de determinar, de forma precisa, F_{sky} en un corto periodo de tiempo, evaluando así cuál de ellos es el más conveniente. Con este objetivo se llevó a cabo una campaña experimental, usando radiómetros térmicos multispectrales modelo CIMEL Electronique CE312, los cuales tiene cuatro bandas espectrales situadas en la el intervalo 8-14 μm . Se realizaron medidas directas de F_{sky} según el método de aproximación difusiva, el cuál estipula que F_{sky} es proporcional a la radiancia, procedente del cielo, medida en un determinado ángulo cenital efectivo que se sitúa en torno a los 53° . Otro método implica el uso de un panel de reflectividad difusa en el IRT. También se incluyeron, para su comparación, valores simulados de F_{sky} mediante un modelo de transferencia radiativa utilizando como datos de entrada a éste, radiosondeos realizados en la zona de estudio y perfiles atmosféricos obtenidos del National Center for Environment Prediction. Los resultados muestran una gran similitud entre todas las técnicas propuestas aquí, pudiéndose explicar las posibles diferencias entre éstas en términos de sus errores. No obstante si hubiera que decantarse por una de las técnicas, ésta implicaría el uso del panel de reflectividad difusa, pues tiene en cuenta la contribución de elementos circundantes como pueden ser, inevitablemente, el experimentador y su instrumental. Además puede ser usado bajo cualquier condición atmosférica, aspecto que excluye al resto de los métodos para el caso de cielos parcialmente cubiertos. Utilizar el panel supone cometer un error promedio de precisión, en términos de radiancia, de $\pm 1,5 \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$, equivalente en términos de temperatura atmosférica de $\pm 1,9 \text{ K}$.

Palabras clave: infrarrojo térmico, irradiancia atmosférica descendente, panel de reflectividad difusa, temperatura de la superficie terrestre, radiometría de campo.

Abstract

Evaluation of different methods to measure the atmospheric downwelling irradiance in the thermal infrared

Ground measurements of land surface temperature (LST) are necessary for the validation of LST products derived from thermal infrared (TIR) remote sensing data. In the validation campaigns, one important factor to take into account is the downwelling atmospheric irradiance (F_{sky}), which has to

* Corresponding author: vicente.garcia-santos@uv.es

Received: 02-03-10; Accepted: 14-01-11.

be measured near-simultaneously to the surface temperature measurements. F_{sky} is a key parameter for removing the radiance, both of atmosphere and surrounding, reflected at the surface from the radiance measured at ground level. Direct measurements of F_{sky} with a radiometer involve the measurement of sky radiances from all zenithal and azimuthal directions, and the integration over the upper hemisphere. Such measurements are time-consuming and are not useful because atmospheric conditions may change during the measurement process. Several methods to accurately determine F_{sky} in a short period of time are analyzed in this paper to evaluate which is the most suitable. With this aim, an experimental campaign was carried out using thermal radiometers CIMEL Electronique model CE312, which have four spectral bands in the 8-14 μm spectral window. One method for the determination of F_{sky} is the use of the diffusive approximation, which states that F_{sky} is proportional to the sky radiance measured at a given zenithal angle ($\sim 54^\circ$). Another method implies the use of a TIR diffuse reflectance panel. For comparison, F_{sky} values were simulated by means of a radiative transfer code using both radiosounding data measured at the study area, and atmospheric profiles from the National Center for Environment Prediction. Results show a great similitude between all the techniques proposed here, the possible difference between them could be explained in terms of their errors. Nevertheless the most recommended technique is the diffuse reflectance panel since takes into account the contribution of surrounding elements like the experimenter or his instrumental. Moreover the panel could be used under any atmospheric condition, aspect which excludes the rest methods in the case of skies partially cloudy. Using the panel suppose make an average error, in the terms of radiance, of $\pm 1.5 \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$, equivalent in terms of atmospheric temperature of $\pm 1.9 \text{ K}$.

Key words: thermal infrared, downwelling atmospheric irradiance, diffuse reflectance panel, land surface temperature, field radiometry.

Introducción

En la medida de temperatura de la superficie terrestre (TST) mediante radiometría en el infrarrojo térmico (IRT) es necesario tener en cuenta la emisividad de la superficie (ϵ) y la irradiancia atmosférica descendente (F_{sky}) que se refleja en ella, término $(1-\epsilon)$. Así, la radiancia procedente de la superficie, L_{surf} , viene dada por:

$$L_{surf} = \epsilon B(TST) + (1 - \epsilon) \frac{F_{sky}}{\pi} \quad [1]$$

siendo B la función de Planck, suponiendo un comportamiento reflector lambertiano para la superficie terrestre. Para obtener la irradiancia atmosférica descendente, es necesario medir la radiancia descendente de los alrededores en todas las direcciones angulares, $L^\downarrow(\theta, \varphi)$, siendo θ el ángulo cenital y φ el acimutal, e integrar dichas contribuciones según la expresión:

$$F_{sky} = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} L^\downarrow(\theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad [2]$$

Esto supone una tarea difícil de llevar a cabo en el corto espacio de tiempo requerido en campañas de campo, como la medida de temperatura in situ mediante radiómetros a nivel de superficie, realizada en unos pocos minutos, para su posterior validación con medidas de temperatura tomadas por un sensor a bordo

de satélite coincidentemente a su pasada por la zona de interés (Coll *et al.*, 2005). Como alternativa existen diversas técnicas capaces de medir rápidamente la F_{sky} .

Técnicas de medida directa

Las técnicas de medida directa de F_{sky} se basan en la medida de la radiancia directa procedente del cielo. Una de las técnicas más conocidas es la llamada *aproximación difusiva*, propuesta por Kondratyev (1969), necesitando tan solo una medida de la radiancia, realizada al apuntar el radiómetro térmico en una dirección cenital efectivo que se sitúa en torno a $53^\circ \pm 3^\circ$, no obstante este ángulo puede variar en función del tipo de atmósfera o del canal espectral de medida (Rubio, 1998). De esta forma se cumple que:

$$F_{sky} \approx \pi L_{sky}(\theta_{ef}) \quad [3]$$

Una modificación de la aproximación difusiva de Kondratyev, fue propuesta por Rubio *et al.* (1997), donde se demuestra que es posible estimar F_{sky} a partir de la medida a nadir de la radiancia atmosférica descendente, según la expresión:

$$F_{sky} \approx \gamma \pi L_{sky}(0^\circ) \quad [4]$$

donde γ es una constante que depende del intervalo espectral en el que se mide y de las condiciones atmosféricas, tomando valores de 1,1 a 1,7. La hipótesis de Rubio *et al.* (1997), es mucho más práctica en campo que la aproximación de Kondratyev (1969), porque evita la señalización exacta del ángulo cenital efectivo, siendo más fácil apuntar verticalmente.

Sin embargo, las técnicas de medida directa presentan dos inconvenientes importantes, el primero es que requieren de un cielo completamente cubierto o completamente despejado, es decir, en condiciones atmosféricas homogéneas. El segundo es que esta aproximación no considera la posible contribución de elementos circundantes a la superficie en estudio, sino que considera únicamente la contribución de la atmósfera.

Cálculo de valores simulados de F_{sky}

Una forma alternativa bastante fiable de obtener F_{sky} , es lanzar radiosondeos en la zona de estudio, capaces de proporcionar valores de altura geopotencial, humedad relativa, presión atmosférica y temperatura del aire, necesarios para introducirse en un modelo de transferencia radiativa (MTR), como puede ser el modelo MODTRAN 4.0 (Berk *et al.*, 1999) usado en este estudio, ofreciendo valores de la radiancia atmosférica descendente desde distintos ángulos cenitales: 0° , $11,6^\circ$, $26,1^\circ$, $40,3^\circ$, $53,7^\circ$, 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 87° y 89° , siendo los 5 primeros los ángulos llamados gaussianos (Wan y Dozier, 1989) y el resto propuestos por los autores con la finalidad de tener un barrido cenital completo de la atmósfera. Estos valores se integran según la expresión [2] para obtener el valor simulado de F_{sky} .

En caso de no disponer de radiosondeos de la zona, existe la posibilidad de obtener los parámetros requeridos por el MTR mediante la descarga de perfiles atmosféricos, interpolados espacial y temporalmente a la localización deseada. En el presente estudio se utilizaron perfiles atmosféricos del National Center for Environment Prediction (NCEP) (Kalnay *et al.*, 1995), para ello se indicaron en la aplicación telemática de LANDSAT a partir de perfiles del NCEP (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>), las co-

ordenadas de la zona deseada y la hora central de las medidas, obteniendo como resultado los datos de radiosondeos resultantes del reanálisis de modelos atmosféricos cercanos a la zona de estudio, junto a datos obtenidos mediante productos de sensores a bordo de satélites en la hora de pasada por la zona de interés.

No obstante, la simulación también presenta serios inconvenientes: no siempre se dispone de radiosondeos de la zona (se puede decir que casi exclusivamente se obtienen coincidiendo en campañas específicas), y los perfiles atmosféricos NCEP tampoco son siempre del todo fiables, ya que los datos son una predicción de parámetros atmosféricos, obtenidos a partir de datos interpolados espacialmente (tal vez las condiciones son distintas en una zona u otra) y temporalmente (los parámetros pueden ser distintos en una hora o en otra).

Panel de reflectividad difusa en el IRT

El panel de reflectividad difusa puede ser catalogado también como un método de medida directa, aunque no se apunte directamente al cielo, sino a una superficie lambertiana, que permite medir F_{sky} desde cualquier dirección angular y bajo cualquier condición atmosférica. Tiene en cuenta, además, la contribución radiativa de elementos circundantes, puesto que está situado a la altura de la superficie problema y recibe dicha contribución.

El objetivo del presente estudio es comparar las distintas técnicas existentes en radiometría de campo del IRT para determinar F_{sky} , evaluando así cuál de ellas es la más recomendable. Para ello se diseñó un dispositivo experimental que permite medir F_{sky} mediante la aproximación difusiva propuesta por Rubio *et al.* (1997) y mediante el uso de un panel de reflectividad difusa, caracterizando dicho panel al realizarse un barrido de medidas desde distintas combinaciones de ángulos (θ, φ) . También se incluyeron así mismo los valores de F_{sky} calculados mediante simulación en un MTR.

Como último comentario decir que todas las técnicas propuestas previamente, a excepción del uso de un panel de reflectividad difusa, han sido comparadas con un valor patrón de F_{sky} proporcionado por la expresión [2]. Así por

ejemplo, la aproximación difusiva propuesta por Rubio *et al.* (1997), fue extraída a partir de una mediciones del cielo a diferentes ángulos cenitales y acimutales, realizadas por el propio autor, y cuyos resultados se pueden encontrar en Rubio (1998). En el presente trabajo lo que se pretende es comparar entre ellas, estas técnicas contrastadas, bajo unas condiciones atmosféricas óptimas. Tan solo en el caso del panel de reflectividad difusa se pretende llevar a cabo, una caracterización de éste con la finalidad de averiguar cuáles son sus mejores condiciones de uso a la hora de medir F_{sky} .

Instrumentación

El radiómetro multispectral

El radiómetro térmico CIMEL Electronique modelo CE312 (Brogniez *et al.*, 2003), es un sensor multispectral que mide la radiancia emitida por una superficie en la región del IRT, determinando la temperatura radiométrica superficial de los cuerpos con una precisión de $\pm 0,1$ K. Sus filtros permiten medidas en un canal ancho (c1: 8,0-13,3 μm), y tres canales más estrechos (c4: 8,3-9,3 μm ; c3: 10,2-11,3 μm ; c2: 11,5-12,4 μm). Su campo de visión (FOV) es de 10° .

El panel de reflectividad difusa del IRT

En el experimento se utilizó el panel de reflectividad difusa en el IRT «Infragold Reflectance Target, IRT-94-100» cuya superficie de oro rugoso, de dimensiones $25,4 \times 5,4$ cm^2 , viene caracterizada por un alto valor de reflectividad en el infrarrojo. Según los canales 1 a 4 del radiómetro CE312, sus reflectividades son respectivamente 0,923, 0,925, 0,925 y 0,918, con un error de $\pm 0,009$, Teniendo en cuenta las leyes de conservación de la energía y Kirchhoff, éstas corresponden a emisividades de 0,077, 0,075, 0,075 y 0,082, respectivamente, con un error de $\pm 0,009$. Estas emisividades sirven, como se verá a posteriori, para corregir la contribución a las medidas del panel.

Sistema goniométrico

Durante el experimento se utilizó un goniómetro de hierro pintado de negro, compuesto por un soporte horizontal con brazos extensibles formando la base del conjunto. Sobre ésta descansa un semicírculo, de radio 40 cm, dividido en grados desde 0° hasta 180° , en intervalos de 5° . Del centro de la base parte un brazo giratorio (de longitud 1,70 cm) que tiene en dicho punto su eje de giro, de tal modo que al girar se desliza apoyándose sobre el semicírculo. En el extremo superior del brazo se acopla una abrazadera que sujeta el radiómetro, manteniéndolo paralelo a la dirección del brazo y mirando hacia el panel, lo cual permite realizar un doble recorrido cenital, desde 65° hasta -65° (a partir de 70° cenitales, la elipse proyectada por el FOV del radiómetro se sale del panel midiendo parte de suelo de forma no deseada).

Metodología

Condiciones atmosféricas de las medidas

Se decidió realizar las medidas en un día completamente despejado con la finalidad de optimizar la hipótesis de considerar F_{sky} invariable durante todo el tiempo de medidas, además de ser la condición atmosférica exigida para obtener F_{sky} según el método de la aproximación difusiva, y también para que la estimación mediante un MTR y un radiosondeo sean posibles.

La zona elegida para realizar el estudio fueron los arrozales de la Marjal en la Albufera de Valencia, coordenadas $39^\circ 15' 53''$ N, $0^\circ 18' 15''$ O. Localización cuya finalidad era evitar, en la medida de lo posible, la contribución radiativa de elementos circundantes en las medidas sobre el panel.

Sistemática de medidas experimentales

Para comparar las medidas de F_{sky} y caracterizar a su vez el panel, se diseñó un dispositivo experimental consistente en fijar un radiómetro sobre el goniómetro, permitiendo realizar medidas angulares de radiancia sobre el panel, desde 0° hasta 65° respecto del nadir,

en intervalos de 5° . Se realizaron unas 3 medidas consecutivas para cada ángulo cenital, considerándose a posteriori su valor promedio y su desviación estándar. A su vez, un segundo radiómetro CE312 se colocó cerca del panel apuntando verticalmente al cielo con el fin de medir la radiancia en el nadir, $L^\downarrow(0^\circ)$, necesaria para obtener F_{sky} según la ec. [4], como γ depende del canal espectral de medida y del contenido de vapor de agua atmosférico (García-Santos *et al.*, 2010), tal como se comentó anteriormente, dicho factor γ toma los siguientes valores en los canales 1 a 4 del radiómetro utilizado: 1,38, 1,49, 1,61 y 1,40, respectivamente. Se puede apreciar un esquema del dispositivo experimental en la Figura 1. Además, se consideraron dos valores más de F_{sky} , obtenidos al introducir dos perfiles atmosféricos en un MTR; MODTRAN 4.0 (Berk *et al.*, 1999). El primero se obtuvo descargándose de la aplicación telemática ofrecida por LANDAST, cuyo link puede encontrarse en el apartado de introducción en el presente documento. Dicha aplicación requiere una previa introducción de datos suministrados por el usuario: fecha y hora de las medidas, coordenadas de la zona de interés, estación del año y especificar las condiciones de superficie (esta última es opcional). Como resultado ofrece un perfil atmosférico fruto del reanálisis de datos obtenidos mediante radiosondeos del NCEP realizados en zonas circundantes a la de interés. El segundo perfil se obtuvo gracias a un radiosondeo realizado en la misma zona de las medidas y a la misma hora que éstas. Lo llevo a cabo el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) en una campaña alter-

nativa a la nuestra. Dicho radiosondeo ofrece valores de: altura geopotencial (desde la superficie hasta 16.000 m), presión atmosférica (en mbar), temperatura del aire (en K) y humedad relativa (en %).

El proceso de medidas fue llevado a cabo en el transcurso de una hora, concretamente de 11:30 a 12:30 a.m., hora local. De este modo se obtenían las medidas en el mismo instante en que se lanzaba, *in situ*, el radiosondeo.

Para estudiar la variación cenital de la radiancia recibida procedente del panel, se usó la siguiente metodología: Desde $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 45^\circ$ se midió a una distancia radiómetro-panel de 90 cm a nadir; desde $\theta = 50^\circ$ a $\theta = 65^\circ$ se redujo la distancia a 50 cm con el objetivo de aumentar la superficie observada del panel y evitar la contribución de elementos exteriores.

Resultados y discusión

Resultados experimentales

En la Figura 2 se muestran los valores de radiancia hemisférica descendente obtenidos según medidas realizadas con el goniómetro en la Albufera de Valencia sobre el panel directamente ($L^\downarrow_{\text{HEM_panel}}$), siendo este valor en cada ángulo cenital, el promedio de las tres medidas realizadas consecutivamente en dicho ángulo. El error de precisión asociado a las medidas del panel es el error cuadrático medio asociado a la desviación estándar de las tres medidas y al error asociado instrumental del radiómetro. Dicho error adquiere valores de: $\pm 1,4$, $\pm 1,7$, $\pm 1,7$ y $\pm 1,2$ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, para los canales 1 a 4 del CE312, respectivamente, así como para su corrección por el efecto de emisividad de éste ($L^\downarrow_{\text{HEM_ent}}$, ver apartado *corrección de emisividad del panel*). Además, junto a estos dos valores, se añade el valor obtenido por el método de la aproximación difusiva propuesto por Rubio *et al.* (1997) ($L^\downarrow_{\text{HEM_difusiva}}$), siendo este valor el promedio de toda la hora de sesión de medidas. El error de precisión asociado a esta técnica se obtiene de forma idéntica a la del panel, solo que esta vez la desviación estándar corresponde a todas las medidas de la sesión. Los valores que adquiere este error en los canales 1 a 4 del radiómetro son: $\pm 0,2$, $\pm 0,3$, $\pm 0,2$ y $\pm 0,2$

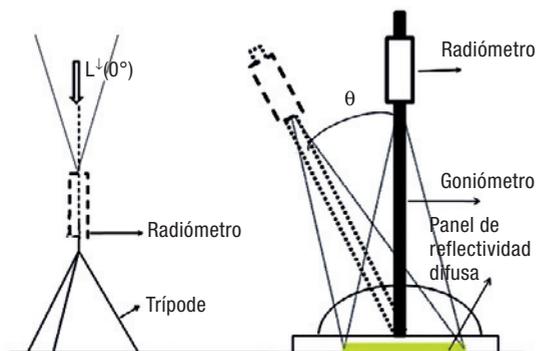


Figura 1. Montaje experimental para las medidas de los métodos directos utilizando un goniómetro.

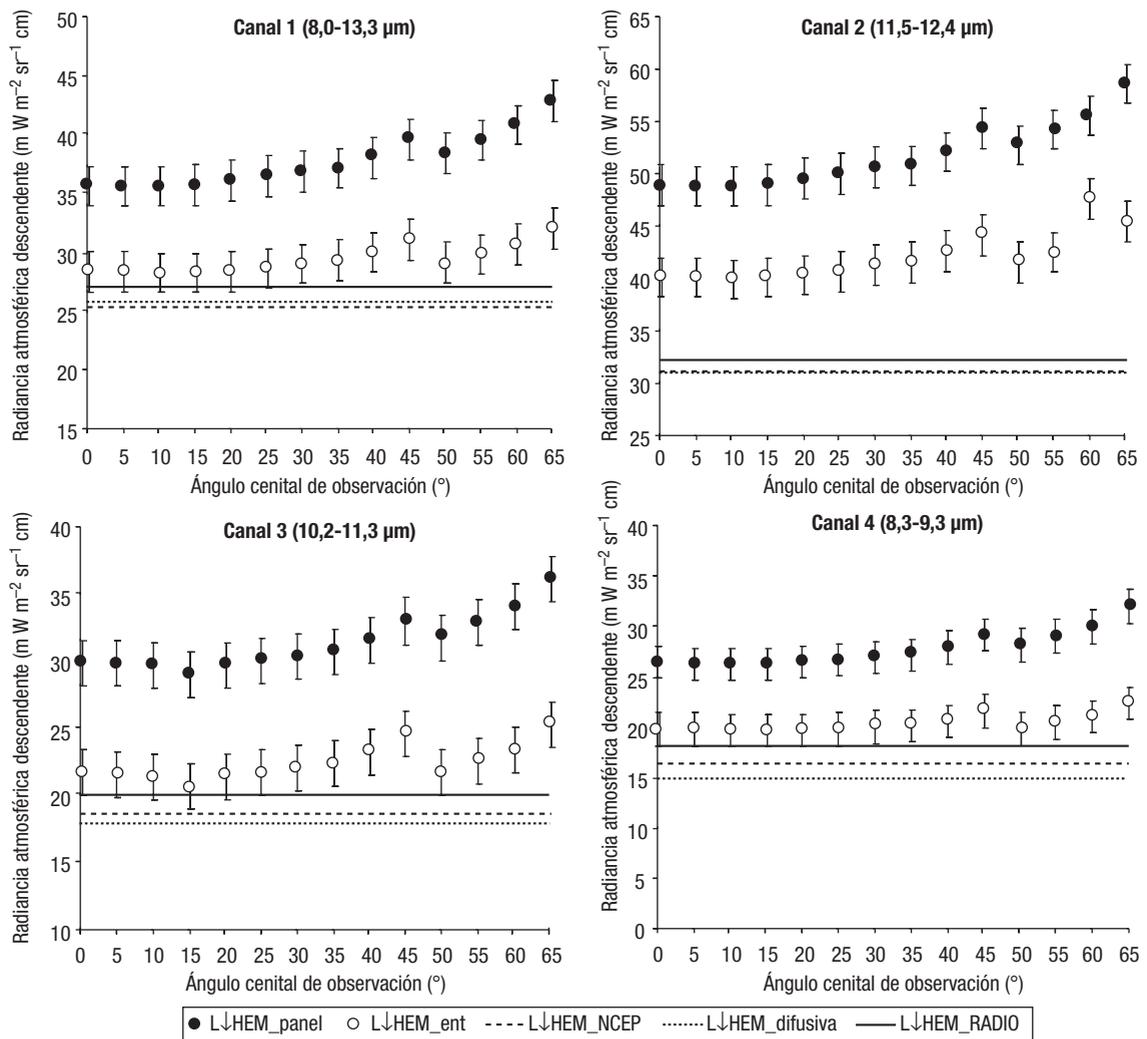


Figura 2. Resultados experimentales para los cuatro canales del radiómetro CE 312 de la medida de la radiancia hemisférica descendente, obtenida según: medida directa del panel ($L_{\text{HEM_panel}}^{\downarrow}$), la corrección del efecto de emisividad de éste ($L_{\text{HEM_ent}}^{\downarrow}$), el cálculo mediante simulación de perfiles atmosféricos del NCEP, ($L_{\text{HEM_NCEP}}^{\downarrow}$), el método de la aproximación difusiva ($L_{\text{HEM_difusiva}}^{\downarrow}$) y mediante datos de un radiosondeo hecho en el momento y lugar de las medidas ($L_{\text{HEM_RADIO}}^{\downarrow}$).

$\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, respectivamente. También se muestran valores de simulación calculados al introducir en un MTR perfiles del NCEP, ($L_{\text{HEM_NCEP}}^{\downarrow}$), o datos de un radiosondeo lanzado *in situ* ($L_{\text{HEM_RAD}}^{\downarrow}$). Los errores de estos dos parámetros simulados, se obtienen mediante la diferencia entre la radiancia hemisférica obtenida al introducir previamente el perfil atmosférico correspondiente y la radiancia obtenido al introducir nuevamente el perfil, pero modificando dos parámetros de éste: la temperatura del aire en ± 1 K y la humedad relativa en $\pm 10\%$ (Seeman et al. 2006). El valor de dicho error en los canales 1 a 4 del radiómetro es: ± 2 , ± 4 , ± 3

y ± 2 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, respectivamente. Decir que $L_{\text{HEM_difusiva}}^{\downarrow}$, $L_{\text{HEM_NCEP}}^{\downarrow}$ y $L_{\text{HEM_RAD}}^{\downarrow}$, no dependen del ángulo cenital que aparece en el eje de las abscisas, se decidió representar de este modo los resultados para una mayor comodidad visual a la hora de comparar las diferentes técnicas. Cabe comentar que se representa sólo la variación de $L_{\text{HEM}}^{\downarrow}$ con el ángulo cenital y no con el acimutal, porque se comprobó que la diferencia promedio entre los valores de $L_{\text{HEM_panel}}^{\downarrow}$ para un mismo ángulo cenital en sus cuatro acimuts es del orden de ± 1 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, correspondiente a un error en temperatura de ± 1 K, y el error promedio de las medidas es alrede-

dor de $\pm 2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, siendo esta variación menospreciable. A partir de aquí se considerará en cada ángulo cenital, pues, el valor promedio de radiancia de sus cuatro acimuts.

En los resultados de las gráficas de la Figura 2, se observan valores de F_{sky} estables y casi constantes, en todo el intervalo angular cenital 0° - 50° , aunque para ángulos grandes ($\theta > 50^\circ$) se produce un efecto narciso del radiómetro, el cuál mide su propia contribución. Esto se debe al necesario acercamiento del radiómetro hacia el panel por la necesidad de reducir la superficie observada por el radiómetro, evitando así medir superficie no deseada. Como se puede observar el goniómetro contribuye significativamente a las medidas y por tanto convendría utilizar uno hecho de un material menos radiativo en el térmico, como por ejemplo, el aluminio pulido al espejo, cuya emisividad en el IRT está en torno a 0,03 (Rubio *et al.*, 1997). En todo caso, las discrepancias que todavía se observan entre el uso del panel y el resto de métodos, son debidas fundamentalmente por dos motivos. El primero que el panel tiene en cuenta la contribución de los posibles elementos circundantes (incluyendo los experimentadores), factor que no se considera en el resto de métodos y que evidentemente es solución de posibles fuentes de error. Y el segundo que el panel posee cierto valor de emisividad que debe ser tenido en cuenta, puesto que en la medida hecha directamente sobre el panel, éste tiene una cierta contribución que debe ser corregida. Esto se verá con más detalle en el siguiente punto.

Corrección de la emisividad del panel

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 2, los valores de $L_{\text{HEM_panel}}^\downarrow$ distan bastante de los valores ofrecidos tanto por la aproximación difusiva como por los valores de simulación del NCEP y del radiosondeo. El motivo radica en la necesidad de eliminar la contribución radiativa propia del panel, puesto que tiene una emisividad no nula cuyo efecto debe tenerse en cuenta (Korb *et al.* 1996). La radiación procedente del panel responde entonces a la ecuación:

$$L_{\text{HEM_panel},i}^\downarrow = \varepsilon_{\text{panel},i} B_i(T_{\text{panel}}) + (1 - \varepsilon_{\text{panel},i}) L_{\text{HEM_ent},i}^\downarrow \quad [5]$$

donde $\varepsilon_{\text{panel},i}$ es la emisividad del panel en el canal i del radiómetro, T_{panel} es la temperatura termométrica del panel y $L_{\text{HEM_ent},i}^\downarrow$ es el valor de la radiancia que interesa conocer, ya que está corregida del efecto de la emisividad del panel y en ella ya viene integrada la contribución tanto de la atmósfera como del entorno. Por tanto, si se despeja este parámetro en [5], nos queda:

$$L_{\text{HEM_ent},i}^\downarrow = \frac{L_{\text{HEM_panel},i}^\downarrow - \varepsilon_{\text{panel},i} B_i(T_{\text{panel}})}{(1 - \varepsilon_{\text{panel},i})} \quad [6]$$

Para obtener correctamente el valor de radiancia a partir de la expresión [6] se ha de conocer el valor de la temperatura del panel (T_{panel}) para calcular el término $B(T_{\text{panel}})$. La estimación de esta temperatura se hizo mediante un termómetro de contacto, con una precisión de $\pm 1 \text{ K}$. Se tomaron medidas de la temperatura del panel en cinco puntos distintos de la superficie, realizándose así un muestreo de toda ésta y considerándose el valor promedio. El error en la medida de la temperatura del panel implica una indeterminación en el cálculo de $L_{\text{HEM_ent}}^\downarrow$ de $\pm 0,12$, $\pm 0,14$, $\pm 0,13$ y $\pm 0,12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ para los canales 1 a 4, respectivamente, correspondientes a un error en la determinación de la temperatura de $\pm 0,2$, $\pm 0,2$, $\pm 0,3$ y $\pm 0,3 \text{ K}$. Considerar nula la emisividad del panel en el momento de tratar los datos experimentales, supone cometer una sobrestimación de $L_{\text{HEM_ent}}^\downarrow$ para los canales 1 a 4 del radiómetro de 9, 18, 12 y 11 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, respectivamente. Esto está reflejado en las gráficas de la Figura 2, si observamos la diferencia entre $L_{\text{HEM_ent}}^\downarrow$ y $L_{\text{HEM_panel}}^\downarrow$. En términos de temperatura atmosférica, en este caso, se comete un error de sobrestimación de 10, 10, 15 y 10 K, para los canales 1 a 4 respectivamente. Una forma más intuitiva de apreciar el efecto de menospreciar la emisividad del panel, es evaluar la diferencia en TST obtenida en [1] cuando se sustituye en ésta el valor de $L_{\text{HEM}}^\downarrow$ corregido por el efecto de emisividad del panel y sin corregir. La diferencia de temperatura de la superficie, $\Delta T = \text{TST}_{\text{no_corr}} - \text{TST}_{\text{corr}}$, se puede observar en la Figura 3 para el caso de una superficie de temperatura radiométrica de 303 K. Así, por ejemplo, para el caso de una emisividad de la superficie de 0,9 se obtiene una diferencia de $\pm 0,4$, $\pm 0,5$, $\pm 0,5$ y $\pm 0,4 \text{ K}$ para los canales 1 a 4, respectivamente. También se concluye que cuando

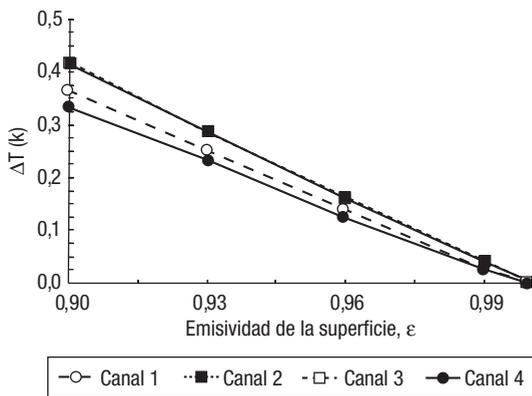


Figura 3. Diferencia entre la temperatura de brillo de una superficie cuando no se corrige el efecto de emisividad del panel y la temperatura de brillo de la misma superficie cuando se corrige dicho efecto, $\Delta T = T_{no_corr} - T_{corr}$, en función del valor de la emisividad para los 4 canales del CE312.

más grande es la emisividad de la superficie, menor es el efecto de emisividad del panel.

Comparación de métodos

A partir de los resultados expuestos en la Figura 2, se puede ver que todos los métodos utilizados convergen en valores comparables de L_{HEM}^{\downarrow} , siendo los valores simulados con perfiles NCEP los que sufren mayor desviación y que presentan un mayor error; también presentan cierta incongruencia con los valores del panel los valores obtenidos mediante la aproximación difusiva $L_{HEM_difusiva}^{\downarrow}$. Las medidas de L_{HEM}^{\downarrow} del panel, una vez corregidas del efecto de emisividad de éste, coinciden con los valores ofrecidos con los datos del radiosondeo realizado en la zona (excepto en el canal 2), lo que lleva a la conclusión de que las medidas de F_{sky} , mediante el uso de un panel de reflectividad difusa son más fiables, siempre que se realicen en el intervalo angular cenital 0° - 50° y distanciando el radiómetro del panel entre 80 y 90 cm para evitar el efecto narciso de éste.

Conclusiones

En el presente estudio se ha tratado la determinación de un parámetro imprescindible en radiometría de campo en el infrarrojo térmico, la irradiancia atmosférica descendente, F_{sky} . Se

han valorado los distintos métodos existentes hoy en día para obtenerla, tanto directamente como mediante simulaciones en un MTR. La conclusión a la que se llega es que los métodos de medida directa de F_{sky} , suponen la mejor y más rápida alternativa, y concretamente medirla mediante la utilización de un panel de reflectividad difusa es sin duda la mejor de todas ellas. El panel permite, mediante una simple medida, obtener un valor de F_{sky} de toda la contribución hemisférica de la atmósfera que rodea a la superficie en estudio, además también tiene en cuenta la contribución radiativa de elementos circundantes, y su utilización no viene limitada por las condiciones atmosféricas del momento, por lo que puede usarse incluso bajo condiciones de nubosidad parcial y variable.

No obstante, cabe tener en cuenta ciertas precauciones en el uso del panel. El pequeño valor de emisividad que posee el panel, añade una cierta contribución radiativa a las medidas realizadas sobre éste. Si no se corrige dicho efecto de emisividad del panel, al determinar la TST de una superficie se estará obteniendo un valor sobreestimado de ésta. Sobreestimación que aumenta a medida que disminuye la emisividad de la superficie de estudio. Variando este error de temperatura en 0,4 K por cada disminución del 10% de la emisividad de la superficie. Por lo tanto, se tiene que conocer la emisividad del panel en el intervalo espectral en el que se mide, y se debe tener un control de la temperatura de éste, para corregir el efecto radiativo de la emisividad en las medidas originales.

Finalmente, con un panel de características similares al presentado aquí, se puede obtener el valor de F_{sky} , realizándose una única medida, situando el radiómetro entre 80 y 90 cm, desde cualquier ángulo acimutal. Aunque el ángulo cenital es independiente, convendría realizar la medida en el intervalo 0° - 50° , controlando, en todo caso, la temperatura del panel en el momento de las medidas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MICINN (becas de V. García y M. Mira y contrato de J.M. Galve. Proyectos CGL2007-64666/CLI

y CGL2007-29819-E/CLI cofinanciados con fondos FEDER), y por la Conselleria d'Educació de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2009/086). Los autores desean agradecer la inestimable ayuda del Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) por facilitarnos, para el estudio, los datos del radiosondeo realizado en la Albufera de Valencia, en su proyecto TRANSREG (CGL2007-65359/CLI).

Referencias

- BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., CHETWYND, J. H., BERNSTEIN, L. S., SHETTLE, E. P., MATTHEW, M. W. & ADLER-GOLDEN S. M. 1999. *MODTRAN 4 user's manual*, Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, Hanscom AFB, MA, 95 pp.
- BROGNIEZ, G., PIETRAS, C., LEGRAND, M., DUBUISSON, P. & HAEFFELIN, M. 2003. A high-accuracy multiwavelength radiometer for in situ measurements in the thermal infrared. Part II: Behavior in field experiments, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20: 1023-1033.
- COLL, C., CASELLES, V., GALVE, J. M., VALOR, E., NICLÒS, R., SÁNCHEZ, J. M. & RIVAS, R. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 97: 288-300.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISSUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K.C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R. & JOSEPH, D. 1995. NCEP/NCAR 40 Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* pp. 437-471.
- KONDRATYEV K. Y., 1969. *Radiation in the Atmosphere*. New York: Academic Press.
- KORB, A.R., DYBWAD, P., WADSWORTH, W. & SALISBURY, J. W. 1996. Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity, *Applied Optics*, 35(10): 679-1692.
- RUBIO, E., CASELLES, V. & BADENAS, C. 1997. Emissivity Measurements of Several Soils and Vegetation Types in the 8-14 μm Wave Band: Analysis of Two Field Methods. *Remote Sensing of Environment*, 59: 490-521.
- RUBIO, E. 1998. Hacia la optimización de la medida de la emisividad y la temperatura en teledetección. Tesis Doctoral, cap. 2: 42-51.
- SEEMANN, S. W., BORBAS, E. E., LI, J., MENZEL, W. P. & GUMLEY, L. E. 2006. MODIS Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document. Madison, WI: Univ. Wisconsin-Madison.
- WAN, Z. & DOZIER, J. 1989. Land-surface temperature measurement from space: Physical principles and inverse modeling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27(3): 268-277.

Efecto de la atmósfera en la resolución óptica de la Z/I Digital Mapping Camera

L. Martínez*, M. E. Soler, F. Pérez y R. Arbiol

Àrea de Teledetecció. Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Monjuïc, s/n. 08038 Barcelona

Resumen

El Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) opera la cámara digital aerotransportada Z/I Digital Mapping Camera (DMC) para diversos trabajos cartográficos. Como todo sistema fotográfico de este mismo tipo la imagen padece una degradación en su resolución debida al sistema formador y al efecto de la atmósfera, por lo que la medida objetiva de la resolución con la cámara va más allá de la dimensión geométrica del píxel y el Ground Sampling Distance (GSD). En este trabajo se analiza la fracción de pérdida de resolución que causa la atmósfera en función de las condiciones atmosféricas. Para estimar la resolución se emplea una reconstrucción de la Función de Dispersión del Borde (Edge Spread Function, ESF) para obtener la Función de Dispersión de la Línea (Line Spread Function, LSF), cuyo Full Width at Half Maximum (FWHM) proporciona un valor de resolución en magnitud píxel. Para simular la atmósfera se ha aplicado el código de transferencia radiativa Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) para el que se han considerado variaciones en los modelos de atmósfera, aerosoles y geometrías de iluminación-observación para el rango espectral de la DMC. La metodología descrita ha sido aplicada a un blanco radiométrico construido como un escalón radiométrico en las campañas de calibración del ICC en el área de Banyoles (España). Una imagen sintética del mismo ha sido procesada con la simulación atmosférica y posteriormente analizada para obtener la pérdida de resolución debida exclusivamente a la atmósfera. Los resultados de las simulaciones muestran una elevada dependencia con el tipo y cantidad de aerosol, y también son compatibles con la medida de resolución de la imagen real del blanco tomada por la cámara.

Palabras clave: resolución, función de dispersión de línea, función de dispersión de escalón, atmósfera, DMC.

Abstract

Atmospheric influence on the Z/I Digital Mapping Camera optical resolution

The Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) operates the airborne digital camera Z/I Digital Mapping Camera (DMC) for cartographic purposes. This imaging system suffers from certain resolution degradation due to both the optical system and the atmosphere. Therefore, real resolution of the camera is different from purely geometrical pixel size and the Ground Sampling Distance (GSD). In this work, camera resolution loss caused by the atmosphere as a function of the atmospheric radiative conditions is analysed. The resolution in pixel units is evaluated as the Full Width at Half Maximum (FWHM) of the Line Spread Function (LSF) computed from a reconstruction of the Edge Spread Function (ESF). The Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) radiative transfer code is used to simulate the atmosphere. Atmosphere type, aerosol model and total load, illumination and observation geometries and spectral range are taken into account when computing simulations. The described methodology has been applied to an edge radiometric target at ICC test site on Banyoles (Spain) area. A synthetic image of the edge has been processed with the atmospheric simulations and then its resolution analysed to obtain the resolution loss caused by the atmosphere. The simulations results show a high correlation between resolution loss and aerosol model and total load. The results are also compatible with the resolution measures on the real image taken with the camera.

Key words: resolution, Line Spread Function, Edge Spread Function, atmosphere, DMC.

* Autor para la correspondencia: lucar.martinez@icc.cat

Recibido: 04-03-10; Aceptado: 10-05-11.

Introducción

El Institut Cartogràfic de Catalunya dispone de una línea de producción cartográfica totalmente digital gracias a la incorporación en 2004 y 2005 de cámaras fotogramétricas digitales. El modelo elegido fue la Digital Mapping Camera (DMC) desarrollada y comercializada por Zeiss/Intergraph (Z/I). Estas cámaras digitales presentan una resolución superior para una misma altura de vuelo frente a las analógicas. Por contra, la relación base/altura es mejor en el caso analógico, debido a la diferencia de formato de las imágenes.

El necesario cambio en los parámetros de configuración de un vuelo tras la incorporación de estas cámaras al flujo productivo generó la necesidad de disponer de un método para determinar de forma objetiva la calidad de los vuelos de cada proyecto, más allá de las puras dimensiones geométricas del píxel. La calidad de imagen es compleja de medir pero, cuanto más resolución y menos ruido tengamos, más contribuimos a una mejor calidad de imagen. La resolución hace referencia al poder de un instrumento óptico para separar dos objetos de una imagen o también el tamaño del mínimo detalle que podrá distinguirse al utilizar dicho instrumento. Este concepto se desarrolló inicialmente en el ámbito de la astronomía, donde se plantea la necesidad de separar fuentes puntuales de luz. Para el caso particular de la fotografía aérea la pérdida de resolución óptica implica una menor capacidad de distinguir las transiciones radiométricas presentes en la escena fotografiada. Así pues, un parámetro clave para determinar la calidad de las imágenes de la cámara es la resolución óptica efectiva de las imágenes que lo integran, más que el Ground Sampling Distance (GSD) y el tamaño de los píxeles de la imagen proyectados en el suelo. La pérdida o degradación de la resolución se debe tanto al sistema de captación como a la transmisión de la señal electromagnética a través de la atmósfera. Respecto al sistema de captación, debe tenerse en consideración el límite óptico debido a la difracción, que se calcula mediante el criterio de Rayleigh, y la electrónica de adquisición, cuya calidad y nivel de calibración pueden introducir ruido y artefactos radiométricos

que degraden la resolución de la imagen. Por su parte, la atmósfera condiciona y altera la transmisión de la radiación solar debido a la absorción y dispersión causada por gases y aerosoles (Kaufmann, 1989). La absorción atmosférica es el fenómeno responsable de la atenuación de los flujos directos de radiancia que alcanzan la cámara para determinadas regiones espectrales. En el caso que nos ocupa, los contrastes radiométricos se ven reducidos debido a la absorción atmosférica, puesto que tal como describe la Ley de Beer-Lambert, la cantidad de energía transmitida es una fracción de la energía incidente. La dispersión atmosférica se caracteriza principalmente, para la región de trabajo de la DMC, por un cambio en la dirección de propagación de la radiación tal como describen las leyes de Rayleigh y Mie. Esto implica que parte de la radiación inicial no alcanza el sensor, mientras que sí lo hace radiación que ha modificado su camino y por tanto no procede del objeto fotografiado. Así, la dispersión atmosférica implica que las zonas de contraste radiométrico, aquellas de transición entre objetos de diferente radiometría, se degradarán haciendo la distinción entre ambos menos evidente.

La magnitud más extendida para expresar la resolución espacial de un sensor es la MTF (Modulation Transfer Function o también Función de Transferencia de Modulación). La MTF es un parámetro de calidad óptica objetivo que aporta información sobre el funcionamiento y calidad de un sistema óptico y describe cómo resuelve ese sistema óptico pares de líneas a cada frecuencia. Cualquier objeto puede ser descompuesto en todas sus frecuencias espaciales y así la MTF permite calcular cómo se atenúan los contrastes (modulaciones) al formar la imagen del objeto en cada frecuencia espacial. Para la determinación de la MTF se observan con el sistema óptico a estudiar redes de contraste constante y frecuencia creciente midiendo el contraste resultante en las imágenes obtenidas. Con este procedimiento se busca la frecuencia más alta que el sistema óptico ya no resuelve y por tanto su límite de resolución. Esta metodología es poco operativa puesto que precisa de la construcción de patrones de líneas (como el *1951 USAF resolution test chart*) del tamaño adecuado a la escala de la imagen.

La Función de Dispersión Puntual o Point Spread Function (PSF) describe todas las perturbaciones que el valor radiométrico de un píxel sobre la imagen padece debido a los mencionados factores ópticos, electrónicos y atmosféricos. La PSF describe la respuesta del sensor a un objeto puntual observado. La relación entre PSF y MTF viene dada a través de la transformada de Fourier, de manera que la MTF es el módulo de la transformada de Fourier de la PSF. Como en el caso anterior, existe una dificultad práctica para la medición de la PSF por la necesidad de localizar objetos en la imagen cuya radiometría sea la de un impulso o un punto suficientemente pequeño y contrastado con su entorno.

La Función de dispersión de línea o Line Spread Function (LSF) es la respuesta dada por el sistema de captación a una línea observada sobre el terreno. Lógicamente esta última es muy importante cuando se desea realizar detección de bordes en la imagen. En cierto modo es equivalente a la PSF en una dimensión, por lo que la LSF es una buena aproximación en una dirección de la PSF. Aunque de nuevo la localización de una escena con un objeto lineal en la misma es harto compleja sí es posible emplear una alternativa más plausible. Dicha opción consiste en la reconstrucción en la imagen de la Función de Dispersión de Borde o Edge Spread Function (ESF) en un escalón radiométrico natural o artificial, que debidamente parametrizada y calculada su derivada nos proporcione la LSF, modelizada con una función de tipo gaussiano. Llegados a este punto, la medida Full Width at Half Maximum (FWHM) de la LSF proporciona un valor de resolución en magnitud píxel (dominio espacial) en la dirección perpendicular a la línea. A su vez, si se desea trabajar con una caracterización de la resolución más afín a los parámetros ópticos habituales, la transformación directa de Fourier de la LSF proporciona la MTF.

De todos los factores mencionados como responsables de la pérdida de resolución de los sensores de teledetección, la atmósfera es el menos susceptible de ser controlado o calibrado en laboratorio por motivos obvios. A su vez, la propia dinámica de la atmósfera hace que las parametrizaciones climatológicas de la misma sean generalmente insuficientes para determi-

nar el comportamiento radiativo exacto de la misma en el instante de captura de una imagen o en el periodo de captura de una pasada completa de imágenes de cámara aerotransportada. Sin embargo, la consideración de las diversas condiciones en las que se puede realizar una adquisición de teledetección sí puede ser útil para acotar el impacto que la atmósfera pueda tener en las imágenes.

Los códigos de transferencia radiativa permiten al usuario obtener parámetros atmosféricos (radiancias atmosféricas, transmisividades, etc.) o también simular la radiancia que mediría un sensor a partir de una serie de datos de entrada, como la geometría, la sensibilidad espectral del canal, el estado de la atmósfera, etc. Los códigos de transferencia radiativa son una herramienta fundamental a la hora de trabajar imágenes de teledetección, ya que permiten realizar la corrección atmosférica, así como simulaciones útiles en el desarrollo de algoritmos para obtener parámetros derivados. Algunos ejemplos de códigos son: MODTRAN, SMAC, 6S.

A continuación se describe un algoritmo basado en la reconstrucción de la Función de Dispersión del Borde para obtener un valor de resolución y un procedimiento para simular el efecto de la atmósfera mediante un código de transferencia radiativa sobre un patrón sintético. Posteriormente se analiza el resultado de combinar ambos procedimientos y finalmente se compara con la resolución determinada en la imagen DMC real del patrón.

Material y métodos

Construcción de la Función de dispersión de borde (ESF)

La metodología propuesta para la medida de la resolución de la imagen en magnitud píxel (Soler *et al.*, 2007) es el proceso de una región que contiene un contorno o borde observado en la imagen como un escalón radiométrico, semejante al planteado para satélite por Ryan *et al.* (2003). En dicho contorno se realiza un ajuste mínimo cuadrático sobre la función bidimensional del escalón radiométrico, como en el método propuesto por Blonski (2001) y

Blonski *et al.* (2002), que se postula como una función de tipo sigmoide:

$$f(j, i) = P_4 + \frac{P_1}{1 + e^{P_3(i * \cos P_5 + j * \sin(P_5 - P_2))}} \quad [1]$$

$P_k \in \mathfrak{R}, k = 1, \dots, 5$

donde $\{i, j\}$ son los índices fija y columna de la imagen.

El ajuste mínimo-cuadrático proporciona valores para los cinco parámetros y esta función es derivada para obtener la LSF. La medida de la resolución será la anchura-(FWHM) de la LSF.

Simulación del efecto de la atmósfera

La radiancia medida por la cámara L^* , puede relacionarse con la reflectividad aparente ρ^* , como:

$$\rho^* = \frac{\pi L^*}{\mu_s E_s} \quad [2]$$

donde:

- E_s es la irradiancia solar extraterrestre.
- μ_s es el coseno del ángulo cenital solar.

Teniendo en cuenta los fenómenos de interacción con la atmósfera descritos y según Staez y Williams (1997), es posible notar la radiancia solar que alcanza la cámara cuando se observa una superficie horizontal como:

$$L^* = A \frac{\rho_c}{(1 - \langle \rho_c \rangle S)} + B \frac{\langle \rho_e \rangle}{(1 - \langle \rho_e \rangle S)} + L_a \quad [3]$$

donde:

- ρ_c es la reflectividad corregida de la superficie observada.
- $\langle \rho_e \rangle$ es la reflectividad corregida del entorno en el que se encuentra la superficie observada (una ventana de píxeles).

— S es el albedo esférico de la atmósfera.

— L_a es la radiancia retrodispersada por la atmósfera hacia el sensor.

— A y B dan cuenta de la radiación directa y difusa, respectivamente, y de su interacción con la atmósfera.

Los parámetros A , B , S y L_a caracterizan tanto la geometría de observación e iluminación, como las condiciones atmosféricas consideradas en este trabajo (Tabla 1) mediante el código de transferencia radiativa Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) descrito en Vermote *et al.* (1997).

El cálculo de los parámetros A , B , S y L_a se realiza a partir de las magnitudes L_g o radiancia que alcanza el sensor desde la superficie observada, y L_p o radiancia que alcanza el sensor desde el entorno de la superficie observada y por la atmósfera, que para un medio de reflectividad uniforme se notan como

$$L_g = A \frac{\rho_c}{1 - \rho_c S} \quad [4]$$

$$L_p = B \frac{\rho_c}{1 - \rho_c S} + L_a \quad [5]$$

Ambas magnitudes L_g y L_p pueden obtenerse mediante códigos de transferencia radiativa funcionando en modo directo. Así, la obtención de los valores de A , B , S y L_a es trivial mediante la resolución de sistemas de ecuaciones. Los resultados correspondientes para cada conjunto de situación atmosférica y geométrica son guardados en una base de datos para aplicarlos cuantas veces sea necesario.

La Figura 1 muestra el campo de calibración radiométrica ICC de Banyoles (España). El 25

Tabla 1. Condiciones geométricas y atmosféricas consideradas para la simulación (total, 18.000) mediante el código de transferencia radiativa 6S

Parámetro	Rango de valores
Modelo atmósfera	Estándar US62, Tropical, Latitudes medias invierno, Latitudes medias verano, Subártica verano y Subártica invierno
Modelo aerosoles	Continental, marítimo y urbano
Cantidad de aerosoles (visibilidad en km)	7,5, 15, 30, 60 y 120
Ángulo de iluminación (ángulo cenital, cenit = 0°)	0, 30, 45, 60 y 75
Ángulo de observación (ángulo cenital, cenit = 0°)	0, 15, 30, 45 y 60
Diferencia acimutal iluminación-observación	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315



Figura 1. Fotografía aérea del campo de calibración ICC en Banyoles (2005). Blanco radiométrico empleado en la parte superior izquierda del campo (cubierta blanca sobre suelo).

de junio de 2005 se tomaron imágenes DMC desde un Cessna Caravan B209, entre las 10 y las 11 am (UTC) y se realizaron medidas de radiometría de campo simultáneas. En la parte superior del mismo puede observarse la lona blanca que en combinación con el suelo de tierra forman el escalón radiométrico objeto de este estudio.

Empleando la geometría del blanco radiométrico y a partir de las medidas de reflectividad obtenidas en campo para la lona blanca y

el suelo, se construye una imagen sintética del conjunto a la que se aplica la Ecuación 3 con los valores obtenidos para cada simulación de A, B, S y La (Fig. 2).

Resultados

La Figura 3 nos muestra el histograma de la resolución (FWHM de la LSF en unidades píxel) del blanco radiométrico tipo escalón tras aplicar las simulaciones atmosféricas para canal pancromático. Puesto que no se disponen de escalones radiométricos en todas las direcciones, no se distingue entre las condiciones along-track y cross-track para este trabajo. Puede observarse una distribución asimétrica de valores de resolución con una extensa cola hacia los valores de menor resolución (FWHM mayor). Esta distribución nos indica que la mayoría de casos la resolución estará alrededor de las máximas frecuencias del histograma que se ubican a valores de alta resolución (FWHM menor) pero que hay una gran cantidad de casos donde la atmósfera producirá una gran pérdida de resolución.

La Tabla 2 muestra los estadísticos básicos de la resolución (anchura FWHM de la LSF en unidades píxel) del patrón sintético tras apli-

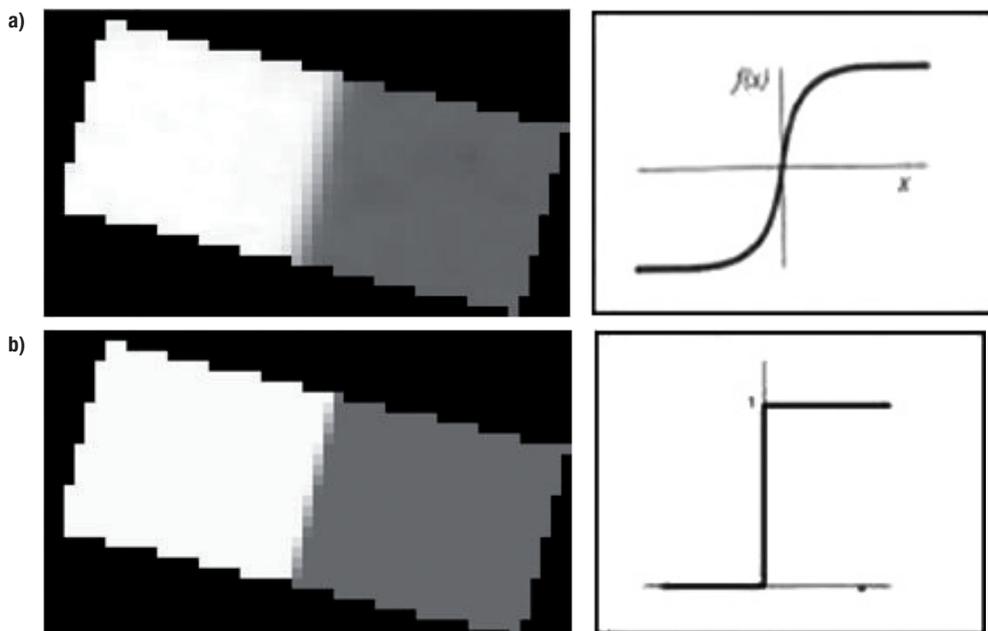


Figura 2. Detalle del escalón radiométrico del blanco radiométrico (a) empleado como ESF. Detalle de la imagen sintética del blanco radiométrico (b) empleado como patrón de la resolución.

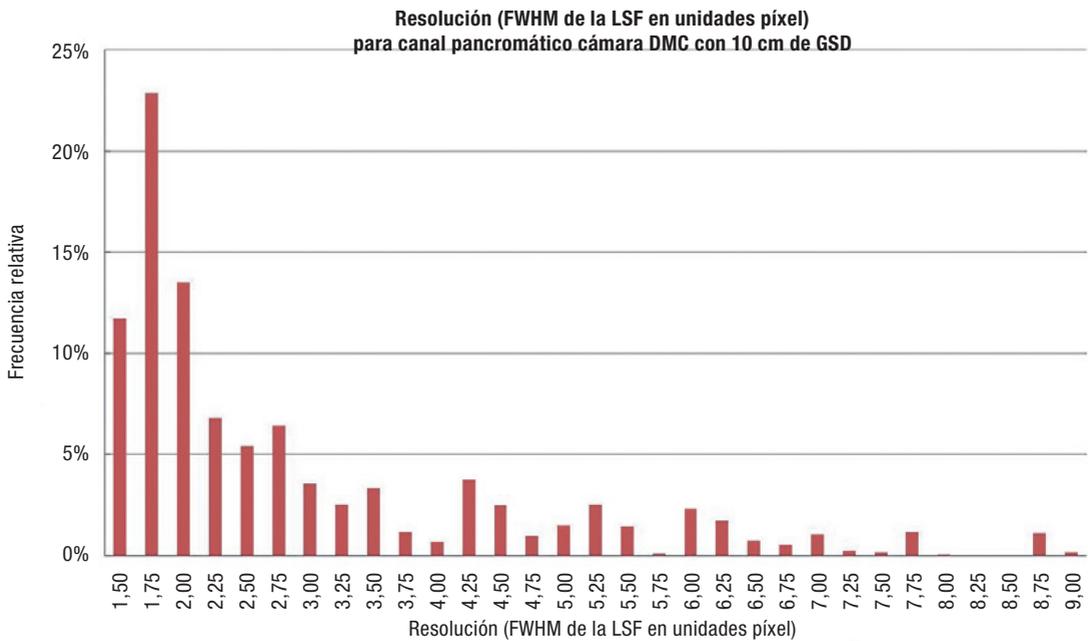


Figura 3. Histograma de la resolución (FWHM de la LSF en unidades píxel) del blanco radiométrico tipo escalón tras aplicar las simulaciones atmosféricas para canal pancromático.

car a la imagen todas las simulaciones atmosféricas para el canal pancromático de la DMC, tomando dicho patrón sintético (sin atmósfera) como referencia de resolución unidad, que confirman las apreciaciones realizadas sobre el histograma de la Figura 3.

Por su parte, la resolución medida en la imagen DMC pancromática sobre el blanco radiométrico y mediante la técnica descrita es 3,15 píxeles con GSD de 10cm, tomando dicho patrón sintético como referencia de resolución unidad. Ambos resultados son compatibles, puesto que la resolución perdida por el efecto atmosférico es una parte de la pérdida total y las condiciones atmosféricas reales están dentro de las consideradas en la simula-

Tabla 2. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para el canal pancromático de la DMC

Resolución	Pancromático
Patrón	1,00
Mínima	8,81
Máxima	1,35
Promedio	2,81
Desviación estándar	1,66
Percentil Q1	1,62
Percentil Q2	2,07
Percentil Q3	3,37

ción. Análisis más detallados de los resultados de pérdida de resolución, muestran que las variables que más influyen en la pérdida de la misma son el tipo y la cantidad de aerosoles.

A continuación se repite el proceso para cada uno de los canales multiespectrales, para analizar si las diferencias son significativas respecto al canal pancromático. La Tabla 3 muestra los estadísticos básicos de la resolución del patrón sintético tras aplicar a la imagen todas las simulaciones atmosféricas para los canales multiespectrales de la DMC, tomando dicho patrón sintético como referencia de resolución unidad. Como puede observarse en dicha tabla existe una elevada dependencia con la longitud de onda, siendo máximo el efecto a longitudes de onda baja (azul).

Este comportamiento de la resolución para los canales multiespectrales refuerza el análisis anterior que relaciona los efectos de la atmósfera en la resolución con su carácter dispersivo y por tanto con el tipo y cantidad de aerosoles, dada la dependencia de la dispersión de la longitud de onda, como muestra las Tablas 4 y 5, donde se calculan los estadísticos básicos de la resolución para cada una de las atmósferas consideradas, así como cada una de

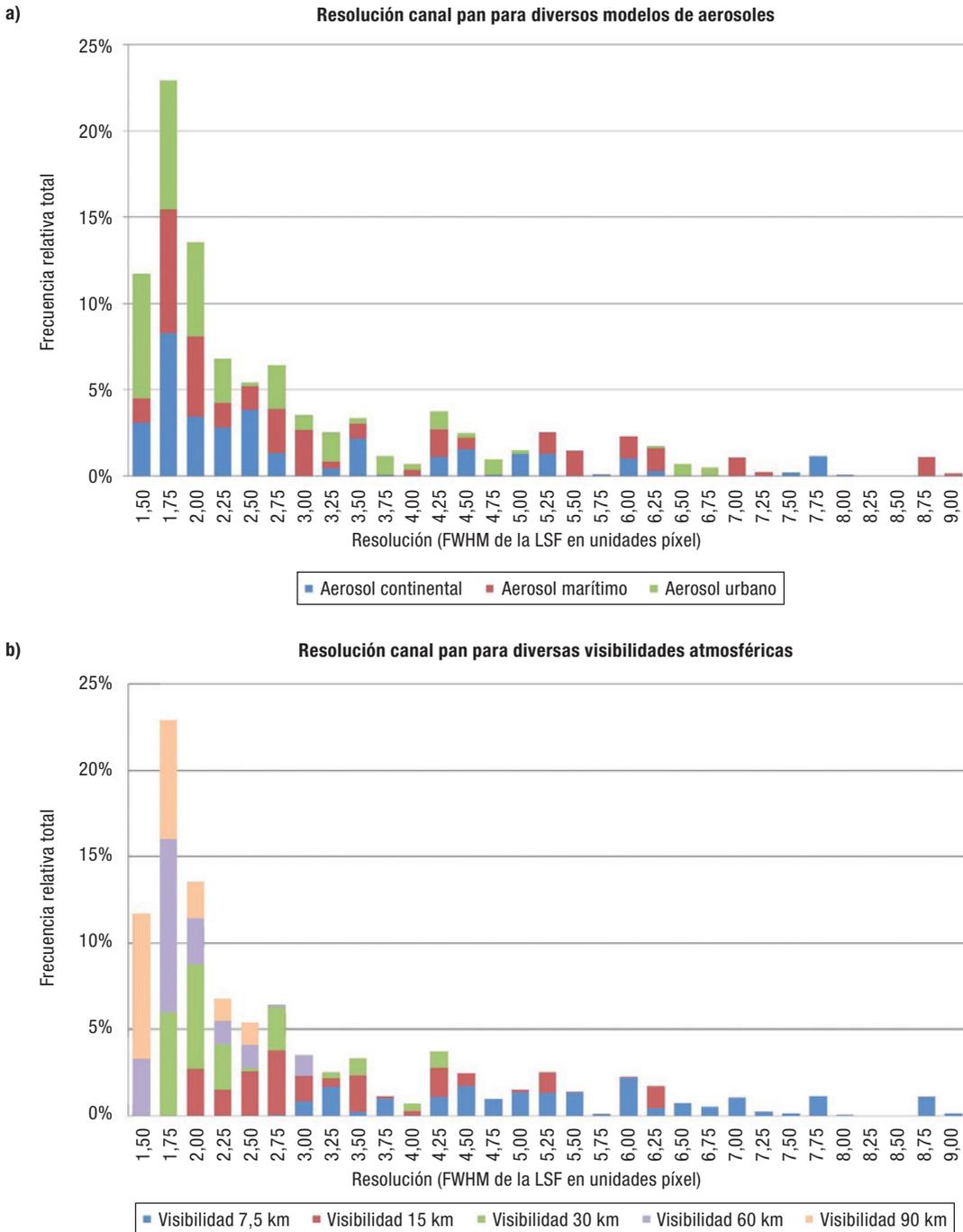


Figura 4. Histograma de la resolución (FWHM de la LSF en unidades píxel) del blanco radiométrico tipo escanón tras aplicar las simulaciones atmosféricas para canal pancromático. (a) según el modelo de aerosol considerado para las simulaciones atmosféricas (b) según la visibilidad atmosférica considerada para las simulaciones atmosféricas.

las visibilidades atmosféricas utilizadas para la simulación de la atmósfera.

Este hecho es claramente observable en la Figura 4, donde se ha procesado el histograma de la resolución para el caso pancromático para ha-

cer visible la frecuencia obtenida para cada tipo de atmósfera o para cada visibilidad atmosférica considerada en las simulaciones. Este fenómeno ya es claramente observable para el canal pancromático, por lo que se confirma que

Tabla 3. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para los canales multiespectrales de la DMC

Resolución	Azul	Verde	Rojo	Infrarrojo próximo
Patrón	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínima	13,55	9,03	8,53	8,03
Máxima	1,93	1,43	1,26	1,12
Promedio	5,34	3,16	2,51	1,97
Desviación estándar	3,03	1,83	1,56	1,24
Percentil Q1	2,74	1,74	1,46	1,27
Percentil Q2	4,79	2,43	1,76	1,47
Percentil Q3	7,56	4,14	2,84	2,02

Tabla 4. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para el canal pancromático de la DMC según el modelo de aerosol considerado para las simulaciones atmosféricas

Resolución pancromático	Aerosol		
	Continental	Marítimo	Urbano
Patrón	1,00	1,00	1,00
Mínima	7,80	8,81	6,72
Máxima	1,42	1,47	1,35
Promedio	2,82	3,27	2,33
Desviación estándar	1,61	1,94	1,21
Percentil Q1	1,64	1,74	1,53
Percentil Q2	2,20	2,56	1,88
Percentil Q3	3,46	4,27	2,68

en alta frecuencia (azul) la influencia del tipo y cantidad de aerosol será claramente apreciable.

Como trabajo futuro se plantea analizar con estos procedimientos imágenes obtenidas de forma sincrónica con medidas de concentraciones de gases y aerosoles atmosféricos. De esta forma se podrán validar los resultados de resolución de las imágenes con las simulaciones específicas para las condiciones atmosféricas de adquisición.

Conclusiones

En este trabajo se ha combinado un método para medir la resolución de imágenes de la DMC (FWHM de la LSF en unidades píxel), con la generación de una imagen sintética y la aplicación de múltiples simulaciones atmosféricas. Los resultados de las simulaciones muestran una elevada dependencia con el tipo y cantidad de aerosol, y también son compatibles

Tabla 5. Estadísticos básicos de la resolución (unidades en píxeles y GSD de 10 cm) para el canal pancromático de la DMC según la visibilidad atmosférica considerada para las simulaciones atmosféricas

Resolución pancromático	Visibilidad				
	7,5 km	15 km	30 km	60 km	120 km
Patrón	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínima	8,81	6,23	4,14	2,93	2,40
Máxima	2,63	1,82	1,52	1,39	1,35
Promedio	5,30	3,17	2,17	1,78	1,65
Desviación estándar	1,58	1,19	0,67	0,38	0,26
Percentil Q1	4,24	2,28	1,72	1,53	1,45
Percentil Q2	5,18	2,71	1,89	1,63	1,52
Percentil Q3	6,35	4,03	2,52	1,95	1,74

con la medida de resolución de la imagen real del blanco con la cámara DMC. Como trabajo futuro se propone analizar con estos procedimientos imágenes obtenidas de forma síncrona con medidas de concentraciones de gases y aerosoles atmosféricos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CEDEX (Ministerio de Fomento) por su colaboración en las medidas de campo. Los autores también agradecen al Ajuntament de Banyoles por la cesión del Camp Vell para la instalación de blancos radiométricos.

Referencias

- BLONSKI, S. 2001. Spatial Resolution of IKONOS Pan. Images: Characterization Based on Edge Responses. In: *2001 High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop*, 19-22 Marzo, Greenbelt, MD (USA).
- BLONSKI, S., PAGNUTTI, M., RYAN, R. E. & ZANONI, V. 2002. In-flight edge response measurements for high spatial-resolution remote sensing systems. In: W. L. Barnes (ed.), *Proceedings of SPIE: Earth Observing Systems VII*, 4814: 317-326.
- RYAN, R., BALDRIDGE, B., SCHOWENGERDT, R. A., CHOIT, HELDER D. L. & BLONSKI, S. 2003. Ikonos spatial resolution and image interpretability characterization. *Remote Sensing of Environment*, 88: 37-52.
- KAUFMAN, Y. J. 1989. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In: Asrar, G., editor, *Theory and Applications of optical Remote Sensing*. Wiley and Sons, New York.
- SOLER, M. E., PÉREZ, L.F., PALÀ, V., & ARBIOL, R. 2007. *Experiencias en medidas de resolución de imagen en el ICC 7ª Semana Geomántica*. Barcelona, 20-23 febrero.
- STAENZ, K. & WILLIAMS, D. J. 1997. Retrieval of Surface Reflectance from Hyperpectral Data Using a Look-up Table Approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(4): 354-368.
- VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M. & MORCRETTE, J. J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35: 675-686.

Delimitación de zonas forestales afectadas por vendaval mediante fotogrametría

R. Riera*

*Oficina Técnica de Prevención Municipal de Incendios Forestales. Diputación de Barcelona.
C/ Compte d'Urgell, 187. 08036 Barcelona*

Resumen

El vendaval que azotó el norte de la Península Ibérica y el sur de Francia en enero de 2009 provocó graves desperfectos en núcleos urbanos, urbanizaciones, zonas agrícolas e industriales y también en masas forestales. Los medios de comunicación difundieron sobre todo los desastrosos efectos en las masas forestales de Las Landas francesas. En Cataluña los daños fueron más localizados que en Las Landas, pero cayeron numerosos pies, sobre todo de coníferas, dejando los bosques intransitables. En el presente estudio se muestra la metodología utilizada para cartografiar las zonas con cubierta forestal afectada en el área más castigada de la provincia de Barcelona: la comarca del Baix Llobregat. Se realizó un vuelo fotogramétrico de 16.000 ha con una cámara DMC (*Digital Mapping Camera*), generando imágenes digitales RGB & CIR de aproximadamente 25 cm de píxel (GSD) y un solapamiento del 60-30%. Estas imágenes fueron restituidas mediante el software Purview, proporcionando visión estereoscópica de las imágenes, delimitando las zonas de cubierta forestal con árboles abatidos y definiendo el grado de afectación según el porcentaje de árboles derribados o partidos. El resultado ha sido una cartografía operativa para los ingenieros forestales, utilizada para la retirada de la madera tumbada en el bosque, donde además de la localización se aporta información de la dirección de caída de los árboles.

Palabras clave: fotogrametría, forestal, vendaval, DMC, fotografía aérea.

Abstract

Mapping forest windstorm damaged areas using photogrammetry

The windstorm that hit the Iberian Peninsula and southern France on January 2009 caused severe damage in villages, interface areas, agricultural and industrial areas and also forests. The mass media highlighted the impacts on the French Landes forests. In Catalonia, the damages were more localized but many pine trees fell leaving the forest impassable. This study describes the methodology used to map the damaged forest areas on the most affected area in the province of Barcelona: the Baix Llobregat County. RGB and CIR digital images with 25 cm pixel (GSD) and an overlap of 60-30%, were obtained from a photogrammetric flight with DMC camera (*Digital Mapping Camera*) over 16,000 ha. Digital stereo photogrammetry based on the aerial photographs through Purview software, was used to delineate forest damaged areas and specify impact severity according to the percentage of fallen or broken trees. The resulting operational maps can be used by forest engineers to remove fallen trees because not only damage location information is provided, but also tree fall layout.

Key words: photogrammetry, forestry, windstorm, DMC, aerial photography.

Introducción

A finales del mes de enero de 2009, el norte de la Península Ibérica y el sur de Francia se

vieron afectados de un modo excepcional por el ciclón extratropical Klaus. Fue principalmente la mañana del 24 de enero cuando el vendaval azotó de forma más virulenta a Cataluña. En la provincia de Barcelona, la máxima potencia se localizó en las comarcas de Anoia, Alt Penedès y Baix Llobregat, donde se regis-

* Autor para la correspondencia: rieratr@diba.cat
Recibido: 05-03-10; Aceptado: 21-03-11.

traron rachas máximas de viento de 139 km/h en las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) de Òdena y Font-rubí o de 131 km/h en Begues (Servei Meteorològic de Catalunya, 2006), con consecuencias devastadoras.

Las rachas de viento máximo fueron muy localizadas así como también sus afectaciones, provocando pérdidas de varios millones de euros. En las zonas urbanas los efectos fueron reparados con carácter de urgencia por bomberos, protección civil, y otras administraciones, restableciéndose rápidamente la normalidad. En las zonas forestales, los daños debían evaluarse, si no con la misma urgencia, sí con celeridad, para empezar cuanto antes los trabajos de retirada de árboles caídos.

Los medios de comunicación se hicieron eco de la destrucción en las masas forestales de Las Landas francesas, donde las primeras estimaciones apuntaban a más de 300.000 ha arrasadas de pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) (Diariovasco.com, 2008). En el norte peninsular, más concretamente en Galicia, por lo menos 32.500 ha de pino (*Pinus radiata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*) se vieron severamente afectadas (GIT, 2009), mientras que en Euskadi se hablaba de 350 ha dañadas (Diariovasco.com, 2008).

En Cataluña, muchos bosques quedaron salpicados de árboles aislados caídos. En las zonas más afectadas los daños se vieron aumentados a rodales de pinos derribados, mayoritariamente de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Las dimensiones de los rodales de árboles caídos variaban de centenares de metros cuadrados a unas pocas hectáreas (Fig. 1). Las primeras evaluaciones realizadas por el cuerpo de agentes rurales de la Generalitat de Catalunya estimaban en 1.950 las hectáreas dañadas por el vendaval en las comarcas del Vallès Occidental, Anoia, Alt Penedès y Baix Llobregat. La Generalitat destinó un presupuesto inicial de 7 millones de euros para la retirada de elementos de riesgo en el medio natural (Generalitat de Catalunya, 2010).

Experiencias similares (como las del ciclón Gudrun en Suecia en enero de 2005 o los ciclones Lothar y Martín en el centro y norte de Francia en diciembre de 1999) han demostrado que tanto la teledetección, mediante imágenes ópticas o radar de muy alta resolución



Figura 1. Mancha de árboles caídos.

[*Very High Resolution* (VHR), resolución espacial igual o inferior a 1 m], como la fotogrametría, resultan ser métodos efectivos y económicos para cartografiar las zonas forestales dañadas (Maire y Yésou, 2003; Swedish Forest Agency, 2007).

Para el ciclón Klaus (24 de enero) en Francia, se activó el *International Charter* para la adquisición y entrega de datos espaciales en catástrofes naturales, y se hicieron las primeras evaluaciones de los daños con imágenes SPOT 5 (Spot Image, 2008); por el contrario, en Galicia no se utilizaron imágenes de satélite ni fotogrametría para el inventario de daños, sino inspecciones aéreas y trabajo de campo (GIT, 2009).

En la provincia de Barcelona se evaluó la relación entre medios propios, costes, precisión y rapidez en la disponibilidad de los datos, comparando distintas tecnologías y medios aplicables. Al tratarse de una situación de emergencia, el criterio principal fue la inmediata disponibilidad de los datos al menor coste posible. La precisión requerida fue ubicar las zonas con teselas de árboles derribados y estimar el porcentaje de árboles caídos con los medios de software y personal especializado con los que cuenta la Oficina Técnica de Prevención Municipal de Incendios Forestales (OTPMIF) de la Diputación de Barcelona, en las zonas dónde los propietarios forestales lo solicitaran.

La tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) no se consideró adecuada debido al tiempo que requiere para el pre-procesamien-

to de los datos; los datos radar se desestimaron ya que la OTPMIF no dispone de medios propios para su procesamiento; las imágenes generadas a partir de cámaras ópticas implementadas en UAVs se descartaron por el elevado coste económico (5 €/ha); y las imágenes ópticas de muy alta resolución (VHR) también fueron descartadas por el alto coste económico debido a la necesidad de adquirir la totalidad de la imagen (resultando un coste de 0,5 €/ha teniendo en cuenta sólo el área de interés) y a la necesidad de realizar trabajo de campo para la comprobación de los resultados del proceso de las imágenes. Así pues, sólo la fotogrametría cumplía con la mayoría de requisitos (3 semanas inicialmente y 0,28 €/ha para las imágenes) y el objetivo propuesto: cartografiar las zonas afectadas a escala 1:5.000.

Zona de estudio

Los daños causados por el temporal se distribuyeron de forma irregular y localizada por toda la provincia de Barcelona. Después de una primera inspección aérea, se determinó que el Baix Llobregat era la comarca más afectada y con los daños en la masa forestal más generalizados, motivo por el cual se decidió centrar el estudio en dicha comarca.

El 14 de marzo de 2009, el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) realizó dos vuelos con el avión Partenavia P-68 sobre las zonas más afectadas del Baix Llobregat (Fig. 2), obteniendo dos rectángulos (ED1950 UTM Zona 31N: 414008E, 4580876N & 420598E, 4586034N)

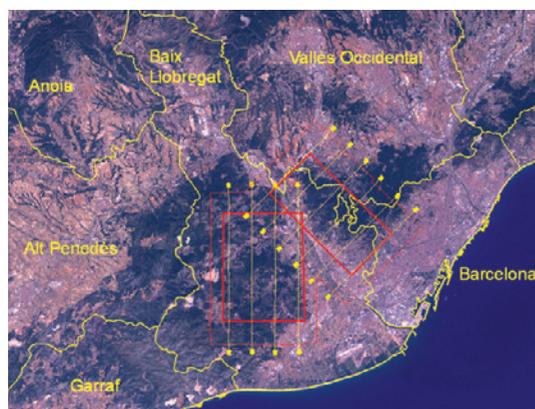


Figura 2. Localización de los dos vuelos (recuadros rojos) en la comarca del Baix Llobregat.

diseñados con el fin de optimizar el plan de vuelo y cubrir la máxima área forestal posible.

El área está localizada a ambos lados del río Llobregat, a sólo 10 km de su desembocadura. Por un lado en las Sierras del Ordal y por el otro en la montaña de Collserola. La orografía es abrupta y cambiante, con un rango de altitudes entre 5 y 500 msnm. El paisaje contiene un mosaico de zonas urbanas, urbanizaciones, matorral, campos de cultivo y bosques, en donde predominan los pinares de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.).

Datos

Las imágenes fueron adquiridas con una cámara DMC 14, que permite obtener imágenes fotogramétricas digitales mediante un sensor electrónico. Opera en 5 canales espectrales (pancromático, rojo, verde, azul e infrarrojo cercano) con 8 objetivos ópticos (4 pancromáticos y 4 multiespectrales). Con las imágenes de los 4 cabezales pancromáticos de alta resolución se sintetiza una imagen de 13.824×7.680 píxeles utilizada para convertir las imágenes multiespectrales de baja resolución (2.048×3.072 píxeles) en imágenes de alta resolución mediante el proceso de mejora «*pan sharpening*». El proceso se realiza a una resolución radiométrica de 12 bits, que es convertida a 8 bits mediante un proceso de compresión lineal con el fin de disminuir el tamaño de las imágenes (Alamús *et al.*, 2005; Colomer, 2005). En el presente estudio se dispuso de 157 imágenes en RGB y CIR (Fig. 3) con un solapamiento longitudinal y transversal del 60-30% respectivamente, una resolución radiométrica de 8 bits y un tamaño de píxel de 25 cm GSD (*Ground Sampling Distance*), lo que permite trabajar a una escala mínima de 1:5.000 (Jacobsen, 2005) y un error en la precisión vertical y horizontal de ± 1 m (I.S.M. International Systemap Corp., 2009).

Metodología y resultados

La identificación de las teselas de árboles caídos mediante interpretación visual de las imágenes en 3D depende de las aptitudes y co-

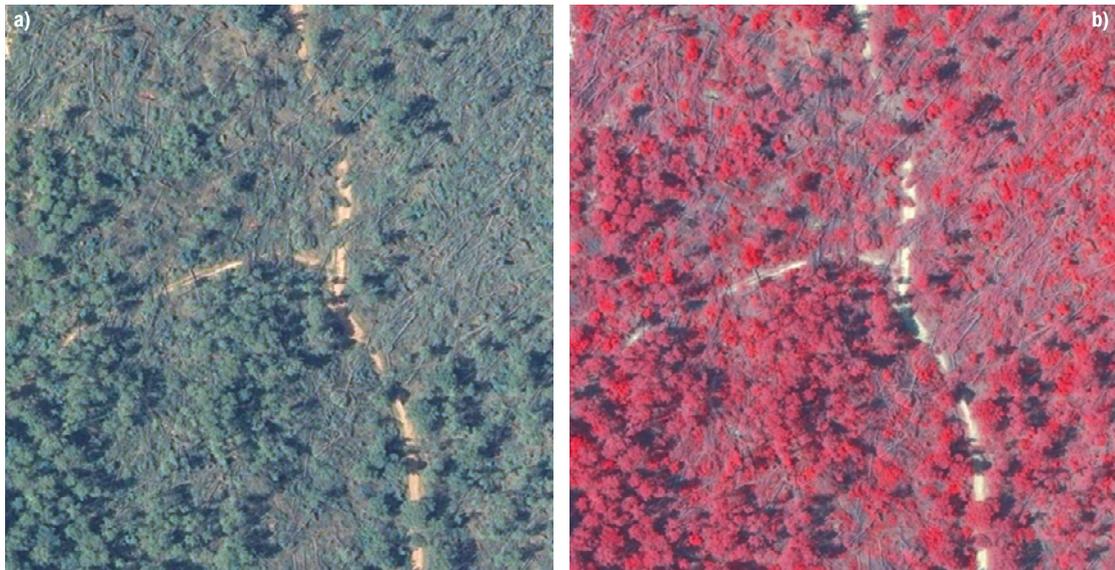


Figura 3. Imagen DMC de una zona afectada, con árboles abatidos sobre un camino forestal en RGB a) y en CIR (b).

nocimientos del operador (Quine y Bell, 1998) y de la resolución espacial de las imágenes (Miller *et al.*, 2000); con 25 cm GSD es suficiente para reconocer las zonas de bosque con árboles derribados o partidos mediante restitución fotogramétrica. La visualización es mejor con imágenes CIR respecto a las RGB, debido principalmente al realce de los troncos abatidos respecto a las otras cubiertas, y a que la diferencia entre copas de los árboles y suelo es más patente en las CIR. Con las imágenes en escala de grises, el operador pierde capacidad para la diferenciación de los troncos abatidos ya que se pueden confundir con el suelo. El único motivo por el que se podrían utilizar imágenes en escala de grises sería para optimizar el rendimiento del software a la hora de procesar y manejar las imágenes, pero la ganancia en tiempo no justifica la pérdida de calidad de la imagen.

El software Purview es una estación fotogramétrica que trabaja en el entorno de ArcGis con imágenes digitales y elementos de geodatabase superpuestos (I.S.M. International Systemap Corp., 2009). Para la orientación de las imágenes, se requieren sus correspondientes parámetros de orientación o georreferenciación, que se obtienen únicamente del archivo de soporte aéreo cinemático, sin necesidad de apoyo fotogramétrico (puntos de campo). El vuelo se realizó grabando los datos en un sen-

sor IMU; una vez finalizado el cálculo GPS y obtenidas las posiciones del centro de fase de la antena, se integraron los datos con las observaciones inerciales del IMU para obtener los ángulos de orientación de las imágenes parametrizados como *roll*, *pitch* y *heading*, obteniendo *omega*, *phi* y *kappa* por aerotriangulación, que junto con las coordenadas centrales (X, Y, Z) de cada fotograma, permite orientar y posteriormente rectificar las imágenes en el SIG gracias a tener el mismo sistema de coordenadas (UTM Zona 31N) y sistema de referencia (ED1950).

Una vez rectificadas las imágenes y con la cartografía de base superpuesta, se procede al reconocimiento de las zonas afectadas y la delimitación de su perímetro, definiendo el grado de afectación según el porcentaje de árboles derribados, base legal para la subvención extraordinaria para la recuperación del potencial forestal de las masas afectadas por nevadas, vendavales y sequía de los años 2008 y 2009, de la Generalitat de Catalunya:

- 75-100%.
- 50-75%.
- 25-50%.
- <25%.

Dada la situación de emergencia, en la primera fase del estudio se inventariaron únicamente aquellas fincas en que el propietario forestal lo solicitó, mediante su adscripción a la

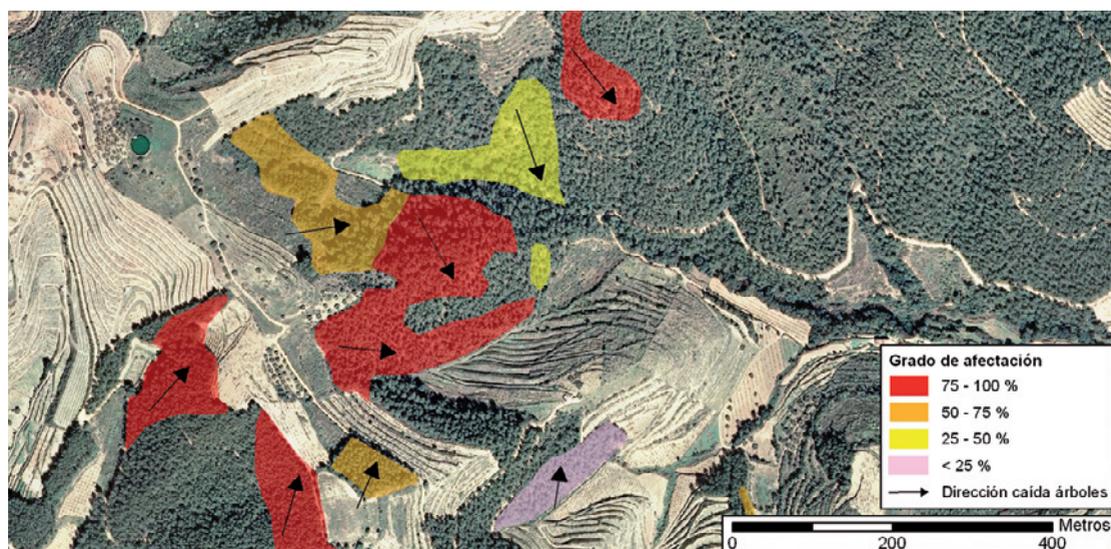


Figura 4. Cartografía operativa de una zona afectada sobre ortofotomapa 1:5.000 (ICC).

Asociación de Propietarios Agroforestales del Baix Llobregat. Posteriormente, la revisión se extendió en zonas circundantes a las fincas asociadas y zonas de mayor afectación.

En la Figura 4 se muestra la cartografía operativa para la saca de la madera, con la localización, el grado de intensidad y la dirección de caída predominante de los árboles, útil para la planificación del desembosque de la madera.

En noviembre de 2009, el número de nuevos propietarios asociados a raíz del siniestro eran 145, con un total de 3.672 hectáreas forestales, de las que 423 ha fueron afectadas por el vendaval. En la Tabla 1 se muestra el total de superficie afectada según el grado de intensidad en la zona inventariada hasta noviembre de 2009. Cabe mencionar que la afectación real es, por lo menos, superior a estas cifras, ya que no se ha restituido la totalidad de la zona de estudio.

Tabla 1. Superficie forestal afectada según el grado de intensidad

Porcentaje de afectación	Superficie (ha)
75-100%	156,10
50-75%	140,94
25-50%	98,72
<25%	27,01
Total	422,77

Discusión

La delimitación de los perímetros de las zonas afectadas mediante restitución fotogramétrica es un proceso mecánico, pero eficiente. Aunque no sea aconsejable para cubrir grandes superficies dado el alto requerimiento en tiempo del proceso, sí lo es para zonas localizadas como las fincas asociadas de este trabajo, a escala 1:5.000.

La visión estereoscópica con 25 cm GSD permite localizar rodales o teselas de árboles abatidos, pero no permite identificar los árboles aislados caídos en medio de la masa forestal, donde apenas se ha alterado la Fracción de Cabida Cubierta (FCC). Previamente a la contratación del vuelo, se realizaron pruebas con imágenes de 10 cm GSD, pero se descartaron debido al volumen de almacenamiento de las imágenes, que hacía más dificultosa la restitución, y al incremento significativo del coste de los datos. No se han realizado pruebas con GSD superiores, pero se puede suponer que un aumento en el GSD afectaría negativamente a la identificación de pequeños rodales de árboles caídos, pudiéndose identificar solamente aquellas teselas de tamaño más grande.

Si bien la rapidez en la disponibilidad de los datos se vio frenada por la proximidad de la zona de estudio al aeropuerto de Barcelona, hecho que complicó la obtención de los permisos

para volar y que consecuentemente retardó la disponibilidad de los datos, las expectativas de coste-precisión de la tecnología utilizada pudieron ser verificadas. El procedimiento utilizado fue de utilidad en la asistencia al objetivo de retirada de elementos de riesgo en el medio natural del Baix Llobregat.

Agradecimientos

El autor agradece el soporte técnico brindado por el personal del ICC, y a Cristina Vega (UdL) por los comentarios en la revisión.

Referencias

- ALAMÚS, R., KORNUS, W., PALÀ, V., PÉREZ, F., ARBIOL, R., BONET, R., COSTA, J., HERNÁNDEZ, J., MARIMON, J., ORTIZ, M. À., PALMA, E., PLA, M., RACERO, S. & TALAYA, J. 2005. Validation process of the ICC digital camera. ISPRS Workshop «High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information», Hannover, Germany, May 17-20 2005.
- COLOMER, J.L. 2005. Cámaras fotogramétricas digitales, altímetros láser y captadores hiperespectrales: una nueva generación de sensores aerotransportados para la geoinformación. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Colombia, agosto 2005.
- DIARIOVASCO.COM DIGITAL VASCA, S.L.U. 2008. Hemeroteca. <http://www.diariovasco.com> (último acceso a 30 de enero de 2009).
- GENERALITAT DE CATALUNYA, 2010. Acords de govern del 3 de febrer de 2009. <http://www.gencat.cat> (último acceso a 31 de marzo de 2010).
- GIT FORESTRY CONSULTING. CONSULTORÍA Y SERVICIOS DE INGENIERÍA AGROFORESTAL, 2009. GIT Forestry Consulting's Blog. <http://www.git-forestry.com> (último acceso a 25 de mayo de 2009).
- I.S.M. INTERNATIONAL SYSTEMAP CORP. 2009. Purview. I.S.M. International Systemap Corp, Vancouver BC, Canada.
- JACOBSEN, K. 2005. Photogrammetry and geoinformation trends for large scale mapping. Proceedings of the 1st Annual Map Middle East Conference on Geospatial information and knowledge economy, Dubai, UAE.
- MAIRE, C. & YÉSOU, H., 2003. Storm Forest Damage Mapping Based on VHR InSAR Data. Proceedings of Fringe, 2003. ESA, ESRIN, Italy, December 1-5 2003.
- MILLER, D., QUINE, C. & HADLEY, W. 2000. An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage. *Forest Ecology and Management*, 135: 279-288.
- QUINE, C.P. & BELL, P.D.B. 1998. Monitoring of windthrow occurrence and progression in spruce forests in Britain. *Forestry*, 71(2): 87-97.
- SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA. 2006. Dades d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA). <http://www.meteocat.com> (último acceso a 20 de mayo de 2009).
- SPOT IMAGE S.A. 2008. Images in the news. <http://www.spotimage.fr> (último acceso a 25 de mayo de 2009).
- SWEDISH FOREST AGENCY. 2007. The Storm in Sweden. <http://www.svo.se> (último acceso a 25 de mayo de 2009).

Airborne soil moisture determination at regional level: a data fusion mission approach for Catalan territory

F. Martín^{1*}, J. Corbera¹, J. F. Marchan¹, A. Camps² and A. Aguasca³

¹ *Instituto Cartográfico de Cataluña. Parque de Monjuïc. 08038 Barcelona*

² *Passive Remote Sensing Group. Campus Nord UPC*

³ *Active Remote Sensing Group. Campus Nord UPC*

Abstract

Water cycle is considered to be a key factor in the study of climate change and its associated effects on society. In turn, soil moisture holds an important share of the overall water cycle. Is for this reason that at present missions like ESA's SMOS, and future NASA's SMAP aim to estimate soil moisture at a global level, offering spatial resolutions of 40 km for SMOS, and 10 km for SMAP. Such resolutions do not adequately match at a regional/local levels. At this point the Supporting Centre of the Catalan Earth Observation Program (PCOT), within the structure of the Cartographic Institute of Catalonia (ICC) and with the collaboration of the Remote Sensing Laboratory of the Polytechnic University of Catalonia (RSLAB UPC), runs the HUMID program to retry the soil moisture at a regional level based on radiometry and data fusion with VNIR and thermal sensors on board ICC airborne platforms.

Key words: soil moisture, remote sensing, passive microwave, L band, data fusion, VNIR, thermal sensor.

Resumen

Estimación de la humedad del suelo con avión a nivel regional: una aproximación para una misión de fusión de datos en el territorio catalán

El ciclo del agua está considerado como uno de los factores claves en el estudio del cambio climático y sus repercusiones en la sociedad. A su vez, la humedad del terreno juega un papel importante dentro del ciclo del agua. Es por ello que en la actualidad se están aplicando recursos en misiones como SMOS de la ESA y la futura SMAP de la NASA, las cuales están centradas en calcular la humedad del terreno a nivel global, ofreciendo una resolución espacial de 40 km para el caso de SMOS, y de 10 Km para el de SMAP. Dichas resoluciones no se ajustan suficientemente a escalas a nivel regional/local. En esta situación el Centro de Soporte del Programa Catalán de Observación de la Tierra (PCOT), dentro de la estructura del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC), ha puesto en marcha con la colaboración de RSLAB UPC, el programa «HUMID» para la recuperación de la humedad del suelo a nivel regional/local, basado en la radiometría y el data fusión con sensores VNIR y térmicos, a bordo de los aviones del ICC.

Palabras clave: humedad del terreno, teledetección, microondas pasivas, banda L, data fusion, VNIR, sensor térmico.

Introduction

Changes in climate seem already evident. In the Occidental Mediterranean average temperatures have increased during the XX century.

During the second part of the XX century, especially in the middle of 70's, this trend has accelerated, being in some places higher than 1.6°C for the 1975-1998 period. In Spain temperatures have risen more than 0.4°C in winter and 0.7°C in summer. In Catalonia average temperatures during this period have suffered an increase of 0.88°C, whereas maxima have

* Corresponding author: francisco.martin@icc.cat
Received: 02-07-10; Accepted: 10-05-11.

increased in 1°C and minima in 0.75°C (Brunet *et al.*, 2005).

What is more, previsions for the future are not very optimistic (severe scarcity of fresh water): it is estimated that during next century temperatures will continue to increase (between 1.4°C and 6°C). At the same time precipitations are expected to increase at the humid tropics and at high altitudes, whereas at middle and low altitudes they are expected to drop. This will result in extreme climatic events, such as droughts, floods, tornados, etc, to occur with higher frequency and intensity (Philipona *et al.*, A1.GR1 32:L19809; Sigro *et al.*, 2004; Ayala-Carcedo *et al.*, 2004).

An example of this could be the episode of drought suffered in southwest China, which caused economical loses of 952 millions of dollars. The lack of fresh water affects stockbreeding and in special for the agriculture where more than two million hectares of crops (81.7% of the total) were affected by drought producing a fall of more of the 40% in the production of crops.

A better understanding of the water cycle will improve forecasting these episodes. To do so soil moisture is a key parameter, also very useful to improve sensible management of a scarce resource such as water.

For this reason at present the scientific community is dedicating a lot of effort to this topic. Fruit of it are the recent SMOS mission launched by ESA, and the future SMAP mission which NASA plans to launch in 2013. Both are focused in the retrieval of soil moisture (SM) and ocean salinity.

Soil moisture is responsible of water exchange and energy fluxes between Earth's surface and atmosphere. More specifically, evaporation, infiltration and runoff are driven by soil moisture, and in the vadose zone it is in charge of the water absorbed by vegetation. Thus, soil moisture is an important component in the hydrologic cycle.

SMOS and SMAP missions will offer continuous measurements of soil moisture and ocean salinity with a revisit time between 3 and 5 days, and a spatial resolution of some 40 km for SMOS (Kerr *et al.*, 2001) and 10 km for SMAP (Njoku *et al.*, 2009).

These performance parameters are useful to model global circulation, but cannot be used for

local applications. For example, in scenarios such as Catalonia, where temperatures have increased and precipitation has remained constant, making the level of evapotranspiration to increase, and producing situations of high hydrological stress. In situations like this, making an optimal use of fresh water is crucial for different reasons. The first one is because fresh water is a scarce resource, and the second one is because a bad use of the fresh water implies negative repercussions in the harvests (currents and future) in terms of quality and quantity.

It is within this context that the Supporting Center for the Catalan Earth Observation Program (PCOT), considering the need of acquiring specific data for regional applications, has envisioned an airborne soil moisture mission program: HUMID, supported by the Spanish Ministry of Science and Innovation as the RADERO program (PTQ-09-01-00535).

PCOT is conscious that Spain is prone to suffer drought episodes. In 2009 they affected almost 40% of the country, where the major problems were found in Catalonia, Valencia, Murcia, and Andalucía (Mediterranean shore). In these territories water reservoirs stored less than 30% of their overall capacity. In Catalonia, for instance, water flowing through rivers decreased a 5%, and the impact on the GDP has been of 7.7%, according to information supplies by Environmental Department of Catalonia.

In order to develop HUMID, ICC/PCOT benefits from the more than 20 years of experience in aircraft missions of the Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC, Official Mapping Agency of Catalonia), as well as of the availability of several remote sensing sensors, such as a «thermal sensor» or «hyperspectral sensor», along with a good scientific advisory aboard. All this shall allow obtaining soil moisture maps with improved spatial resolution and minimized vegetation and roughness impact.

To do so HUMID relies on a «data fusion» approach, combining L-band radiometric measurements (under development by an agreement between RSLAB-UPC and ICC) with two optical sensors, the «CASI» (0.75-1.4 µm) and «TASI» (8-11.5 µm), to improve spatial resolution and minimize vegetation and roughness-induced errors. Both sensors belong to and are operated by ICC onboard their airplanes. Fi-

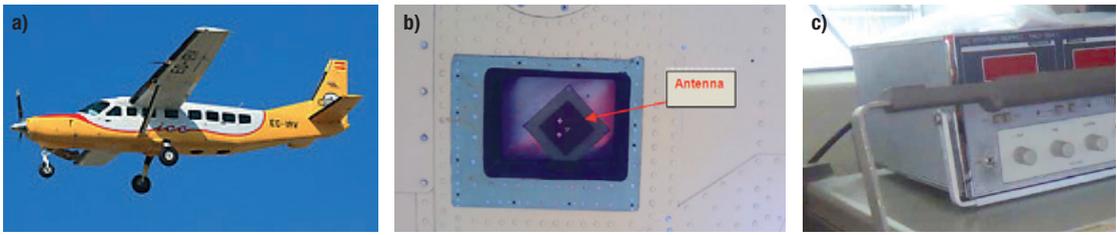


Figure 1. a) ICC aircraft, b) Radiometer mounted on ICC aircraft, and c) Spectrum of the radiometer measured.

Figure 1 shows the aircraft that will be employed in the different campaigns as well the radiometer and its spectrum.

Data fusion approach

The HUMID approach has been planned in order to obtain the best results with the technology and sensors available to PCOT, disregarding solutions requiring non-available technology, models and taking into account user's needs. PCOT has committed significant efforts to address these latter issues.

Theoretical background

HUMID relies on the capability of radiometry for estimating soil moisture. A radiometer is a passive microwave sensor, which is capable of measuring the radiation emitted by the surveyed surface. All matter emits energy in form of electromagnetic radiation. The amount of radiation emitted depends, among other aspects, on the dielectric properties, heavily determined by water content, since dielectric constant exhibits a large contrast between that of liquid water and that of a dry soil. So, whereas the real part of the dielectric constant of water is approximately 80, the real part of the dielectric constant of a dry soil is only around 3-5. A radiometer takes advantage of the fact that moisture, increasing the soil dielectric constant, decreases its overall emissivity.

The envisioned radiometer will measure at L-band for several reasons, the most important being that this band is the most sensitive to moisture content at the same time that is less affected by the presence of vegetation and roughness than higher bands (C or X bands, for

instance) are. At the same time the penetration depth at this band is higher (Jackson *et al.*, 1983; Paloscia *et al.*, 1993).

But there are many aspects that must be improved. The fact that L-band is more robust to vegetation and roughness effects does not imply that the presence of these elements does not affect the measurements taken. What is more, under certain circumstances they can fully mask the soil moisture signature.

At the same time the coarse spatial resolution offered by the L-band radiometer is another issue that must be improved.

The model

The limitations mentioned previously point out that using only the L-band radiometer will not yield satisfactory enough results. In fact, emissivity (e_q) depends on both brightness temperature (TB) and surface temperature (Ts):

$$T_B(\theta, p) = e_q(\theta, p) T_s \quad [1]$$

Therefore it is straightforward that in addition to TB it is necessary to retrieve TS. This can be done by means of a thermal sensor such as the TASI that ICC owns and operates. Such an instrument, with its finer spatial resolution, not only will obtain TS but also will improve the overall spatial resolution of the SM product.

As it has been mentioned before, surface roughness and more intensely vegetation disturb the measurements taken by the radiometer. Thus, it is necessary to take into account both effects in our model.

Soil roughness can be accounted modifying the Fresnel reflectivity coefficient as follows:

$$\Gamma_s(\theta, p) = \Gamma_s(\theta, p) * \exp(-h_s) \quad [2]$$

where h_s is an adimensional parameter usually determined empirically, which determines the soil roughness ($h_s = 0$ for smooth soils, $h_s = 0.2$

for an intermediate case, and $hs = 0.4$ for rather rough ones).

The case of the vegetation-covered soil can be modeled by the so-called $\tau - \omega$ model, where expression [1] is reformulated taking into account the effect of the vegetation.

$$T_b(\theta, p) = [1 - w(\theta, p)] [1 - \gamma(\theta, p)] [1 + \Gamma_s(\theta, p)\gamma(\theta, p)] T_V + [1 + \Gamma_s(\theta, p)] \gamma(\theta, p) T_E + T_b^{SKY\downarrow}(\theta) \Gamma_s(\theta, p) \gamma(\theta, p)^2 \quad [3]$$

where $w(\theta, p)$ is the albedo and describes the scattering of the soil emissivity by the vegetation (typical values vary between 0.04 and 0.13, and at L-band it can be neglected), $\Gamma_s(\theta, p)$ is the Fresnel reflectivity, T_V refers to the temperature of the vegetation, and T_E is the effective soil temperature (it can be assumed to be equal).

The downwards atmospheric and galactic brightness temperature $T_b^{SKY\downarrow}(\theta)$ is very small after the reflection on the ground and the attenuation through the vegetation layer (Pellarin *et al.*, 2003), and consequently will be neglected.

On the other hand $\gamma(\theta, p)$ is referred to as the transmissivity of the vegetation and can be expressed as:

$$\gamma(\theta, p) = \exp[-\tau(\theta, p) / \cos\theta] \quad [4]$$

where $\tau(\theta, p)$ is the optical depth, and can be expressed as (Jackson and Schmugge *et al.*, 1991):

$$\tau = b * VWC \quad [5]$$

In [5] VWC stands for Vegetation Water Content, and it can be computed by means of the NDVI (Normalized Differential Vegetation

Index), based on the NIR and RED bands. It can be measured by means of a hyperspectral sensor such as the CASI, also owned and operated by ICC, as:

$$NDVI = NIR - RED / NIR + RED \quad [6]$$

The model explained so far still has a weak point: the NDVI parameters are not suitable to account for all scenarios. More specifically, in presence of dense vegetation the NDVI tends to saturate and its estimation will not be useful. An alternative to the NDVI is the NDWI (Normalize Difference Water Index), which is more sensitive to VWC, in special in situations of dense vegetation. It is based on the NIR and SWIR bands, instead of the RED and NIR bands used by the NDVI, as:

$$NDWI = NIR - SWIR / NIR + SWIR \quad [7]$$

In order to improve soil information without the availability of SWIR bands a complementary approach is needed.

It seems clear that the solution consists in modifying the design of the radiometer. Equations [2], [3] and [4] are strongly dependent on the incidence angle and polarization. Thus, increasing the incidence angle means that losses increase, and thus vegetation effects are more critical for higher angles than for lower ones.

Figure 2 show the influence of incidence angle and polarization (Piles *et al.*, 2010).

Combining equations [2], [3], [4], [5], and taking into account the empirical relationship between Fresnel reflectivity coefficient and soil moisture (Saleh *et al.*, 2006):

$$\log[\Gamma_s(\theta, p)^*] = A(\theta, p) \log(w_s) + B(\theta, p) \quad [8]$$

where $\Gamma_s(\theta, p)^*$ is the soil reflectivity, w_s is the

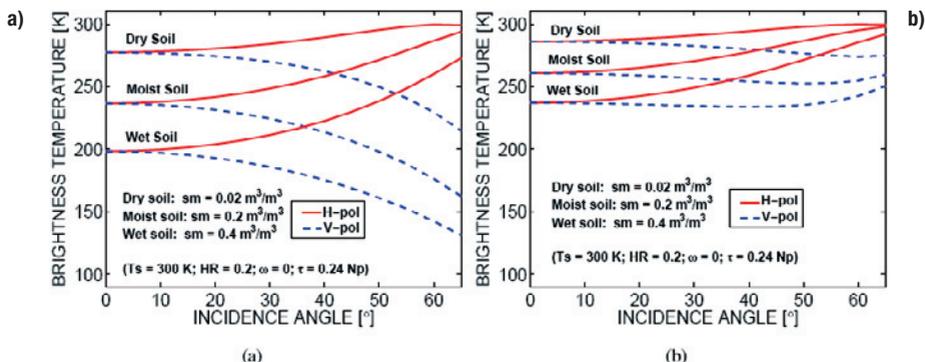


Figure 2. Brightness temperature dependence with incidence angle and polarization for (a) bare soil and (b) vegetation-covered soil.

soil moisture and $A(\theta, p)$ and $B(\theta, p)$ are coefficients in function of the soil type, soil temperature, and the configuration of the observation.

And making different assumptions, soil moisture could be expressed as a function of incidence angle or polarization (Saleh *et al.*, 2006; Wigneron *et al.*, 2004; Wigneron *et al.*, 2004),

$$w_s = \exp\{a \log[1 - e(\theta_1, p)] + b \log[1 - e(\theta_2, p)] + c\} \quad [9]$$

$$w_s = \exp\{a \log \log[1 - e(\theta, p)] + b \log \log[1 - e(\theta, p)] + c\} \quad [10]$$

If using equation [9] it would be a good choice a difference of 30° between both angles according to a vegetation coverage, where 15° and 45° respectively as for example will be work pretty well (Wigneron *et al.*, 2004). Considering equation (10), an incidence angle of 50° would be optimal (Wigneron *et al.*, 2004).

User's needs

HUMID program, as maintained in the introduction, is focused at regional/local scales, with the purpose of covering user's needs at this scale at the same time that it can be complement to the current satellite missions.

In this sense the products offered by HUMID have clearly three main objectives: The first one is be a tool to improve manage of fresh water. Efficient use of fresh water is indispensable for agriculture, since an inadequate matter supply affects both quantity and quality of harvest. Crops consume 70% (80% in semiarid regions) of total fresh water resources. In this scenario two issues are fundamental for the generated soil maps: The first one is related to the spatial resolution, since it is necessary to improve the current spatial resolutions, due to the high variability that can present soil moisture. At the same time it is necessary to ensure a robust model, which guarantees the most reliable results, particularly in presence of vegetation.

HUMID data fusion approach provides a high spatial resolution at the same time that the robustness of the data is ensured. In a first approximation the information provided by the

thermal sensor among with the VNIR sensor allows to obtain a first soil moisture product, by means the tau omega model. This first product is recovered at the radiometer resolution, which is around of 250 m, insufficient for the goal here established. Then soil moisture can be downscaled to the resolution offered by the optical sensors (around few meters), helping the radiometer data to improve the radiometric resolution. So soil moisture maps at few meters in a first approach are expected. At the same time HUMID allows a product that can adapted to the requirements of the end user, where he can select the data in which the flight campaigns takes part or the extension of the area. In this sense HUMID, flying at 1,000 meters and at constant speed of approximately 200 km/h it can be cover extended crop areas.

HUMID also proposes other products, such as hydrological maps, where spatial resolution becomes less restrictive than for water management in agriculture. In this case flights at high altitude are proposed for cover more extended areas, and making 4/5 flights per year can be enough to study the hydrological profile of Catalonia.

In sum, products proposed by HUMID shall improve fresh water management, help in hydrological studies and be an useful tool for forest fire risk assessment

Current status

At present a simulator is under definition to validate the performance of the different models as well the behavior of our sensor. Next a flow chart of the implemented simulator is shown:

Where first is simulated an arbitrary surface with an initial boundary conditions, and then is simulated the behavior of this surface in terms of emissivity. Finally is analyzed the trend of our radiometer and the soil moisture recovered, as well the improvement in the spatial resolution achieved by means the data fusion

For an initial case is working assuming thermal equilibrium and not vegetation conditions. Several simulations show the trend of the radiometer as well as the effects of the roughness on the measures.

As follows is showed a preliminary example of the running of the simulator commented previously. It is characterized for simulate an area of 1,200*1,200, with a soil texture of 2% Sand, 66% Silt and 32% Clay. The simulation showed here, were realized for an altitude of the flight

of 750 m. Figure 3 show the spatial distribution of the soil moisture from the surface generated.

Figure 4 shows the soil moisture that in the condition previously defined our radiometer will be capable of retry. It can be appreciated the coarse spatial resolution obtained in this

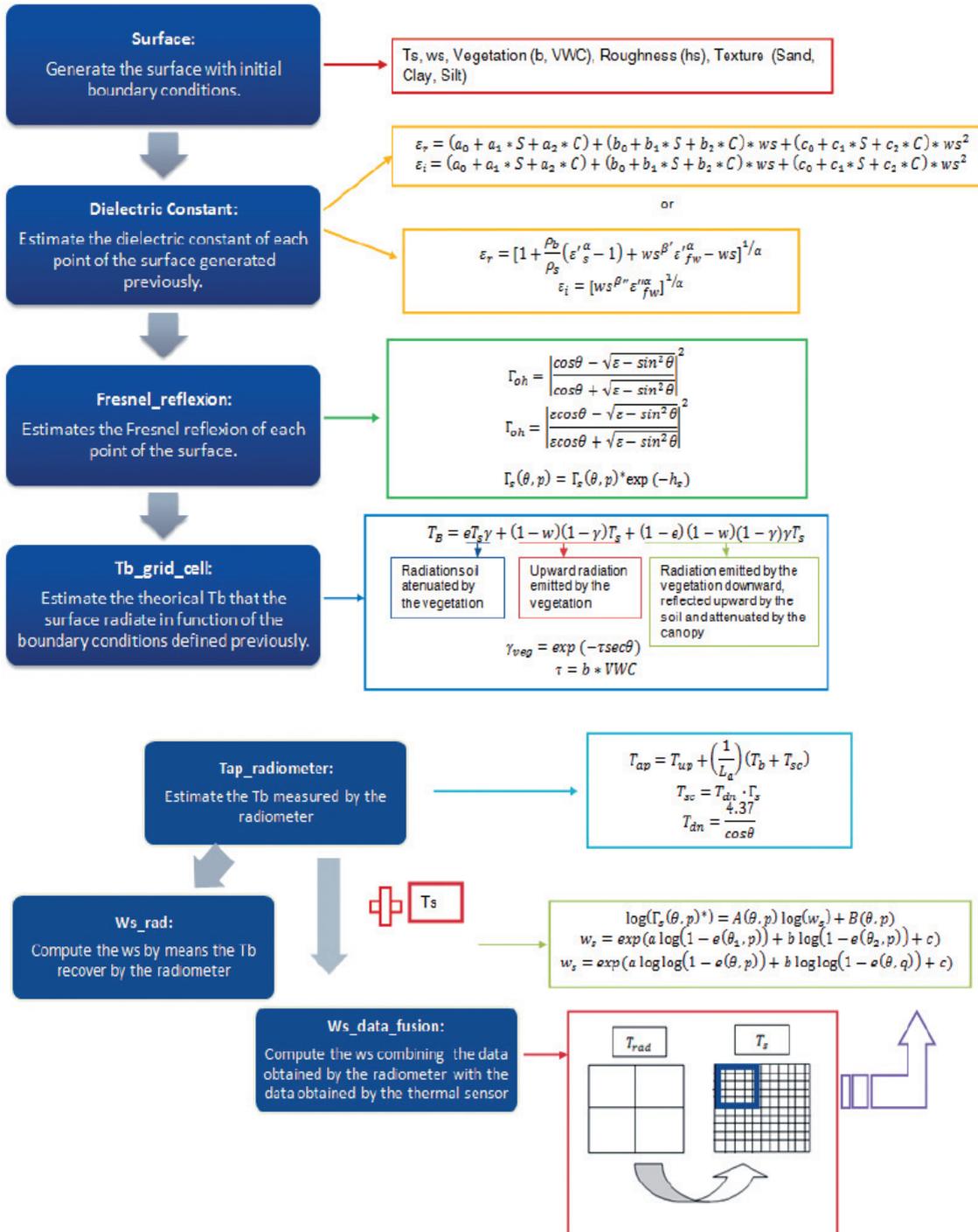


Figure 3. Flow Chart of HUMID simulator.

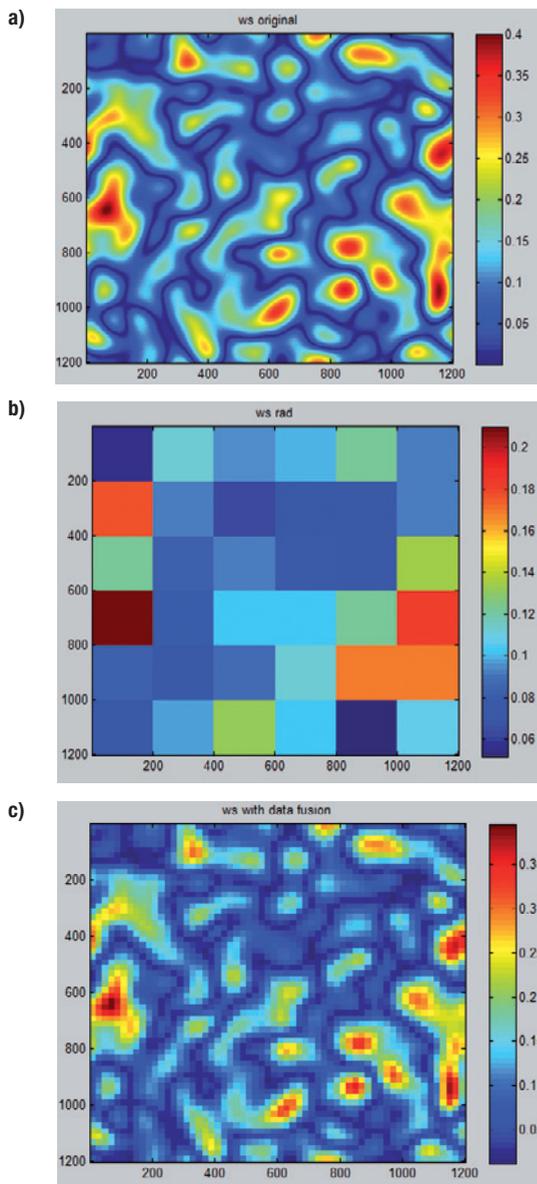


Figure 4. a) Initial soil moisture conditions for an arbitrary surface simulated, b) Soil moisture retrieved with the radiometer, c) Soil moisture by data fusion approach.

case (200 m), which implies that the level of accuracy obtained will not very high. The average error is around 6% which in general terms is not a bad value.

Figure 5 shows the soil moisture retrieved then of apply the data fusion approach. In this case the spatial resolution is of 20 m, improving thus the spatial resolution in a factor of 10. At the same time the accuracy obtained is higher that in the last case obtaining an average error less than 2%, being very positive.

Is important to stretch that the results here showed are realized for the simples case, is to said for a bare and smooth surfaces (if its is true that surfaces with roughness are tested and the results obtained has been similar), where thermal equilibrium were assumed too. The idea is enlarge these simulators to conditions of vegetated surfaces to analyze the influence that has, and the behavior of our models.

Future tasks

First aircraft campaigns are scheduled for fall 2010. They will serve to validate the results simulated previously. With this purpose three test sites are suggested as a candidate for realize the flights: Banyoles, Mollerusa and Delta de l'Ebre.

Banyoles is a good candidate since ICC has already undertaken flight campaigns in this area with the CASI sensor, and at the same time satellite imagery is available, so that additional information can be used to perform the SM retrieval.

Mollerusa and Delta de l'Ebre are interesting because both house experimental sites of IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaria), and thus are instrumented. Moreover, UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) has conducted several aircraft campaigns flying an L-band radiometer onboard an UAV over Delta de l'Ebre. Therefore, previous SM data are available.

Conclusions

The present paper has introduced the HUMID program, conceived to address SM issues associated to Catalonia such as fresh water management improvement.

HUMID has been designed in terms of feasibility. To do so, it first detected user's requirements, and then dealt with existing limitations such as vegetation, roughness, coarse resolution... The solution proposed tries to offer the best results taking into account these limiting aspects, but also by considering feasible sensors run at own airborne platform to be operational.

HUMID products will benefit society by improving fresh water distribution, optimizing

crop production, helping weather forecasters, allowing detection of extreme events such as droughts or floods, or assessing forest fire risks.

At present the algorithm and model definition phase is almost completed, including the data fusion algorithm, and the first test flights are scheduled for September 2010, once the test sites are chosen.

References

- AYALA-CARCEDO, F. J. 2004. La realidad del cambio climático en España y sus principales impactos ecológicos y socioeconómicos. *Revista del Aficionado a la Meteorología*, 21.
- BRUNET, M., JONES, P. D., SIGRO, J., SALADIE, O., AGUILAR, E., MOBERG, A., DELLAMARTA, P., LISTER, D., WALTHER, A. & LOPEZ, D. 2005. Spatial and temporal temperature variability and change over Spain during 1850-2003.
- DOBSON, M. C., ULABY, F. T., HALLIKAINEN, M. T. & EL-REYES, M. A. 1985. Microwave dielectric behavior of wet-soil Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23:35-46.
- ENTEKHABI, B., NJOKU, E. G., O'NEILL, P. E., KELLOGG, K. H., CROW, W. T., EDELSTEIN, W. N., ENTIN, J. K., GOODMAN, S. D., JACKSON, T. J., JOHNSON, J., KIMBALL, J., PIEPMEIER, J. R., KOSTER, R. D., MARTIN, N., MCDONALD, K. C., MOGHADDAM, M., MORAN, S., REICHLER, R., SHI, J. C., SPENCER, M. W., THURMAN, S. W., TSANG, L. & VAN ZYL, J. 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5).
- JACKSON, T. J. & SCHMUGGE, T. J. 1983. Remote Sensing of soil moisture from an aircraft platform using passive microwave sensors, *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission (Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983)*. IAHS Publ, 145.
- JACKSON, T. J. & SCHMUGGE, T. J. 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils, *Remote Sens. Environ*, 36: 203-212.
- KERR, Y. H., WALDTEUFEL, P., WIGNERON, J. P., MARTINUZZI, J. M., FONT, J. & BERGER, M. 2001. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 39: 1729-1735.
- NJOKU, E. & O'NEILL, P. 2009. The Soil Moisture Active and Passive Mission (SMAP): Science and Application. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*.
- PALOSCIA, S., PAMPALONI, P., CHIARANTINI, L., COPPO, P., GAGLIANI, S. & LUZI, G. 1993. Multifrequency passive microwave remote sensing of soil moisture and roughness. *Int. J. Remote Sensing*, 14(3): 467-483.
- PELLARIN, T. & CALVET, J. 2003. Influence of atmospheric properties on L-band microwave emission. Soil moisture retrieval by a future space-borne Earth observation mission. ESTEC.
- PHILIPONA, R., DURR, B., OHMURA, A. & RUCKSTUHL, C. 2005. Anthropogenic greenhouse forcing and strong water vapor feedback increase temperature in Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19809. doi: 10.1029/2005GL023624.
- PILES, M., VALL-LLOSSERA, M., CAMPS, A., TALONE, M. & MONERRIS, A. 2010. Analysis of a Least-Squares Soil Moisture Retrieval Algorithm from L-band Passive Observations. *Remote Sens*, 2: 352-374.
- SALEH, K., WIGNERON, J.-P., ROSNAY, P., CALVET, J.-C. & KERR, Y. 2006. Semi-empirical refinements at L-band applied to surface soil moisture retrievals over grass. *Remote Sensing of Environment*, 101: 415-426
- SIGRO, F. J. 2004. Variabilidad espacio-temporal de la Temperatura del aire en Cataluña, Tesis de doctorado. *Universitat Rovira i Virgili*.
- WIGNERON, J.-P., CALVET, J.-C., ROSNAY, P., KERR, Y., WALDTEUFEL, P., SALEH, K., ESCORIHUELA, M. J. & KRUSZEWSKI, A. 2004. Soil Moisture Retrievals From Biangular L-Band Passive Microwave Observations. *IEEE. Geoscience and Remote Sensing letters*, 1(4), Oct. 2004.
- WIGNERON, J.-P., PARDE, M., WALDTEUFEL, P., CHANZY, A., KERR, Y., SCHMIDL, S. & SKOU, N. 2004. Characterizing the dependence of vegetation parameters on crop type, view angle, and polarization at L-band. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 42: 416-425. Feb. 2004.

Aplicación de técnicas de teledetección y GIS sobre imágenes Quickbird para identificar y mapear individuos de peral silvestre (*Pyrus bourgeana*) en bosque esclerófilo mediterráneo

S. Arenas*, J. F. Haeger y D. Jordano

Departamento de Botánica, Ecología y F. Vegetal. Edificio Celestino Mutis, C-4.
Campus de Rabanales. Universidad de Córdoba. España

Resumen

Recientes avances en resoluciones espacial y espectral de imágenes de satélite, así como técnicas de procesado y transformación, están abriendo nuevas posibilidades de análisis de la vegetación a escala muy precisa, con interesantes aplicaciones en la gestión de los recursos naturales. En este trabajo se presentan los principales resultados de un estudio llevado a cabo en Sierra Morena (Córdoba, España) que tuvo como objetivo aplicar y evaluar el potencial de las técnicas de teledetección para discriminar y mapear individuos de peral silvestre (*P. bourgeana*) en un bosque mediterráneo donde la dehesa de encinas (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) es el ecosistema dominante. Se utilizó la alta resolución espacial de las imágenes Quickbird (2,4 metros para la imagen Multiespectral y 0,6 para la Pan-cromática) obtenidas durante el verano de 2008. Dado el tamaño y las características de las copas de peral silvestre, se aplicó un método de corrección atmosférica (FLAASH) y 4 métodos diferentes de fusión «Pan-Sharpening» (Método de Transformación Wavelet «à trous» ponderado, Método Multiplicativo de Gram-Schmidt (G-S), Método de transformación al espacio IHS (Intensidad-Saturación-Brillo) y Metodología de fusión de imágenes Multidirección-Multiresolución (MDMR), para determinar qué procedimiento proporciona los mejores resultados. Finalmente, se evaluó el potencial de las técnicas de clasificación supervisada (Maximum Likelihood) para discriminar y mapear árboles individuales de peral silvestre dispersos por la dehesa de encinas, proporcionando unos valores de precisión global e índice kappa de 80,42% y 78,1%, respectivamente.

Palabras clave: alta resolución, Quickbird, teledetección, métodos de fusión de imágenes, corrección atmosférica, clasificación supervisada, *P. bourgeana*.

Abstract

Application of remote sensing and GIS techniques on Quickbird imagery to identify and mapping wild pear individuals (*Pyrus bougeana*) in Mediterranean sclerophyllous forests

Recent advances in spatial and spectral resolutions of satellite imagery as well as in processing techniques are opening new possibilities of fine scale vegetation analysis with interesting applications in natural resources management. Here we present the main results of a study carried out in Sierra Morena, Cordoba (southern Spain) aimed to assess the potential of remote sensing techniques to discriminate and map individual wild pear trees (*P. bourgeana*) in Mediterranean open woodland dominated by *Quercus ilex* subsp. *ballota*. Satellite imagery of high spatial resolution Quickbird (2.4 m MS/0.6 m Pan) obtained during the summer of 2008 were used, generated by multispectral digital sensors and available for several years in remote sensing applications, allowing detailed observations of vegetation in wavelength bands in the visible and near infrared. Given the size and features of wild pear tree crowns, we applied an atmospheric correction method (FLAASH) and 6 different fusion «Pan-Sharpening» methods [Wavelet «à trous» weighted Transform, Gram-Schmidt (G-S), Hue-Saturation-

* Autor para la correspondencia: b62arcas@uco.es

Recibido: 20-11-10; Aceptado: 27-04-11.

Intensity color transformation (HSI) and Multidirection-Multiresolution (MDMR)], to determine which procedure provides the best results. Finally we assessed the potential of supervised classification techniques (*Maximum Likelihood*) to discriminate and map individual wild pear trees scattered over the Mediterranean open woodland, providing values of overall accuracy and *kappa* of 80.42% and 78.1%, respectively.

Key words: high resolution, Quickbird, remote sensing, fusion methods, atmospheric correction, supervised classification, *P. bourgeana*.

Introducción

Imágenes de satélite de alta resolución espacial (2,4 a 4 m) generadas por sensores digitales multiespectrales a bordo de satélites como IKONOS y Quickbird, permiten observaciones detalladas de recursos naturales en longitudes de onda de las bandas del visible e infrarrojo cercano (Everitt *et al.*, 2007). La teledetección es muy útil en este sentido ya que permite obtener información espacialmente explícita y estadísticamente representativa de variables del ecosistema (Coppin *et al.*, 2004).

La teledetección a partir de imágenes de satélite o fotografías aéreas también ofrece la posibilidad de describir algunos aspectos estructurales y funcionales de los sistemas ecológicos a diferentes escalas (Cabello y Paruelo, 2008). La resolución espacial de estos sistemas ofrece nuevas oportunidades para discriminar unidades de vegetación, tipos de bosque o incluso individuos de distintas especies en bosques mixtos, siendo por tanto una importante herramienta para la gestión y conservación de la biodiversidad. En este sentido, varios estudios han demostrado que muchas especies vegetales de pastizales tienen diferentes firmas espectrales y se pueden distinguir mediante fotografías aéreas en color infrarrojo (Gausman *et al.*, 1977; Tueller, 1982; Everitt *et al.*, 1987; Anderson *et al.*, 1999; López-Granados *et al.*, 2008, 2010). Por otro lado, imágenes de alta resolución espacial también han permitido la identificación y mapeo de árboles individuales o grupos de árboles (Gougeon *et al.*, 1999; Wulder *et al.*, 2000; Culvenor, 2002).

La absorción de energía por los gases, así como su dispersión por aerosoles en la atmósfera puede influir en la respuesta espectral de los objetos y por tanto la energía electromagnética que es recibida por los sensores (Slater, 1980; Chávez, 1988). Muchos algoritmos de co-

rrección atmosférica se han desarrollado para corregir estos efectos y reducir el ruido atmosférico, en particular el efecto de la dispersión atmosférica. Podemos distinguir varias categorías, *substracción de píxel oscuro (pixel darkness subtraction, DOS)* (Chávez, 1975, 1989, 1996), *conversión de radiancia a reflectancia, regresión lineal* (Crippen, 1987) o *modelamiento atmosférico* (Slater, 1980; Kneizys *et al.*, 1988; Gilabert *et al.*, 1994; Rahman y Dedieu, 1994; Frulla *et al.*, 1995; Vermote *et al.*, 1997). La elección de uno u otro método depende de la calidad de los datos disponibles. Por ejemplo, los modelos de corrección atmosférica requieren datos adicionales (presión atmosférica, temperatura, vapor de agua, ozono, tipo de aerosoles, elevación solar, ángulo cenital y sensor de ángulo de visión) para la fecha de interés. En este caso, se puede aplicar el método *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube* o *FLAASH* (ENVI FLAASH, Atmospheric Correction Module, 2009), basado en MODTRAN4, para reducir al mínimo la influencia del ruido atmosférico en las imágenes resultantes.

Para el caso de imágenes multiespectrales y pancromáticas, la fusión de imágenes es una herramienta cuyo principal objetivo es mejorar la calidad global de la imagen resultante mediante la combinación de la información espectral de la imagen multiespectral con la información espacial de la imagen pancromática, tomando ventaja de su carácter complementario (Vrabel, 1996; Vasantha *et al.*, 2000; Lillo-Saavedra y Gonzalo, 2008). Según Varshney (1997) y Lillo-Saavedra y Gonzalo (2006), el concepto de fusión de imágenes se puede ver como la combinación sinérgica de la información de varios sensores o por el mismo sensor en diferentes escenarios (espacial, espectral y temporal).

En el caso de Quickbird, son muchos los trabajos publicados en los cuales se han evaluado

diferentes métodos para la construcción de imágenes multispectrales con alta resolución espacial (Alonso *et al.*, 2004; Zhang y Kang, 2005; Gonzalo y Lillo-Saavedra, 2007). En la actualidad, se dispone de un gran número de metodologías y algoritmos para la fusión de imágenes, basados en técnicas de análisis multiresolución y en diferentes transformadas, siendo estas últimas las más utilizadas. Algunos de éstos métodos corresponden a: Transformaciones de color (*Hue-Saturation-Intensity*), Métodos estadísticos (*Principal Components*), Métodos numéricos (*Brovey, Color Normalized Spectral Sharpening, Gram-Schmidt Spectral Sharpening, Wavelet Fusion*), Métodos combinados (*Ehlers Fusion*), entre otros. Algunos son muy sencillos desde un punto de vista conceptual, como las metodologías basadas en la transformada de *Brovey*, el Análisis de Componentes Principales o la transformada *IHS* (Wald, 2002), contando esta última con una amplia aceptación en las áreas de procesamiento de imágenes debido a su simplicidad conceptual.

En cuanto a la evaluación de la calidad de imágenes fusionadas, se dispone de diferentes métodos e índices de comparación que permiten medir la calidad espacial, la calidad espectral y/o la calidad global. Algunos ejemplos se incluyen dentro de uno de estos grupos: comparaciones visuales, índices estadísticos (*RMSE, Correlación Espectral* (Vijayaraj *et al.*, 2004), *Correlación Espacial* (Zhou *et al.*, 1998), *ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse) espectral* (Wald, 2002) y *espacial* (Lillo-Saavedra y Gonzalo, 2006) ó índices globales de calidad como *Q4* (Alparone, 2004). Wald *et al.* (1997) también propone un protocolo para verificar si un producto fusionado cumple con estas propiedades. Para cada propiedad, primero se lleva a cabo una inspección visual del producto fusionado, comparándolo con el producto original. Esto mostraría las principales desventajas de un método. Estos inconvenientes podrían entonces cuantificarse mediante una evaluación cuantitativa de las discrepancias entre el producto fusionado y el original.

Los métodos de clasificación son comúnmente utilizados en materia de teledetección para extraer y sintetizar la información de los datos espectrales y generar clases discretas que

comparten una característica común, tales como agua, suelo, vegetación, entre otras. En el proceso de clasificación se utilizó un mecanismo de aprendizaje sobre las características espectrales de un grupo de píxeles, para extender la misma información a toda la imagen. En este estudio, se optó por un método de clasificación paramétrica supervisada utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood*) (Aldrich, 1997), mediante el cual el usuario elige un grupo de píxeles que representan cada una de las clases que se utilizan en el proceso de formación de clasificación de imágenes. En este caso hay una elección de las clases de interés *a priori*. Para cuantificar la exactitud de los mapas resultantes con respecto a los mapas verdad-terreno, en teledetección se suele utilizar la matriz de confusión que determina la precisión de un método comparando el porcentaje de píxeles clasificados de cada clase con las clases verdad-terreno verificadas, indicando posteriormente la evaluación correcta y los errores entre las clases estudiadas (Congalton, 1991). Por otro lado, el coeficiente *Kappa* «K» puede medir también la exactitud de un mapa, pero de manera más precisa que la matriz de confusión, ya que incluye dentro del cálculo todos los valores de la matriz y no solamente sus extremos (Congalton, 1991).

El Género *Pyrus*, perteneciente a la familia de las *Rosáceas*, está representado por 20 especies aproximadamente en todo el mundo, tanto en sus formas silvestres, como cultivadas, dando origen estas últimas a un gran conjunto de variedades y razas. Se distribuye geográficamente de forma muy amplia, teniendo representantes tanto en oriente como en occidente. Los perales silvestres, entre los que cabe destacar *P. bourgeana* como el representante más meridional del género en Europa, proporcionan, durante la sequía del verano, valiosos recursos tróficos en forma de hojas succulentas y frutos que son consumidos por una gran variedad de aves y mamíferos, desempeñando un papel importante en el ecosistema y por tanto pudiendo considerarse como una especie «clave».

Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: (1) probar y comparar la aplicabilidad de diferentes métodos de fusión de imágenes

o «Pan-Sharpening» (Método de Transformación *Wavelet «à trous»* ponderado (Lillo-Saavedra y Gonzalo, 2006), Método Multiplicativo de *Gram-Schmidt (G-S)* (Laben y Brower, 2000), Método de transformación al espacio *IHS (Intensidad-Saturación-Brillo)* (Haydan et al., 1982) y Metodología de fusión de imágenes *Multidirección-Multiresolución (MDMR)* (Gonzalo y Lillo-Saavedra, 2007) sobre imágenes de satélite Quickbird con el fin de maximizar su resolución espacial y espectral para su posterior análisis, y (2) evaluar el potencial de estas técnicas a través de clasificación supervisada (*Maximum Likelihood*) para discriminar y mapear perales silvestres (*P. bourgeana*) en el área de estudio.

Material y métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en Sierra Morena (37° 53' 53.53" N y 4° 58' 49.61" W), en la provincia de Córdoba (Andalucía, España). La parcela abarca aproximadamente 230 ha (Fig. 1).

La vegetación que actualmente ocupa el área de estudio es en general el resultado del manejo de los encinares y alcornoques climácicos que antaño cubrían una extensa superficie en Sierra Morena. El factor causal de este manejo ha sido la creciente intervención humana para la obtención de aprovechamientos ganaderos, cinegéticos y agrícolas, principalmente. El ecosistema predominante es la dehesa típica de encinas (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) dispersas entre pastizales de una alta diversidad. Quedan escasos enclaves y de superficie

limitada donde aún se conservan formaciones de bosque mediterráneo prístino o al menos de estructura similar. Son las denominadas «manchas», «monte alto» o «monte de cabeza» formadas por arbustos de hoja perenne que pertenecen a varias familias (*Cistaceae*, *Labiatae*, *Rosaceae*, *Ericaceae*, *Anacardiaceae*, *Aristolochiaceae*). Una sección del área de estudio la constituye un olivar (*Olea europaea*) de producción tradicional, en la actualidad abandonado. Pese a tener un aprovechamiento ganadero de ovino en extensivo, y de forma muy relictiva, caprino, el manejo se enfoca principalmente al uso cinegético (ciervos y jabalíes).

Especie objeto de estudio

P. bourgeana (Fig. 2), también conocido como «peral silvestre», «piruétano» o «guadaperero», al que se le han adjudicado varios homo- y heterotipos, fue descrito por primera vez por Joseph Decaisne (Decne, 1871-1872), siendo este el nombre aceptado por la comunidad científica hasta el momento.

Es un pequeño árbol caducifolio de hasta 10 m de altura, con una copa amplia e irregular, espinoso, con una corteza grisácea agrietada longitudinalmente. Hojas ovadas a orbiculares, de margen generalmente serrulado, con pecíolos entre 13-40 mm. Esta especie se restringe

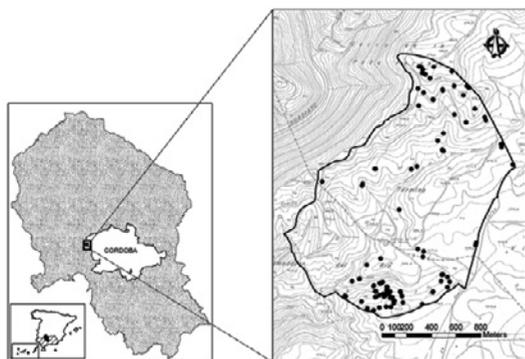


Figura 1. Localización de la zona de estudio.



Figura 2. Peral silvestre (*P. bourgeana*).

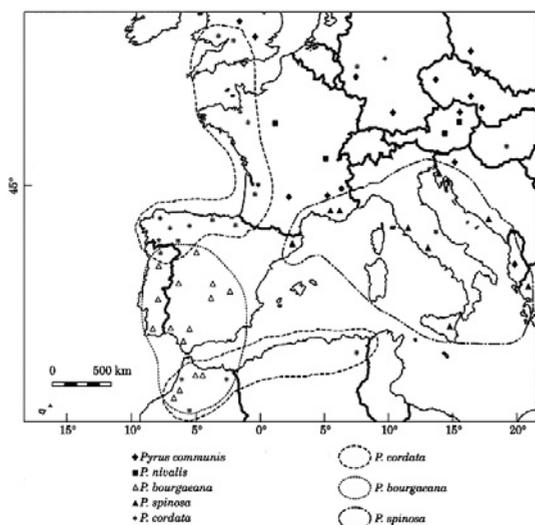


Figura 3. Área de distribución y localización de los representantes del género en Europa.

a la mitad sur de la Península Ibérica y el Norte de África (Aldasoro *et al.*, 1996) (Fig. 3).

Los perales silvestres proporcionan valiosos recursos tróficos en forma de hojas suculentas y, más importante, grandes cosechas de frutos durante la sequía del verano que son consumidos por una gran variedad de mamíferos (ciervo, jabalí, zorro, tejón, gineta, entre otros.), así como varias especies de aves (arrendajo, paloma torcaz, rabilargo, entre otros). El peral silvestre desempeña un papel importante en el ecosistema y por tanto podría considerarse como una especie «clave». A pesar de esto, apenas se conoce sobre la biología y ecología de este árbol, con sólo dos artículos publicados en las últimas décadas (Fedriani *et al.*, 2010). En el área de estudio los perales comienzan a producir nuevas hojas a mediados de marzo, perdiendo la mayoría de ellas a principios de junio. Se quedan casi sin hojas durante el verano a la vez que va aumentando su producción en frutos. Una descripción completa se puede encontrar en la Flora Ibérica (1989).

Muestreo y toma de datos

Se construyó un detallado sistema de información geográfica (SIG) de la parcela de estudio con ayuda de softwares específicos (ArcView 3.2 y ArcGis 9.3, 2008), sobre fotografía aérea de 0,5 × 0,5 metros (Consejería de Medioam-

biente, Junta de Andalucía, 2004). Se fueron añadiendo diferentes capas generándose gran volumen de información de diversos campos. Imágenes con cuadrículas de 50 m × 50 m e impresas a gran escala, permitieron realizar un muestreo exhaustivo en campo, obteniéndose un censo completo de los perales silvestres en la parcela de estudio (122 árboles). Cada árbol con un diámetro de tronco en la base \geq de 5 cm, se identificó y se le asignó un código único. Mediante un receptor diferencial de posicionamiento global (Trimble con sistema Pathfinder Pro XRS) se obtuvo la posición en el espacio de cada individuo, proporcionando coordenadas sub-métricas. Se midieron sus alturas, así como la copa y el diámetro de tronco a la altura del pecho. Además, de cada individuo se extrajeron dos cilindros o testigos (cores) de madera usando una barrena extractora (Haglöf, Suecia).

Imágenes Quickbird

Conocida la fenología de las especies implicadas en el estudio, tanto perennes como caducifolias, se realizó una revisión de las imágenes de Quickbird disponibles de archivo para escoger una escena adquirida lo más cercana posible a primavera, época en la que la mayoría de las especies se encuentran en su máximo nivel de foliación. Al no existir una imagen acorde con estas condiciones, se escogió una aproximada, a la espera de adquirir nuevas imágenes de primavera. Así pues, se obtuvo un producto BUNDLE (PAN0.6 m + MS2.4 m), de 25 km², tomado el 15 de julio de 2008. La imagen de tipo multispectral tiene resolución radiométrica de 16 bits, 2,4 m de resolución espacial y 4 bandas espectrales (azul, 450-520 nm; verde 520-600 nm; rojo, 630-690 nm; infrarrojo cercano, 760-900 nm). La imagen del canal pancromático, de resolución radiométrica de 16 bits y 0,6 m de resolución espacial, comprende una sola banda espectral en el rango de 450-900 nm (Fig. 4).

Corrección atmosférica

Los valores digitales de las imágenes de satélite Quickbird de cada píxel en el TOA (*Top*

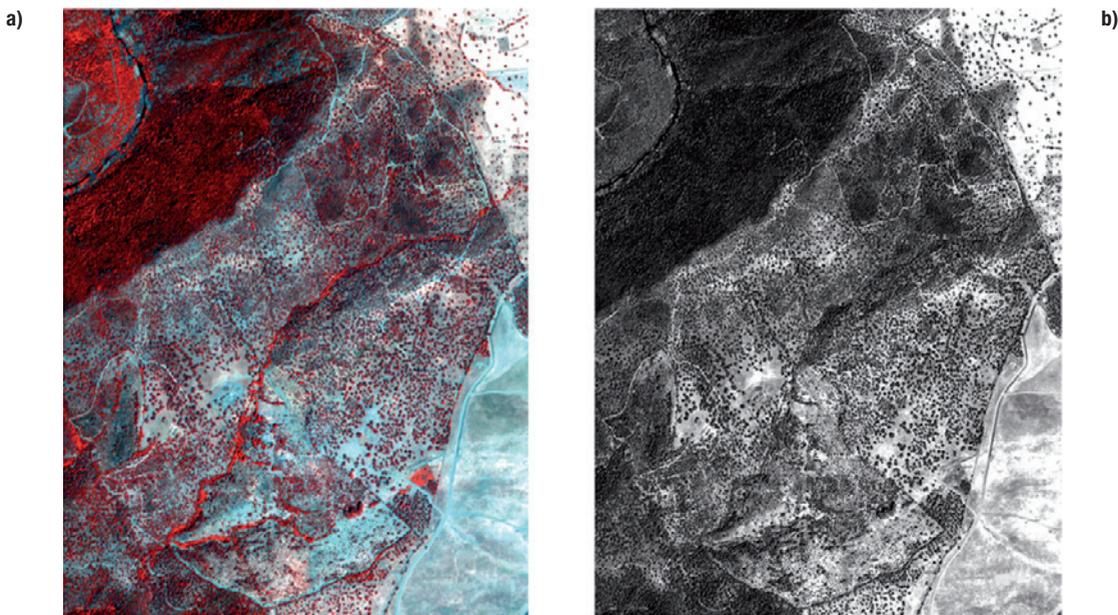


Figura 4. Composición en falso color infrarrojo (NIRGB) de (a) imagen multiespectral (MS) y (b) imagen pancromática (PAN).

of Atmosphere) se transformaron a valores de radiancia espectral (W/m^2sr). Posteriormente se obtuvieron los valores de radiancia espectral media en la parte alta de la atmósfera. Para este propósito se utilizaron los algoritmos disponibles en DigitalGlobe, Inc. (2003). Seguidamente, se transformaron los valores de radiancia a reflectancia aparente con el fin de expresar los resultados en valores físicos. Estos cálculos permiten transformar los valores originales de cada imagen en parámetros físicos, permitiendo así que sean comparables en el tiempo, aún bajo condiciones atmosféricas diferentes (Chuvienco, 1996).

Por último, la reflectancia en superficie se obtuvo con la siguiente expresión,

$$R_{Pixel, Band} = L_{Pixel, Band} d^2 \pi / E \cos \Phi \quad [1]$$

siendo $L_{Pixel, Banda}$ la radiancia espectral antes calculada, d es la distancia entre la Tierra y el Sol en unidades astronómicas, E es la irradiancia solar espectral y Φ es 90 menos el ángulo de elevación solar en el momento de la adquisición de la imagen.

El software ENVI V4.6 ofrece diferentes modelos de corrección atmosférica. Cuando todos los parámetros climáticos para la imagen están disponibles (presión, temperatura, vapor de agua, ozono, tipo de aerosoles, elevación solar, ángulo cenital, entre otros.), es posible aplicar

el método *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis technique of Spectral Hypercube* o «FLAASH» (ENVI FLAASH, Atmospheric Correction Module, 2009) que incorpora el código de transferencia de radiación MODTRAN-4. Se basa en códigos y algoritmos probados, únicos para cada imagen, proporcionando resultados muy precisos. FLAASH ofrece un alto nivel de detalle tanto para las imágenes hiper como multiespectral que operan en el rango espectral de 0,35 a 2,5 micrómetros.

Fusión de imágenes

Para este trabajo, se ha llevado a cabo un estudio de los diferentes métodos de fusión implementados en ENVI V4.6 y ImageJFUSION (Laboratorio de Teledetección, UPM, 2007-2008), para escoger aquél que proporcionase los mejores resultados en cuanto a calidad visual, espectral y espacial. Imágenes multiespectrales Quickbird (2,4 m) se fusionaron con imágenes pancromáticas (0,6 m) mediante un proceso de «Pan-Sharpning». «Pan-Sharpning» es una técnica de fusión a nivel de píxel que describe un proceso de cambio de un conjunto de imágenes multiespectrales de baja resolución espacial (gruesa) a imágenes en color de alta resolución espacial (fina), mediante

la fusión con una imagen co-georegistrada de resolución espacial fina en blanco y negro (pancromática) de la misma zona. A continuación, se aplicaron los siguientes métodos de fusión de imágenes: Método de Transformación *Wavelet «à trous»* ponderado, Método Multiplicativo de *Gram-Schmidt (G-S)*, Método de transformación al espacio *IHS (Intensidad-Saturación-Brillo)* y Metodología de fusión de imágenes *Multidirección-Multiresolución (MDMR)*.

Un factor importante a considerar antes de la fusión de las imágenes es la elección de la técnica de remuestreo. Para este trabajo, hemos optado por el método de *Convolución Cúbica*. Es una técnica de muestreo más riguroso que considera los 16 píxeles más cercanos (matriz de 4×4) en la imagen original, que son los más cercanos al nuevo píxel. Los niveles digitales de estos 16 píxeles se sintetizan utilizando un cálculo polinomial.

Finalmente, se extrajo una imagen multiespectral con resolución a escala pancromática (0,60 metros), manteniendo los datos espectrales originales de longitud de onda media y ancho de banda efectivo.

Medidas de la calidad de las imágenes fusionadas

La calidad de las imágenes es extremadamente dependiente del observador y también de la aplicación temática utilizada, siendo necesarios criterios matemáticos más allá de la mera inspección visual. Wald *et al.* (1997) establecieron algunas propiedades para las imágenes fusionadas: 1) cualquier imagen fusionada, una vez degradada a su resolución original, debe ser lo más similar posible a la imagen original. 2) Cualquier imagen fusionada debe ser lo más similar posible a la imagen original que el sensor correspondiente debe observar con la mayor resolución espacial. 3) El conjunto de imágenes fusionadas multiespectrales debe ser lo más similar posible al conjunto de imágenes originales multiespectrales que el sensor correspondiente debe observar con la mayor resolución espacial.

Como ya se ha dicho, existen diferentes formas de evaluar la calidad de las imágenes fu-

sionadas: comparaciones visuales, índices estadísticos, correlaciones espaciales, entre otros. En este trabajo se han aplicado diferentes parámetros para evaluar tanto la calidad cualitativa como la cuantitativa de las imágenes fusionadas. Por un lado, se siguió en parte el protocolo propuesto por Wald *et al.* (1997), para evaluar la calidad de los resultados de los diferentes métodos. Por otra parte, varios estadísticos fueron seleccionados para comparar la calidad espectral (*ERGAS* espectral) y espacial (*ERGAS* espacial) de las imágenes fusionadas.

Los datos utilizados para evaluar los métodos de fusión descritos anteriormente, corresponden a una escena recortada de la imagen Quickbird original (pancromática y multiespectral), con las dimensiones de la parcela de estudio (3.200×3.700 píxeles).

Para una primera comparación visual entre las imágenes originales y las imágenes sintetizadas, estas imágenes fusionadas fueron degradadas a la resolución de la imagen original (798×920 píxeles). Por otro lado, la misma comparación se realizó entre las imágenes de más alta resolución espacial (0,60 cm). Después, se compararon las bandas espectrales de cada método de fusión con las bandas espectrales de la imagen original con una resolución de 2,4 cm, utilizando diferentes parámetros estadísticos (diferencia entre los valores medios (bias), varianza, desviación estándar y el error cuadrático medio (RMS). El *bias*, o sesgo, es la diferencia entre las medias de la imagen original y la imagen sintetizada. La diferencia en las varianzas, es la varianza de la imagen original menos la varianza de la imagen sintetizada. La desviación estándar de la imagen diferencia, así como su valor respecto a la media de la imagen original. Globalmente indica el nivel de error en cualquier píxel. Idealmente, este debe ser nulo. El error cuadrático medio (RMS, su acrónimo en inglés) es la raíz cuadrada del bias al cuadrado más la desviación estándar al cuadrado. Y finalmente, el coeficiente de correlación entre la imagen original y la sintetizada. Esto muestra la similitud a pequeña escala entre la imagen original y la fusionada.

Como un índice que mide la calidad espectral de la imagen fusionada, el *ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse)*

se) (Wald, 2000) fue seleccionado por su uso extensivo. Otro índice introducido para evaluar la calidad espacial de las imágenes fue el índice *ERGAS* espacial (Lillo-Saavedra y Gonzalo, 2006). Para ambos casos, definidos por las ecuaciones 2 y 4, respectivamente, mientras más bajo sea el valor de *ERGAS*, mejor es la calidad de la imagen fusionada (Wald, 2000, 2002).

$$ERGAS_{\text{espectral}} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_{\text{bandas}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{bandas}}} \left(\frac{RMSE_{\text{espectral}}(\text{Banda}_i)^2}{(MULTI_i)^2} \right)} \quad [2]$$

donde *h* y *l* representan las resoluciones espaciales de las imágenes PAN y MUL, respectivamente, N_{Bandas} es el número de bandas de la imagen fusionada, $MULTI_i$ es el valor de radiancia de la banda i^{th} (i-ésima) de la imagen MULTI y *RMSE* es definido como:

$$RMSE(\text{Banda}_i) = \frac{1}{NP} \sqrt{\sum_{k=1}^{NP} (MULTI_i(k) - FUS_i(k))^2} \quad [3]$$

donde *NP* es el número de píxeles de la imagen fusionada y FUS_i representa la banda i^{th} (i-ésima) de la imagen fusionada.

La definición del *ERGAS* espacial está inspirada en el *ERGAS* espectral:

$$ERGAS_{\text{espacial}} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_{\text{bandas}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{bandas}}} \left(\frac{RMSE_{\text{espacial}}(\text{Banda}_i)^2}{(PAN_i)^2} \right)} \quad [4]$$

donde PAN_i es la imagen obtenida al ajustar el histograma de la imagen PAN original al histograma de la banda i^{th} (i-ésima) de la imagen MULTI y $RMSE_{\text{espacial}}$ se define como:

$$RMSE(\text{Banda}_i) = \frac{1}{NP} \sqrt{\sum_{k=1}^{NP} (PAN_i(k) - FUS_i(k))^2} \quad [5]$$

Además del *ERGAS* en sus versiones espectral y espacial, se ha evaluado también la calidad de dichas imágenes mediante el índice de *Correlación Espectral (CC)* (Vijayaraj *et al.*, 2004) definido en la ecuación 6 y el índice de *Zhou* (Zhou *et al.*, 1998), el cual da una medida de la calidad espacial de la imagen fusionada (ecuación 7).

$$CC = \frac{1}{N_{\text{Bandas}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Bandas}}} \text{Corr}^i (MULTI^i, FUS^i) \quad [6]$$

$$I_z = \frac{1}{N_{\text{Bandas}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Bandas}}} \text{Corr}^i (PAN_{\text{high_pass}}^i, FUS_{\text{high_pass}}^i) \quad [7]$$

Al ser índices basados en la correlación, su valor ideal es 1.

Regiones de interés (ROIs: entrenamiento y validación)

Seleccionamos 11 regiones de interés, que correspondían a distintas unidades de vegetación (pasto, matorral y vegetación de ribera) o algunas especies individuales en bosques mixtos (*Pyrus*, *Olea* y *Quercus*). Además, los suelos desnudos, las sombras y las charcas fueron considerados como regiones adicionales. La clase «suelo saturado» fue considerada como aquellas áreas de la imagen libres de vegetación, que tenían valores de reflectancia muy alta y se incluyeron como parte de este estudio. Para la clasificación, se utilizó la imagen fusionada que reportó los resultados de mejor calidad espectral y espacial. Los datos de estas regiones de interés sobre esta imagen fueron utilizados para la clasificación supervisada a través de la fase de entrenamiento y verificación.

Proceso de clasificación digital mediante *Maximum Likelihood*

Una de las principales preocupaciones en teledetección es cuantificar la coincidencia entre el mapa estimado y el mapa verdad-terreno (Castillejo-González *et al.*, 2009). Para evitar cualquier estimación subjetiva, normalmente se utiliza un análisis numérico de la matriz de confusión, lo que determina la precisión del método comparando el porcentaje de píxeles clasificados de cada clase con la clase verdad-terreno verificada, indicando posteriormente la evaluación correcta y los errores entre las clases estudiadas (Congalton, 1991). La matriz de confusión proporciona la precisión global de la clasificación, que indica el porcentaje de píxeles clasificados correctamente; por otro lado, la exactitud del productor y el error de omisión indican la probabilidad de que un píxel clasificado en la realidad, representa esa categoría en la realidad, y la exactitud del usuario y el error de comisión indican cómo de bien se clasificó el conjunto de píxeles de entrenamiento (Rogan *et al.*, 2002). La precisión de la classifica-

ción global indica el éxito general de la clasificación, siendo el valor mínimo estandarizado y aceptado en un 85%. Los datos que no hayan alcanzado este nivel requerirán ser reclasificados o bien, se deberían fusionar clases (Foody, 2002; Castillejo-González *et al.*, 2009).

Por otro lado, y como ya se ha comentado, el coeficiente kappa (K) es otra medida de la exactitud de la clasificación (ecuación 8). Mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar; es decir, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios (Congalton, Oderwald y Mead, 1983; Hudson y Ramn, 1987; Congalton, 1991). De acuerdo con estos últimos autores, el coeficiente kappa puede ser calculado de la siguiente manera:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r (x_{ii}) - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad [8]$$

donde N es el número total de píxeles de referencia, X_{ij} es el número de observaciones en la fila i y columna j , X_{i+} son los totales marginales de la fila i , X_{+i} los totales marginales de la columna i y r es el número de filas en la matriz.

Los valores máximos y mínimos de kappa dependen del contenido de todas las celdas de la matriz de confusión y no sólo de los valores de la diagonal principal; de modo que si todos los elementos que se encuentran fuera de la diagonal principal fueran iguales a cero, tendríamos concordancia completa, $K = 1$. Si todos los valores de la diagonal principal fueran nulos, estaríamos en un caso de completa discordancia, con $K = -1$. Landis y Koch (1977) sugirieron que un coeficiente Kappa de más de 0,8 indica claramente que una clasificación dada es poco probable que haya sido obtenida por azar.

Resultados

Evaluación de los métodos de fusión de imágenes

Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos con los diferentes métodos de fusión, se seleccionó una región de interés correspondiente a la parcela de estudio, y se extrajeron los datos para cada banda. Se estudio la similitud espacial y espectral entre la imagen original y las fusionadas.

Inicialmente, la evaluación de la calidad espacial de las imágenes fusionadas se realizó mediante análisis visual. La Figura 5 ilustra el resultado del proceso de fusión de imágenes en falso color infrarrojo.

Visualmente, las imágenes fusionadas son muy parecidas y la calidad es satisfactoria. Sin embargo, algunos métodos han generado, por ejemplo, un borde difuso en las copas de los árboles (*GS* y *IHS*) y en otro caso (*Wavelet «à trous»* y *MDMR*), una mala calidad en la banda del IRC.

En cuanto a la calidad espectral de los resultados, se ha estudiado la similitud espectral entre la imagen original y la fusionada. La Tabla 1 muestra las medias, desviaciones estándar y coeficiente de calibración de las imágenes originales.

En este caso en particular, los factores de calibración son muy similares para las bandas PAN y MUL. De ello se deduce que la misma tabla de operaciones se puede aplicar a cada imagen y puedan ser comparadas visualmente.

Para evaluar la calidad espectral y espacial se compararon las bandas espectrales de cada método de fusión con las bandas espectrales de la imagen original a la resolución original (Tabla 2), utilizando diferentes parámetros estadísticos (diferencia entre los valores medios (sesgo), varianza, desviación estándar y RMS). Estos proporcionan una visión global de la ca-

Tabla 1. Media, desviación estándar y coeficiente de calibración de la imagen multiespectral y pancromática en radiancias ($W m^{-2} sr^{-1} m^{-1}$)

	Rojo	Verde	Azul	IRC	PAN
Media	64	58	55	78	71
Desviación Estándar	10	13	22	12	17
Coefc. de Calibración	0,01604	0,01438	0,01267	0,01542	0,0644

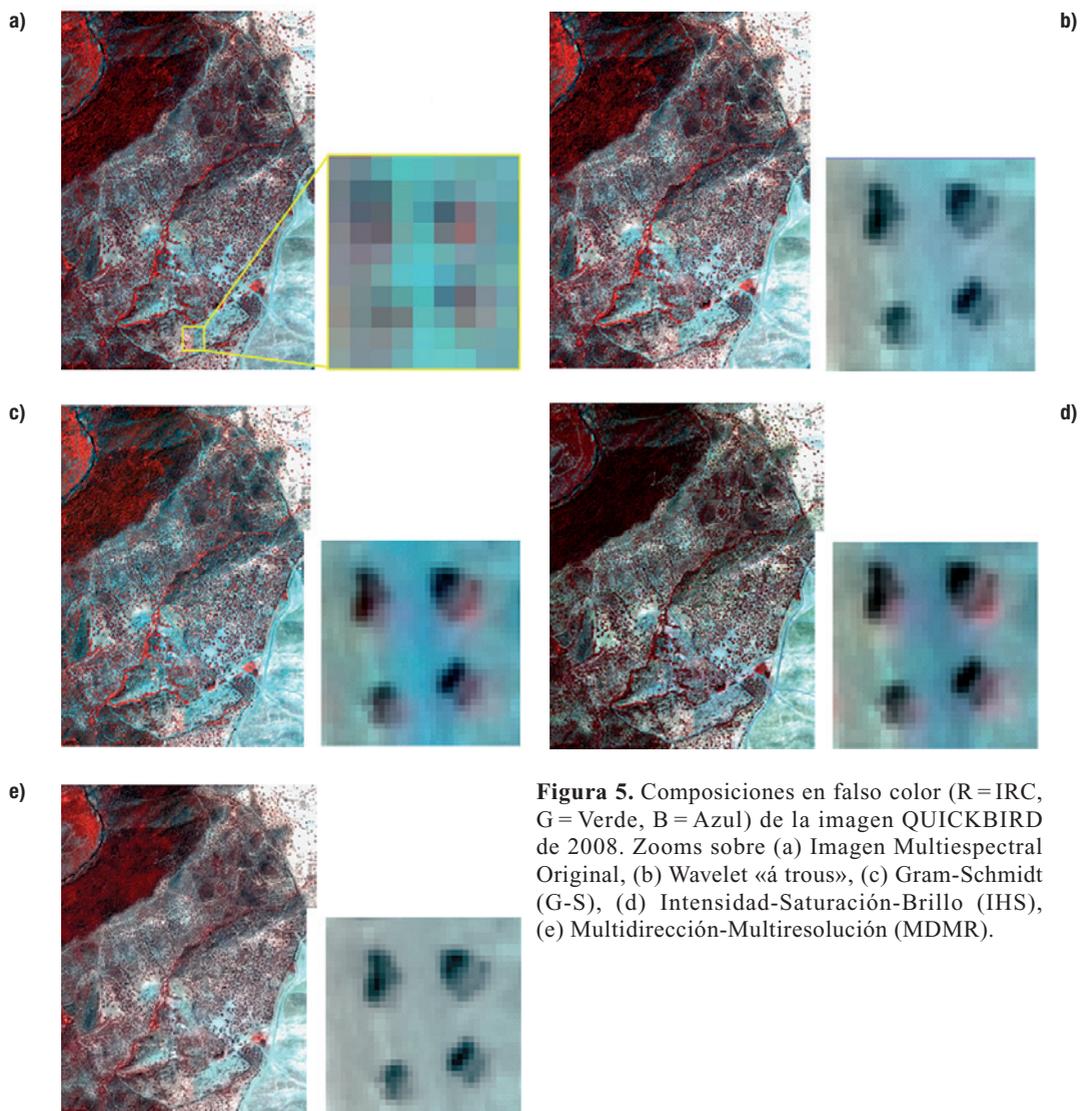


Figura 5. Composiciones en falso color (R=IRC, G=Verde, B=Azul) de la imagen QUICKBIRD de 2008. Zooms sobre (a) Imagen Multiespectral Original, (b) Wavelet «à trous», (c) Gram-Schmidt (G-S), (d) Intensidad-Saturación-Brillo (IHS), (e) Multidirección-Multiresolución (MDMR).

lidad de un método para sintetizar cada banda espectral individual.

El sesgo, la varianza y la desviación estándar y su relación con el valor medio multiespectral están representados. Lo ideal sería que sus valores fuesen nulos. El coeficiente de correlación fue calculado entre la banda multiespectral y la estimada, y su valor ideal es 1 (Tabla 6). Para las bandas 2, 3 y 4 se hizo el mismo análisis, y son recogidas en la Tabla 3, 4 y 5, respectivamente.

El método de fusión *GS* proporcionó los valores más bajos para el sesgo, la varianza y el RME en las cuatro bandas. Sin embargo, para los otros métodos (*MDMR*, *à trous* y *IHS*), la variación en los datos es mayor sólo en el caso de la banda 1. Estas diferencias expresan la canti-

dad de información añadida o perdida durante la mejora de la resolución espacial. En términos de desviación estándar la diferencia más grande se encuentra en la banda 3, siendo en esta banda donde se acumula el mayor nivel de error en cualquier píxel en todos los métodos de fusión.

La comparación del coeficiente de correlación muestra la similitud en las estructuras de pequeño tamaño entre las imágenes originales y las sintéticas. En este caso, la diferencia es baja. Sin embargo, el coeficiente de correlación entre las bandas de *IHS* es superior a todos los demás métodos.

En resumen, la Tabla 7 muestra los errores globales que se calcularon para cada imagen sintética según lo propuesto por Munechika *et al.* (1993) y Wald *et al.* (1997).

Tabla 2. Estadísticos de las diferencias entre la imagen original y la fusionada, en radiancias ($W m^{-2} st^{-1} m^{-1}$) o valor relativo, para la banda B1

	MDMR	ATROUS	IHS	GS
Bias	38,06	37,63	4,31	0,19
(%)	59	59	7	0,30
Varianza	-190	-202	-26	13
(%)	-196	-209	-27	13
D.S.	8,2	8,2	3	3,5
(%)	13	13	5	6
RME	38,9	38,53	5,28	3,55

Tabla 3. Igual que la tabla 2, pero para la banda 2

	MDMR	ATROUS	IHS	GS
Bias	42,78	42,52	3,80	0,14
(%)	73	73	7	0,24
Varianza	72	66	21	23
(%)	40	36	12	13
D.S.	4,6	4,0	4,8	4,6
(%)	8	7,00	8	8
RME	43,04	42,72	6,13	4,60

Para reforzar este análisis, otros índices como el *ERGAS* espectral, el *ERGAS* espacial, el índice de correlación espectral (*CC*) y el índice de *Zhou*, fueron aplicados. La Tabla 8 muestra los índices *ERGAS*, espacial y espectral, así como sus promedios y desviaciones estándar para todos los métodos de fusión.

El método de fusión *IHS* proporciona los valores medios más bajos tanto para el *ERGAS* espectral como para el espacial, siendo el método de fusión más adecuado de acuerdo a nuestros

Tabla 4. Igual que la tabla 3, pero para la banda 3

	MDMR	ATROUS	IHS	GS
Bias	35,67	35,43	6,72	0,14
(%)	65	65	12	0,26
Varianza	303	399	107	63
(%)	62	82	22	12
D.S.	10,3	9,5	5,3	7,5
(%)	19	17	10	13
RME	37,12	36,68	8,53	7,42

Tabla 5. Igual que la tabla 4 pero para la banda 4

	MDMR	ATROUS	IHS	GS
Bias	61,90	61,87	11,54	0,17
(%)	80	79	15	0,22
Varianza	74	74	13	6
(%)	53	53	9,2	4,6
D.S.	7,5	6,5	9,5	4,2
(%)	10	8	12	5
RME	62,36	62,20	14,92	4,21

resultados. El método de fusión *GS* proporciona un *ERGAS* espacial más alto que los métodos *IHS*, *MDMR* y «á trous». En cuanto a los valores del *ERGAS* espectral, existe menor variación entre los cuatro métodos de fusión.

El Coeficiente de Correlación Espectral (*CC*) y el índice *Zhou* espacial, han sido evaluados como otra vía para cuantificar la calidad de las imágenes. Los valores correspondientes a las imágenes obtenidas mediante estos cuatro métodos de fusión se recogen en la Tabla 9.

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre las bandas de la imagen original y las bandas de la imagen fusionada

	MDMR	ATROUS	GS	IHS
Original-B1	0,9488	0,9641	0,9397	0,9540
Original-B2	0,9564	0,9680	0,9432	0,9552
Original-B3	0,9566	0,9696	0,9431	0,9590
Original-B4	0,7800	0,8579	0,9421	0,9052
Promedio	0,9104	0,9399	0,9420	0,9434

Tabla 7. Comparación entre errores globales

	MDMR	ATROUS	IHS	GS
Error Global	181,456	180,143	34,854	19,767

Tabla 8. ERGAS espectral y espacial para los métodos de fusión

	ERGAS espacial	ERGAS espectral	Promedio	DS
ATROUS	1,31629	1,74439	1,53034	0,30271
GS	2,32855	1,53637	1,93246	0,56015
IHS	1,06933	1,50701	1,28817	0,30948
MDMR	1,00206	1,89188	1,44697	0,62919

Tabla 9. Comparación entre índices de calidad espectral y espacial

	CC	ZHOU	Promedio ERGAS
ATROUS	0,90577	0,95085	1,53034
GS	0,91033	0,16144	1,93246
IHS	0,90361	0,97751	1,28817
MDMR	0,87767	0,95766	1,44697

Nuevamente, los valores obtenidos para el CC y Zhou con el método IHS son más altos que para el resto de métodos.

Proceso de clasificación digital mediante máxima probabilidad

La Tabla 10 muestra la matriz de error de la imagen de satélite en falso color después de la fusión con el método IHS, mediante la comparación de los datos de la clasificación con los

datos del terreno en el área de estudio. La precisión global de la clasificación para la imagen de satélite fusionada fue del 80,42%. La precisión del productor de las categorías individuales para la imagen de satélite varió entre el 14,34% para la clase *Olea* y 97,85% para el pasto seco, mientras que la precisión de usuario varió del 3,89% para la clase *Olea* y el 100% para suelo y suelo saturado. *P. bourgeana* tuvo una precisión de usuario del 37,25% y una precisión de productor del 39,89. El índice Kappa fue de 0.781 para la imagen de satélite fusionada. Esto sugiere que la clasificación logró una precisión del 78,1% mejor que la esperada por asignación aleatoria de píxeles a las categorías.

Discusión y conclusiones

Para este estudio, se han comparado 4 métodos de fusión [*Wavelet «á trous»*, *Gram-*

Tabla 10. Matriz de error para la clasificación supervisada en comparación con los datos de terreno para la imagen fusionada en falso color del satélite QuickBird (método IHS) obtenida el 15 de julio de 2008

Categoría clasificada	Categoría actual											Total	Usuario
	Pyrus	Olea	Quercus	Pasto Húmedo	Pasto Seco	Veg. Mixta	Veg. de Ribera	Suelo	Suelo Saturado	Capas de agua	Sombras		
Pyrus	209	62	99	15	0	130	0	0	0	1	45	561	37,25
Olea	100	37	107	71	2	385	30	110	38	40	32	952	3,89
Quercus	72	72	1.215	0	0	56	0	0	0	0	8	1.423	85,38
Pasto Húmedo	14	10	15	1.339	0	4	93	0	0	0	0	1.475	90,78
Pasto Seco	1	0	0	0	1.730	0	0	13	36	0	36	1.816	95,26
Veg. Mixta	72	61	280	12	0	1.902	196	0	0	1	31	2.555	74,44
Veg. de Ribera	0	10	28	119	0	5	1.259	0	0	0	0	1.421	88,6
Suelo	0	0	0	0	0	0	0	1.290	0	0	0	1.290	100
Suelo Saturado	0	0	0	0	0	0	0	0	1.373	0	0	1.373	100
Capas de agua	0	3	50	0	0	15	0	0	0	834	155	1.057	78,9
Sombras	56	3	53	0	36	27	0	29	1	69	1.175	1.449	81,09
Total	524	258	1.847	1.556	1.768	2.524	1.578	1.442	1.448	945	1.482		
Productor	39,89	14,34	65,78	86,05	97,85	75,36	79,78	89,46	94,82	88,25	79,28		

Schmidt (G-S), Intensidad-Saturación-Brillo (IHS) y Multidirección-Multiresolución (MDMR)], aplicados sobre imágenes Quickbird multiespectrales, con el objeto de optimizar la calidad de la resolución espectral y espacial. El objetivo es mejorar los resultados de una clasificación supervisada de la imagen fusionada para permitir la discriminación y el mapeo individual de *P. bourgeana*.

Asumiendo que durante el proceso de fusión hay una leve pérdida de la información espectral y espacial, todos los métodos de fusión aplicados a estas imágenes ofrecen resultados satisfactorios. En primer lugar, se realizó una inspección visual de las imágenes fusionadas. Para contrastar la información visual, siguiendo el protocolo de Wald (1997) se compararon las imágenes fusionadas obtenidas para cada método de fusión con la imagen original. Los métodos basados en la transformada *wavelet* (*à trous*) casi siempre ofrecen resultados favorables (Ranchin y Wald, 2000). Sin embargo, en este caso, los resultados proporcionados por este método no lo fueron. Para las cuatro bandas (B1, B2, B3 y B4) el sesgo y la varianza fueron altos. Sin embargo, el coeficiente de correlación entre las bandas fusionadas y la banda original, excepto para la banda 4, resultaron ser de los más altos. Por otro lado, los resultados proporcionados por el *ERGAS* espectral y espacial, lo situaron como un método favorable para su aplicación. Además de que el método *GS* proporcionó resultados muy favorables, ya que sus valores fueron similares a los de la imagen original en la resolución espectral, los índices que miden la precisión de la resolución espacial (*Zhou*) fueron bajos. Esto puede ser incoherente ya que este método pudo ser considerado como uno de los métodos a aplicar para la clasificación, pero desde el punto de vista del espacio, se descartó. El método *IHS* a menudo produce resultados de aspecto agradable. Por un lado, el sesgo y la varianza fueron altos. Sin embargo, la desviación estándar de las cuatro bandas no fue muy alta y los coeficientes de correlación entre las bandas fueron los más altos. Estos datos se vieron reforzados por los resultados de los índices *ERGAS* espacial y *Zhou*. De los cuatro métodos, éste dio valores más consistentes en términos de resolución espectral y espacial.

Además, ofreció una gran consistencia visual de las imágenes sintetizadas. Los resultados proporcionados por el método *MDMR* no fueron favorables. Además de presentar una baja calidad espectral, como reflejaron sus valores altos para el bias, la varianza y la desviación estándar, la calidad espacial fue reflejada por los bajos valores de los índices espaciales.

Si un método de fusión busca un equilibrio entre la información espectral y espacial, para el caso de la escena de Quickbird objeto de estudio, el método *IHS* proporcionó la mejor calidad espacial y espectral (Alonso *et al.*, 2004). El método *GS* se podría haber considerado como posible para ser aplicado en este trabajo, sin embargo sus resultados fueron un poco más pobres de acuerdo a los índices *ERGAS* espacial y espectral, así como para el índice de *Zhou* espacial. Del mismo modo, el algoritmo «*à trous*» y el método *MDMR* demostraron ser también alternativas muy eficientes (Gonzalo y Lillo-Saavedra, 2007), pero aunque la calidad espacial fue buena, los resultados espectrales fueron muy bajos.

Por otro lado, los índices utilizados para evaluar la calidad de las imágenes fusionadas, además de estar muy difundidos, proporcionan robustez en cuanto a los resultados, ya que tienen en cuenta entradas de datos de ambas imágenes (MUL y PAN) (Gonzalo y Lillo-Saavedra, 2007). Wald (2002) propuso algunos requisitos que deben cumplir los índices de calidad: 1) Ser independiente de las unidades, y por consiguiente de los coeficientes de calibración de los instrumentos y de sus valores de ganancia. 2) Ser independiente del número de bandas espectrales consideradas. 3) Ser independiente de la relación entre las resoluciones espaciales de las imágenes fuente. Según Gonzalo y Lillo-Saavedra (2007), no existe el mejor método de fusión de imágenes, sino la mejor imagen fusionada. En base a esto, el índice de correlación espectral (*CC*) y el índice de *Zhou*, presentan baja sensibilidad a las variaciones de calidad, no cumpliendo los requisitos de Wald. Por otro lado, el RMSE, el *ERGAS* espectral y el espacial, cumplen los requisitos de Wald y, por tanto, su definición en un dominio común permite su comparación. En base a los resultados obtenidos para este estudio, combinando varios índices de evaluación de la

calidad de las imágenes fusionadas, podemos concluir que el índice que midió de forma más eficiente la calidad de las imágenes fue el *ER-GAS*, tanto espectral, como su versión espacial, ajustándose a lo propuesto por Wald (2002).

Según la escala que a menudo se utiliza para expresar cualitativamente la fuerza de acuerdo en la clasificación (Landis y Koch, 1977), cuyo valor de *Kappa* entre 0,61 y 0,80 se considera «sustancial», y asumiendo que el valor mínimo estandarizado y aceptado para la precisión de la clasificación global está en un 85% (Foody, 2002), los resultados reportados por el índice *Kappa* y la precisión global para la imagen analizada (78,18% y 80,42%, respectivamente), muestran que es posible discriminar las categorías seleccionadas en el área de estudio (*Pyrus*, *Olea*, *Quercus*, Pasto Seco, Pasto Húmedo, Vegetación Mixta, Vegetación de Ribera, Suelo Desnudo, Suelo Saturado, Charcas y Sombras). Sin embargo, el hecho de que los valores del coeficiente *kappa* o la precisión global fuesen altos, no significa que la precisión de productor o usuario fuese la más alta. Thomlinson *et al.* (1999), expuso que el criterio para una categorización exitosa de los usos del suelo no era sólo el 85% mínimo general, sino también la inclusión de ninguna clase con una precisión de menos del 70%. De acuerdo con Yu *et al.* (2006), una precisión de la clasificación general superando el 60% puede considerarse satisfactoria cuando la clasificación de la vegetación se mapea con más de 13 alianzas construidas por 52 usos de vegetación. Por lo tanto, aunque no hay una estimación estándar de precisión, existe un consenso razonable de que una mayor precisión es necesaria (Castillejo-González *et al.*, 2009). Analizando los datos correspondientes a la precisión de productor y usuario para la clase *Pyrus*, se observó que en el caso de la imagen de verano de 2008 fusionada, los resultados fueron relativamente bajos (39,89% y 37,25%, respectivamente). Estos valores de productor y usuario para peral silvestre se deben principalmente a su confusión con vegetación mixta (matorral), y otras especies de árboles (*Olea*). La confusión con otras clases de vegetación podría deberse a que durante el verano, la respuesta espectral de la vegetación y principalmente los árboles de hoja caduca, como el peral silves-

tre, está muy influenciada por el proceso de desprendimiento de las hojas y la senescencia, relacionados principalmente con la sequía estival. Estos pobres resultados de la clasificación obtenidos para la clase *Pyrus*, podrían ser explicados, en parte, por la fecha tardía de adquisición de la imagen Quickbird disponible (mediados de julio). Lamentablemente, para esta fecha, en el área de estudio muchos perales silvestres ya habían tirado una parte de sus hojas. Por lo tanto, creemos que una mejor selección de productos de imágenes por fecha, además de perfeccionar o aplicar distintos métodos como segmentación de objetos, índices de vegetación, entre otros, o ampliando la resolución espectral de las imágenes que se adquieran (imágenes hiperespectrales), podrían mejorar significativamente los resultados. En este sentido, es posible que el rendimiento global de un método no se vea reflejado, ya que los resultados dependen en gran medida del tipo de paisaje, su diversidad, su heterogeneidad, el tiempo de observación, las propiedades ópticas de la atmósfera, el sistema del sensor mismo (incluyendo la geometría de visión), el tipo de clasificador (supervisado, no supervisado), y el clasificador en sí mismo (Ranchin y Wald, 2000).

No obstante, nos gustaría hacer hincapié en la dificultad inherente a la hora de clasificar especies de árboles individuales a partir de imágenes multiespectrales donde las complicaciones, tales como coronas de sombra y variabilidad de las firmas espectrales entre los árboles de la misma especie, combinado con un pobre aislamiento de los árboles individuales, reduce el rendimiento de la clasificación general, a menos del 50% de clasificaciones correctas (Leckie *et al.*, 2005a), e incluso con delimitación manual de las copas, el rendimiento de la clasificación sigue siendo bajo (Leckie *et al.*, 2005b; Larsen, 2007). Sin embargo, existe una urgencia cada vez mayor entre los biólogos dedicados a la conservación, de cuantificar el estatus y requerimientos ambientales de determinadas especies a escala espacial más fina, con el fin de priorizar mejor los esfuerzos de conservación. Los sensores remotos pueden ayudar a ampliar el conjunto de datos de campo existentes a escala regional y mundial.

Referencias

- ALDASORO, J. J., AEDO, C. & MUÑOZ GARMENDIA, F. 1996. The genus *Pyrus* L. (*Rosaceae*) in south-west Europe and North Africa. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 121: 143-158.
- ALDRICH, J. 1997. Fisher and the making of maximum likelihood 1912-1922. *Statistic Society*, 12: 162-176.
- ALONSO, R., GUTIERREZ, M. J., FERNANDEZ, S., THOMAS, C., RANCHIN, T. & WALD, L. 2004. Evaluation of the Quality of Quickbird Fused Products. «24th EARSeL Symposium «New Strategies for European Remote Sensing», Dubrovnik, Croatia.
- ALPARONE, L., BARONTI, S., GARCELLO, A. & NENCINI, F. 2004. A global measurement of pan-sharpened multispectral imagery. *IEEE, Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1: 313-317.
- ANDERSON, G. L., PROSSER, C. W., HAGGAR, S. & FOSTER, B. 1999. Change detection of leafy spurge infestations using aerial photography and geographic information systems. *Proceedings of the 17th Biennial Workshop Color Aerial Photography and Videography in Resource Assessment*. Bethesda, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 223-230.
- ARCGIS 9.3 PACKAGE. 2008. *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*.
- CABELLO, J. & PARUELO, J. M. 2008. La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas*, 17(3): 1-3.
- CASTILLEJO-GONZÁLEZ, I. L., LÓPEZ-GRANADOS, F., GARCÍA-FERRER, A., PEÑA-BARRAGÁN, J. M., JURADO-EXPÓSITO, M., SÁNCHEZ DE LA ORDEN, M. & GONZÁLEZ-AUDICANA, M. 2009. Object- and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68: 207-215.
- CHAVEZ, P. S. 1975. Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery. *Proceedings of the American Society of Photogrammetry*, Fall Technical Meeting Phoenix, AZ, pp. 69.
- CHAVEZ, P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.
- CHAVEZ, P. S. 1989. Radiometric calibration of Landsat thematic mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55: 1285-1294.
- CHAVEZ, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections, revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- CHUVIECO, E. (Ed. RIALP). 1996. «Fundamentos de Teledetección espacial», 3^a edición, pp. 568 (Madrid).
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R. G. & MEAD, R. A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 49: 1671-1678.
- CONGALTON, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.
- COPPIN, P., JONCKHEERE, I., NACKAERTS K., MUYS, B. & LAMBIN, E. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9): 1565-1596.
- CRIPPEN, R. E. 1987. The regression intersection method of adjusting image data for band rationing. *International Journal of Remote Sensing*, 8: 137-155.
- CULVENOR, D. 2002. TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery. *Computers and Geosciences*, 28: 33-44.
- DECAISNE, J. 1871-72. *Le Jardin fruitier du Muséum*, 1(318), pl. 2, Paris.
- DIGITALGLOBE, INC. 2003. Radiometric Radiance Conversion for QB Data. Technical Note, RS., TN., Radiometric Radiance, 4002. Longmont, Colorado.
- ENVI FLAASH. Atmospheric Correction Module, 2009.
- ENVI (The Environment for Visualizing Images). V.4.5 (2007)-V.4.6 (2009).
- EVERITT, J. H., PETTIT, R. D. & ALANIZ, M. A. 1987. Remote sensing of broom snakeweed (*Gutierrezia sarothrae*) and spiny aster (*Aster spinosus*). *Weed Science*, 35: 295-302.
- EVERITT, J. H., YANG, C. & JOHNSON, H. B. 2007. Canopy Spectra and Remote Sensing of *Ashe Juniper* and Associated Vegetation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130: 403-413.
- FEDRIANI, J. M., WIEGAND, T. & DELIBES, M. 2010. Spatial pattern of adult trees and the mammal-generated seed rain in the Iberian pear. *Ecography*, 33(3): 545-555.
- FLORA IBERICA. 1989. *Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares*. Real Jardín Botánico. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 436-437.
- FOODY, G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80: 185-201.
- FRULLA, L., MILOVICH, J. A. & GAGLIARDINI, D. A. 1995. Illumination and observation geometry for NOAA-AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*, 16(12): 2233-2253.

- GAUSMAN, H. W., MENGES, R. M., ESCOBAR, D. E., EVERITT, J. H. & BOWEN, R. L. 1977. Pubescence affects spectra and imagery of silverleaf sunflower (*Helianthus argophyllus*). *Weed Science*, 25: 437-440.
- GILBERT, M. A., CONESE, C. & MASELLI, F. 1994. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 2065-2086.
- GONZALO, C. & LILLO-SAAVEDRA, M. 2007. Fusión de Imágenes Quickbird Mediante una Representación Conjunta Multirresolución-Multidirección. *IEEE Latin America Transaction*, 5(1): 32-35.
- GOUGEON, F., LECKIE, D., PARADINE, D. & SCOTT, I. 1999. Individual tree crown species recognition: the Nahmint study. *International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Pacific Forestry Centre, Vic., Canada, pp. 209-223.
- HAYDAN, R., DALKE, G. W., HENKEL, J. & BARE, J. E. 1982. Applications of the IHS colour transform to the processing of multisensor data and image enhancement. *International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-arid Lands*, Cairo, Egypt, pp. 599-616.
- HUDSON, W. D. & RAMM, C. W. 1987. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53: 421-422.
- KNEIZYS, F. X., SHETTLE, E. P., ABREU, L. W., ANDERSON, G. P., CHETWYND, J. H., GALLERY, W. O., SELBY, J. E. A. & CLOUGH, S. A. 1988. Users guide to LOWTRAN 7. Technical Report AFGL-TR-88-0177, Optical/Infrared Technology Division, U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Hascom Air Force Base, Massachusetts.
- LABEN, C. A. & BROWER, B. V. 2000. Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-Sharpener. *US Patent* 6,011,875.
- LANDIS, J. R. & KOCK, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33: 159-174.
- LARSEN, M. 2007. Single tree species classification with a hypothetical multi-spectral satellite. *Remote Sensing of Environment*, 110(4): 523-532.
- LECKIE, D. G., GOUGEON, F. A., TINIS, S., NELSON, T., BURNETT, C. N. & PARADINE, D. 2005a. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sensing of Environment*, 94: 311-326.
- LECKIE, D. G., TINIS, S., NELSON, T., BURNETT, C., GOUGEON, F. A. CLONEY, E. & PARADINE, D. 2005b. Issues in species classification of trees in old growth conifer stands. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31(2): 175-190.
- LILLO-SAAVEDRA, M. & GONZALO, C. 2006. Spectral or Spatial Quality for Fused Satellite Imagery? A Trade-Off Solution Using Wavelet à trous Algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7): 1453-1464.
- LILLO-SAAVEDRA, M. & GONZALO, C. 2007. Multispectral Images Fusion by a Joint Multidirectional and Multiresolution Representation. *International Journal of Remote Sensing*, 28(18): 4065-4079.
- LILLO-SAAVEDRA, M. & GONZALO, C. 2008. Aplicación de la Metodología de Fusión de Imágenes Multidirección-Multiresolución. *Información Tecnológica*, 19(5): 137-146.
- LÓPEZ-GRANADOS, F., PEÑA-BARRAGÁN, J. M., JURADO-EXPÓSITO, M., FRANCISCO-FERNÁNDEZ, M., CAO, R., ALONSO-BETANZOS, A. & FONTENLA-ROMERO, O. 2008. Multispectral classification of grass weeds and wheat (*Triticum durum*) using linear and nonparametric functional discriminant analysis and neural networks. *Weed Research*, 48: 28-37.
- LÓPEZ-GRANADOS, F., GÓMEZ-CASERO, T., PEÑA-BARRAGÁN, J. M., JURADO-EXPÓSITO, M. & GARCÍA-TORRES, L. 2010. Classifying irrigated crops as affected by phenological stage using discriminant analysis and neural networks. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 135: 465-473.
- MUNECHIKA, C. K., WARNICK, J. S., SALVAGGIO, C. & SCHOTT, J. R. 1993. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59: 67-72.
- RAHMAN, H. & DEDIEU, G. 1994. SMAC: simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. Toulouse. *International Journal of Remote Sensing*, pp. 123-143.
- RANCHIN, T. & WALD, L. 2000. Fusion of High Spatial and Spectral Resolution images: The ARSIS Concept and Its Implementation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66: 49-61.
- ROGAN, J., FRANKLIN, J. & ROBERTS, D. A. 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80: 143-156.
- SLATER, P. N. 1980. *Remote Sensing, Optics and Optical systems*. Addison-Wesley Pub. Co., pp. 575.
- THOMLINSON, J. R., BOLSTAD, P. V. & COHEN, W. B. 1999. Coordinating methodologies for scaling landcover classifications from site-specific to global: step toward validating global map products. *Remote Sensing of Environment*, 70: 16-28.

- TUELLER, P. T. 1982. *Remote sensing for range management*. In: C. J. Johannsen & J. L. Sanders (Eds.), Ankeny, IA: *Soil Conservation Society of America*, pp. 125-140.
- VARSHNEY, P. K. 1997. Multisensor data fusion. *Electronics and Communication Engineering Journal*, 9(6): 245-253.
- VASANTHA, T., SHYAMALA, R., MARINO, L., HOWARTH, P. & WOOD, D. 2000. Land Cover Mapping: Performance Analysis of Image-Fusion Methods. *www.GISdevelopment.com*.
- VERMOTE, E., TANRE, D., DEUZE, J. L., HERMAN, M. & MORCRETTE, J. J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 675-686.
- VIJAYARAJ, V., O'HARA CH. & YOUNAN, N. 2004. Quality Analysis of Pan-Sharpned Images. *Proceedings of the Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Anchorage, Alaska.
- VRABEL, J. 1996. Multispectral Imagery Band Sharpening Study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9): 1075-1083.
- WALD, L., RANCHIN, T. & MANGOLINI, M. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images, 63(6): 691-699.
- WALD, L. 2000. Quality of high resolution synthesized: is there a simple criterion? *Proceedings of the International Conference on Fusion of Earth Data*, T. Ranchin and L. Wald (Eds), SEE/URIS-CA, France, pp. 99-105.
- WALD, L. 2002. Data Fusion, Definition and Architectures: Fusion of Image of Different Spatial Resolution, *Le Presses de l'Ecole des Mines*, Paris.
- WULDER, M., NIEMANN, O. & GOODE-NOUGH, D. 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree location and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 73: 103-114.
- YU, Q., GONG, P., CLINTON, N., BIGING, G., KELLY, M. & SCHIROKAUER, D. 2006. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72: 799-811.
- ZHANG, W. J. & KANG, J. Y. 2005. Quickbird panchromatic and mul-spectral image fusion based on wavelet packet transformation. *Space electronic technology*. 2: 48-52. (In Chinese).
- ZHOU, J., CIVCO, D. & SILANDER, J. 1998. A Wavelet Method to Merge Landsat TM and SPOT Panchromatic Data. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 743-757.

Estimación de la reflectividad superficial mediante datos del sensor aéreo AHS y comparación con el producto MODIS en la campaña CEFLES2

J. A. Sobrino* y B. Franch

*Global Change Unit (UCG). Imaging Processing Laboratory (IPL). Parque Científico.
Universitat de Valencia. P.O. Box 22085. 46071 Valencia. Spain*

Resumen

En este artículo se evalúa el producto MODIS de reflectividad superficial a través de su comparación con datos aéreos. En este sentido se ha desarrollado una metodología para obtener la reflectividad superficial y se ha aplicado a datos adquiridos mediante el sensor aerotransportado Airborne Hyperspectral Scanner (AHS). Se ha comparado la reflectividad superficial obtenida con la estimada por MODIS considerando la equivalencia entre las bandas 8 (centrada en 658 nm) y 15 (centrada en 862 nm) de AHS y las bandas 1 y 2 de MODIS respectivamente. El estudio se ha desarrollado en el contexto de la campaña CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2), la cual se desarrolló en Les Landes (Francia) durante tres periodos, abril, junio y septiembre de 2007. Con esta metodología se obtiene la reflectividad superficial de las imágenes AHS con un Root Mean Square Error (RMSE) al comparar con datos in situ de 0,02 en el visible y 0,05 en el infrarrojo cercano. La evaluación del producto MODIS de reflectividad superficial (MOD09GQ) se ha desarrollado comparándolo con la estimación mediante AHS. Los resultados muestran un RMSE de 0,03 en el visible y 0,08 en el infrarrojo cercano.

Palabras clave: MODIS, reflectividad superficial, espesor óptico de aerosoles, CEFLES2, corrección atmosférica, AHS.

Abstract

Evaluation of the MODIS surface reflectance product in the framework of the CEFLES2 campaign

In this paper the MODIS surface reflectance product is evaluated through its comparison with airborne data. In this way it has been developed a methodology to obtain the surface reflectance in the Visible and Near Infrared (VNIR) spectral range and it has been tested over airborne data by processing high-resolution images acquired with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) sensor. AHS and MODIS surface reflectance images have been compared considering the equivalence between AHS bands Band 8 (centred on 658nm) and Band 15 (centred on 862 nm) and MODIS Band 1 and Band 2 respectively. The study has been performed in the framework of the CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2) campaign, which was developed in Les Landes region (France) during three different periods, April, June and September, on 2007. With this methodology the surface reflectance can be obtained with a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.02 in the red spectral region and around 0.05 in the near infrared spectral region in comparison with ground measurements. Regarding the evaluation of the MODIS Collection C5 surface reflectance product (MOD09GQ), it has been performed by comparing with the AHS estimations. The results report a RMSE of 0.03 in the red spectral region and 0.08 in the near infrared spectral region.

Key words: MODIS, surface reflectance, aerosol optical thickness, CEFLES2, atmospheric correction, AHS.

* Autor para la correspondencia: jose.sobrino@uv.es

Recibido: 25-01-11; Aceptado: 10-05-11.

Introducción

El sensor MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua permite una observación prácticamente global de la Tierra en una base diaria con una fina resolución espectral y espacial. La disponibilidad de productos MODIS ha supuesto un gran avance ya que estos son utilizados por la comunidad científica con diversas finalidades como por ejemplo la evaluación de la deforestación (Ferreira *et al.*, 2007), la estimación de la evapotranspiración (Mu *et al.*, 2007), estudios sobre la cobertura de nieve (Pu *et al.*, 2007), etc.

Recientemente, se ha desarrollado el producto MODIS de reflectividad superficial Collection 5 (C5) de manera que se han mejorado los algoritmos de corrección atmosférica, incluyendo máscara de nubes y aerosoles en comparación con los algoritmos de los productos Collection 4 (C4). Muchos estudios se han desarrollado validando el producto MODIS de aerosoles C4 (Chu *et al.*, 2002; Remer *et al.*, 2005; Levy *et al.*, 2005) y C5 (Papadimas *et al.*, 2008) considerando medidas in situ principalmente de AERONET. El producto MODIS de reflectividad superficial C5 también ha sido validado recientemente (VerMOTE *et al.*, 2008). En este contexto el principal objetivo del presente trabajo es la evaluación de los productos MODIS de reflectividad superficial y espesor óptico de aerosols C5 aprovechando la campaña de medidas CEFLES2.

Con esta finalidad el artículo se estructura en una primera introducción a la teoría y algoritmos utilizados. A continuación se desarrolla una sección de metodología en que se describe la campaña CEFLES2, los datos procesados y el método seguido en la corrección atmosférica. Finalmente se presentan los resultados obtenidos así como la discusión y las conclusiones.

Teoría y algoritmos

En la corrección atmosférica en el Visible e Infrarrojo Cercano (Visible and Near Infrared, VNIR) se deben tener en cuenta las diversas contribuciones de la atmósfera y la superficie a la irradiancia solar. En la Figura 1 se pueden ob-

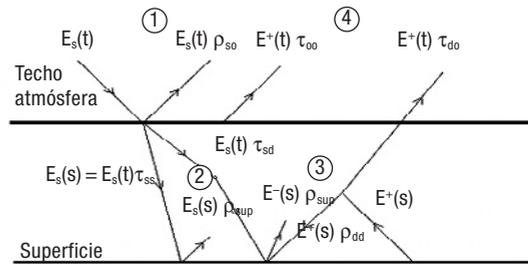


Figura 1. Diferentes contribuciones de la atmósfera y la superficie a la irradiancia solar.

servar las contribuciones a la señal en el techo de la atmósfera que se han tenido en cuenta en el rango espectral del visible y próximo infrarrojo (Visible and Near Infrared, VNIR). Como se puede observar se consideran cuatro términos: (1) fotones reflejados por la atmósfera antes de llegar a la superficie, (2) fotones transmitidos directamente a la superficie y son reflejados directamente al sensor, (3) fotones dispersados por la atmósfera antes de llegar a la superficie y son reflejados directamente al sensor y (4) fotones que sufren al menos dos interacciones con la atmósfera y una con la superficie.

Teniendo en cuenta estas contribuciones y considerando la superficie uniforme y Lambertiana (Nicodemus *et al.*, 1977), las ecuaciones de transferencia radiativa se pueden escribir como (Verhoef and Bach, 2003):

$$E_s(s) = \tau_{ss} E_s(t) \quad [1]$$

$$E^-(s) = \tau_{sd} E_s(t) + \rho_{dd} E^+(s) \quad [2]$$

$$E_o(t) = \rho_{so} E_s(t) + \tau_{do} E^+(s) + \tau_{oo} E_o(s) \quad [3]$$

$$E^+(s) = \rho_{sup} [E_s(s) + E^-(s)] \quad [4]$$

donde (s) y (t) indican la irradiancia (E) a nivel de la superficie y en el techo de la atmósfera (Top Of Atmosphere), TOA respectivamente, E_s es la irradiancia solar, E^- es la irradiancia descendente, E^+ es la ascendente y E_o es la irradiancia medida por el sensor. Además, ρ_{so} es la reflectividad bidireccional de la capa atmosférica, τ_{ss} es la transmisividad directa descendente, τ_{sd} es la transmisividad difusa en la dirección del sol, τ_{do} es la transmisividad difusa en la dirección de observación, ρ_{dd} es el albedo esférico de la atmósfera, τ_{oo} es la transmisividad directa ascendente y ρ_{surf} es la reflectividad superficial.

La ecuación [1] describe la atenuación de la radiación a lo largo de toda la capa atmosférica a través de la transmisividad directa τ_{ss} , la

ecuación [2] refleja la generación de un flujo difuso descendente compuesto por un flujo solar directo difusamente transmitido y un flujo difuso ascendente de la superficie que es reflejado en dirección descendente por la atmósfera. Aquí, el término ρ_{dd} es el albedo esférico atmosférico. La ecuación [3] describe como la radiancia en el techo de la atmósfera es generada a partir de la radiancia directa dispersada atmosféricamente vía el término ρ_{so} (el cual se puede considerar como reflectividad bidireccional de la capa atmosférica), el flujo ascendente difuso que es dispersado en la dirección de observación vía el término de transmisividad τ_{do} , y la radiancia directamente transmitida desde el blanco observado vía la transmisividad directa τ_{oo} . Finalmente, la ecuación [4] describe la reflexión de la radiancia por una superficie Lambertiana.

Considerando la aproximación de que la irradiancia medida por el sensor a nivel de superficie es igual a la irradiancia ascendente en la superficie [$E_o(s) = E^+(s)$] ya que se considera una superficie Lambertiana y escribiendo la ecuación en términos de reflectividad, se puede obtener la expresión (Verhoef and Bach, 2003):

$$\rho_{surf} = \frac{\rho_{TOA} - \rho_{so}}{(\tau_{do} + \tau_{oo})(\tau_{ss} + \tau_{sd}) + \rho_{dd}(\rho_{TOA} - \rho_{so})} \quad [5]$$

donde los inputs de esta ecuación son la imagen medida por el sensor (ρ_{TOA}) y los parámetros atmosféricos ρ_{so} , τ_{ss} , τ_{sd} , τ_{do} , ρ_{dd} y τ_{oo} .

El objetivo de este artículo es obtener la reflectividad superficial de la forma más precisa posible para poderla comparar con los datos MODIS. En este sentido se ha seguido la metodología basada en el código de transferencia radiativa MODTRAN4.3 (Berk *et al.*, 2003) que se detalla en la siguiente sección.

Metodología

Campaña de medidas CEFLES2

CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2) fue una campaña con múltiples objetivos y que sacó provecho de la correlación entre medidas in situ y medidas con sensores aerotransportados, realizadas en coordinación con CERES (CarboEurope Regional Experi-

ment Strategy). La campaña apoyó el desarrollo de la misión FLEX la cual fue candidata en el marco Earth Explorer en el momento de realización de la campaña al proporcionar medidas aéreas de fluorescencia y medidas intensivas in situ de procesos a nivel de hoja, y la misión Sentinel-2 la cual es una misión multiespectral basada en la observación a nivel global a alta resolución. Las medidas aéreas e in situ tuvieron lugar en la región francesa de Les Landes en abril, junio y septiembre de 2007 con la finalidad de registrar diferentes etapas de crecimiento de la vegetación. Las medidas aéreas realizadas consistieron en imágenes de flujo de carbono, de fluorescencia e hiperespectrales cubriendo las regiones espectrales del visible, próximo infrarrojo, infrarrojo de onda corta y térmico.

El área de estudio donde se desarrolló CEFLES2 comprendía un rectángulo desde Burdeos a Toulouse en el sureste de Francia. Nuestro estudio se centra en un área agrícola cerca de Marmande que fue el principal objetivo de FLEX durante las tres campañas y además fue zona donde se realizaron más medidas para CERES y Sentinel-2. La zona consistió en grandes campos de diferentes cultivos, principalmente trigo de invierno y maíz en un terreno llano al pie del valle Garonne.

Datos aéreos: AHS

Los datos utilizados en este trabajo fueron adquiridos por el sensor Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) (Sobrino *et al.*, 2008), el cual es un radiómetro aerotransportado de 80 bandas desarrollado y creado por SensyTech Inc. y actualmente es administrado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El AHS tiene 63 bandas en el VNIR y SWIR, 7 bandas en el rango entre 3 y 5 micrómetros y 10 bandas en la región entre 8 y 13 micrómetros. Nuestro estudio se centrará en las primeras 20 bandas cuya cobertura espectral cubre desde unos 400 nm a 1.000 nm.

Los datos utilizados en este trabajo se adquirieron en una línea recta de vuelo a dos diferentes alturas de 2.865 m (vuelos altos) y 1.097 m (vuelos bajos) y durante tres fechas diferentes, 24 de abril, 30 de junio y 15 de sep-

tiembre de 2007. Las imágenes resultantes tienen una resolución espacial de 6m en vuelos altos y 2 m en vuelos bajos.

Medidas in situ de reflectividad

En el test de la corrección atmosférica de las imágenes AHS se han considerado dos espectrorradiómetros ASD FieldSpec Pro. El principal objetivo de estas medidas en la campaña CEFLES2 fue la obtención de suficientes espectros representativos de distintos tipos de superficie de la zona de medidas. Para realizar las medidas se siguió el siguiente procedimiento: se seleccionaron cuatro áreas de medida para cada campo considerado, en cada una de estas áreas se midieron 3 puntos intercalando medidas del blanco de referencia tanto al inicio como al final.

Los datos de uno de los ASD fueron procesados por la Humboldt-Universität en Berlín y los datos del otro ASD fueron tratados por el grupo Forschungszentrum Jülich en Alemania.

La Tabla 1 resume todas las medidas in situ que se han tenido en cuenta en el estudio sobre la precisión de la estimación de la reflectividad superficial a partir de datos adquiridos por los sensores aerotransportados.

Estimación de aerosoles y reflectividad superficial

Con el objetivo de obtener imágenes de reflectividad superficial se ha aplicado la corrección atmosférica a las imágenes AHS considerando la ecuación [5]. Los parámetros atmosféricos de los que depende esta ecuación han sido obtenidos utilizando el código de transferencia radiativa MODTRAN4.3. Como nuestro estudio se basa en datos adquiridos por sensores aerotransportados, en el cálculo de cada parámetro atmosférico debemos decidir en-

Tabla 1. Datos in situ utilizados en el test de la corrección atmosférica

Mes	Especies			
Abr	Suelo desnudo		Trigo	
Jun	Suelo desnudo		Maíz	Girasol
Sep	Suelo desnudo	Maíz	Judías	Girasol

tre considerar toda la atmósfera o sólo la atmósfera entre la superficie y la altura del sensor. En consecuencia, sólo hemos considerado toda la atmósfera en el cálculo de τ_{ss} (transmisividad directa descendente) y τ_{sd} (transmisividad difusa en la dirección solar) y la atmósfera entre la superficie y el sensor en los demás casos. En la campaña CEFLES2 los radiosondeos atmosféricos fueron considerados de la base de datos RAOB considerando la zona Bordeaux/Merignac (<http://raob.fsl.noaa.gov>).

Para obtener el espesor óptico de aerosoles (AOT) y evaluar el producto MODIS de aerosoles estos se han estimado a partir de las imágenes adquiridas mediante teledetección aplicando un método propuesto en Guanter *et al.* (2008). Este se basa en la comparación en la región espectral desde 412 nm a 681 nm entre el espectro de una especie de superficie oscura (dark spectrum) y la radiancia total dispersada resultante de considerar diferentes valores de AOT. La superficie oscura considerada es el espectro resultante de la búsqueda del valor mínimo de radiancia en cada banda espectral de la imagen. El valor final de AOT será aquel que implique la mayor proximidad entre el espectro de la superficie oscura y la radiancia total dispersada, no permitiendo que la radiancia dispersada sea mayor que el espectro de la superficie oscura en ninguna de las bandas del visible.

Una vez obtenida la reflectividad superficial se ha comparado con los datos in situ realizados en la campaña de manera simultánea al paso del sensor. Esto se desarrollará en la siguiente sección.

Resultados

Para evaluar el producto MODIS de reflectividad superficial C5 este se ha comparado con la estimación de reflectividad superficial con imágenes AHS siguiendo la metodología escrita. Primero, se han estimado los valores de AOT con las imágenes AHS de la campaña CEFLES2.

En la Figura 2 se he representado un ejemplo de una imagen adquirida el 24 de abril en que se ha representado la radiancia total dispersada simulada para diferentes valores de AOT considerando el modelo rural de aerosoles y el «dark spectrum» obtenido de la imagen.

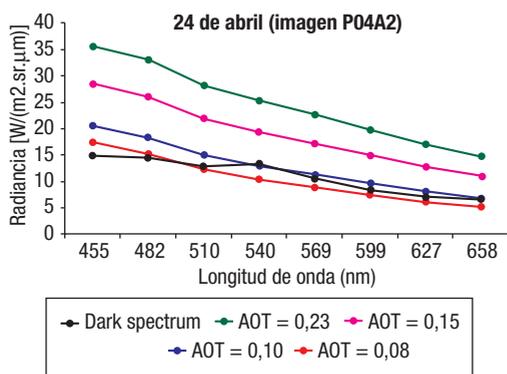


Figura 2. Comparación entre el «dark spectrum» de una imagen AHS del 24 de abril y la radiancia total dispersada simulada para diferentes valores de AOT.

A partir de esta gráfica se puede asumir que el valor de AOT estimado en el momento en que la imagen fue captada es 0,08. Aunque la radiación total dispersada considerando este valor es mayor que el «dark spectrum» en algunas bandas del dominio espectral del visible, consideramos este valor como el AOT real. Para comprobar el efecto de considerar este valor en la estimación de reflectividad superficial, se ha invertido la corrección atmosférica para estimar la radiancia a nivel del sensor que debería haber medido el mismo. Comparando la simulación con el valor real, el RMSE a través de la imagen es de $0,002 \text{ (W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1})$ para todas las bandas, implicando un error relativo entre el 0,008% y 0,003% en radiancias.

En la Tabla 2 se resume los valores de AOT estimados a partir del análisis de todas las imágenes AHS de la campaña CEFLES2. En esta tabla, el error se refiere a la variación temporal de este valor.

Comparando el AOT estimado a partir de las imágenes y el producto de MODIS de AOT, se

Tabla 2. Comparación de los AOT estimados por MODIS y obtenidos de las imágenes AHS

Fecha	AOT (MODIS)	AOT (imagen)
24 abril	0,23	$0,08 \pm 0,00$
30 junio	0,43	$0,09 \pm 0,01$
15 septiembre	0,13	$0,09 \pm 0,01$

puede observar que en todos los casos el producto MODIS sobreestima en promedio 0,15 el valor real de AOT. Esta diferencia es mucho más notable el 30 de junio, lo cual puede ser debido a la presencia de nubes altas y neblina en esta fecha. En consecuencia, debido a que MODIS tiene una resolución espacial menor que AHS, el pixel de MODIS podría incluir alguna nube. Además, la diferencia en altura entre MODIS y AHS, podría situar las nubes altas entre ambos sensores, incluyéndolas MODIS pero no AHS. La sobreestimación del producto MODIS de aerosoles también se ha detectado en anteriores estudios en que validan este producto con datos medidos in situ con un fotómetro solar, principalmente con datos de AERONET (Levy *et al.*, 2005; Papadimas *et al.*, 2008). Estos estudios concluyen que tanto los productos MODIS de aerosoles C4 como C5 sobreestiman los valores de bajo AOT y subestiman los valores altos de AOT, aunque los datos de C5 se ajusten significativamente mejor a los datos de AERONET que los C4 (Papadimas *et al.*, 2008).

Para proceder en la evaluación del producto de reflectividad superficial de MODIS, a continuación se ha realizado el test de la corrección atmosférica con datos in situ para proceder finalmente a la comparación de ambas imágenes.

La Figura 3 muestra la comparación del espectro de dos campos, un trigo de invierno y

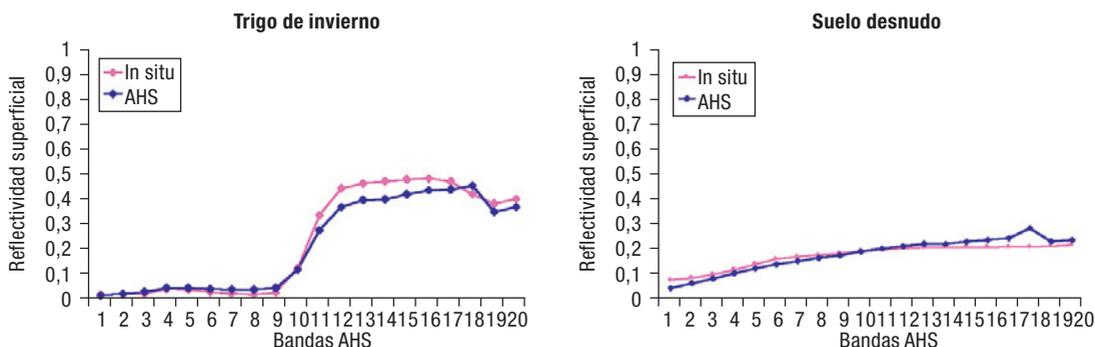


Figura 3. Espectro en el VNIR medido in situ y estimado a partir de una imagen AHS de dos superficies diferentes.

Tabla 3. Valores RMSE al comparar la reflectividad superficial estimada por AHS y los datos in situ

		Banda 9	Banda 12
24 abril	Suelo	0,01	0,03
	Vegetación	0,00	0,04
30 junio	Suelo	0,02	0,01
	Vegetación	0,01	0,09
15 septiembre	Suelo	0,03	0,06
	Vegetación	0,01	0,09
RMSE medio		0,02	0,05

un suelo desnudo, medidos a nivel in situ respecto al estimado a nivel aéreo.

En esta figura se observa una buena concordancia entre los datos in situ y los datos corregidos atmosféricamente. Para realizar el test de la corrección atmosférica pero teniendo en cuenta todas las imágenes AHS y periodos de medidas, hemos centrado el análisis en las bandas utilizadas en la obtención del NDVI, la banda 9 (centrada en 687 nm) y la banda 12 (centrada en 773 nm). En la Tabla 3 se resume el valor de RMSE obtenido al comparar los datos in situ con los datos estimados mediante AHS diferenciando las distintas bandas, fechas y cultivos.

En esta tabla se puede observar que los mayores errores se obtienen para la banda 12 y para vegetación. Este mayor error va ligado al hecho de que en esta región espectral la reflectividad de la vegetación tiene valores mayores. Se observa también que abril es el mes con menores errores. Esto puede ser debido a que en esta fecha se consideran medidas sobre suelos desnudos muy similares y la misma clase de vegetación (trigo) que en estas fechas era muy homogénea. Sin embargo, en junio y septiembre las medidas in situ se centraron sobre diferentes tipos de vegetación (como maíz, girasoles y judías) y suelos desnudos algo distintos (por ejemplo en septiembre se midió en un área quemada). Finalmente, el RMSE medio considerando todas las fechas y tipos de cultivos es 0,02 en la banda 9 y 0,05 en la banda 12.

Una vez obtenida la reflectividad superficial con el sensor aéreo AHS se ha realizado una comparación entre estos valores y el producto de reflectividad superficial de MODIS

(Vermote *et al.*, 1999). Este consta de dos bandas espectrales, la primera cubre la región desde 620 nm a 670 nm y la segunda cubre la región desde 841 nm a 876 nm. En la comparación se los diferentes sensores hemos considerado la equivalencia entre la primera banda de MODIS con la banda 8 de AHS (centrada en 658 nm) y la segunda banda de MODIS con la banda 15 de AHS (centrada en 862 nm).

Por otra parte, la resolución espacial de AHS es de 6 m (ya que en la comparación con MODIS sólo se han tenido en cuenta los vuelos altos de AHS) y la resolución espacial de MODIS es 250 m, por lo que para poder comparar los productos de los distintos sensores se ha degradado la resolución de AHS a 250 m.

En la Figura 4 se puede observar un ejemplo de la diferencia entre las imágenes de reflectividad de AHS y el producto de MODIS para el día 15 de septiembre.

En la Tabla 4 se muestra el valor del RMSE así como el Bias obtenidos al comparar el producto de reflectividad superficial de MODIS con la estimación de la misma de las imágenes AHS e Hyper.

A partir de esta tabla se puede afirmar que la diferencia entre el producto de MODIS y la estimación de la reflectividad superficial por AHS es menor en la banda 1 que en la banda 2. Esto puede ser debido a que la señal en esta última banda es mayor. También se puede remarcar que la principal contribución al RMSE es el Bias y en todos los casos este tiene un valor positivo. Esto indica que el producto de reflectividad superficial de MODIS es en la mayoría de los casos mayor que la estimación con imágenes AHS y principalmente debido a un valor constante. Cabe destacar que el producto MODIS de reflectividad superficial se estima con el código de transferencia radiativa 6S (Vermote *et al.*,

Tabla 4. Valores del RMSE y Bias al comparar la reflectividad superficial estimada a partir de AHS con el producto de reflectividad superficial de MODIS

	Banda 1		Banda 2	
	RMSE	Bias	RMSE	Bias
Abr	0,03	0,02	0,06	0,04
Jun	0,03	0,02	0,08	0,06
Sep	0,03	0,02	0,08	0,08

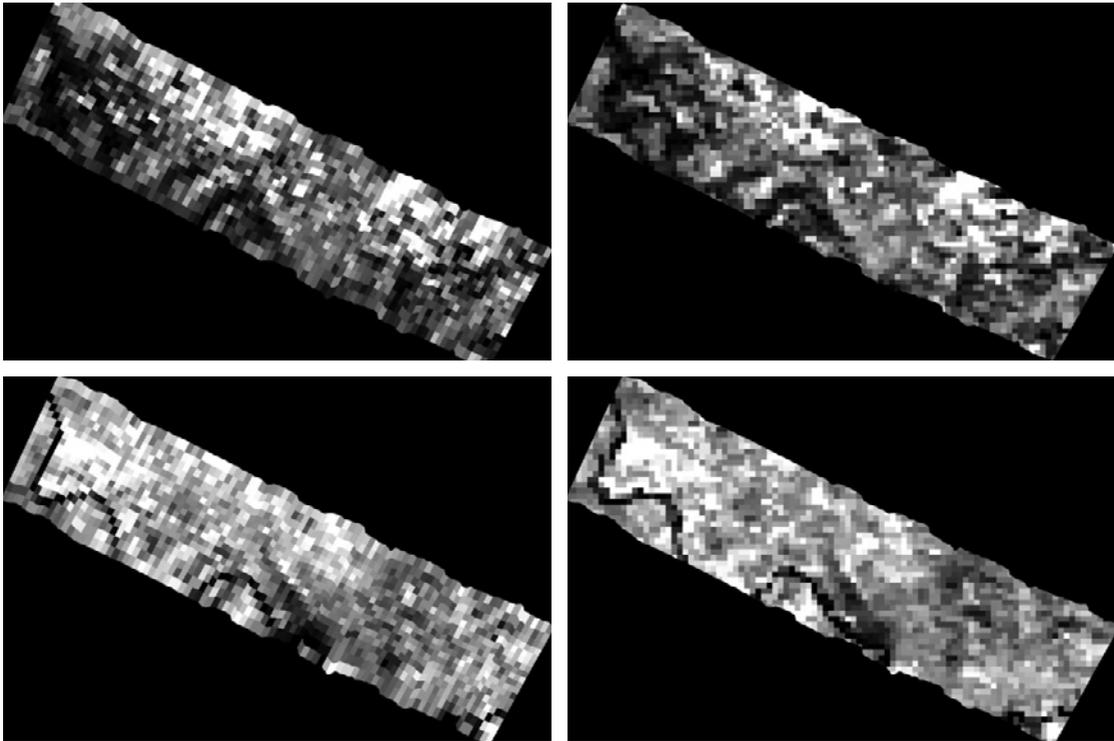


Figura 4. Comparación entre la reflectividad superficial estimada de las imágenes AHS y el producto de reflectividad superficial de MODIS el 15 de septiembre.

2006), en cambio, las imágenes AHS han sido corregidas con el código MODTRAN. En consecuencia, el hecho de haber tenido valores similares, muestra que ambos códigos de transferencia radiativa, en la estimación de reflectividad superficial, proporcionan resultados totalmente comparables.

A partir de estos resultados podemos concluir que en el contexto de la campaña CEFLES2 el producto de reflectividad superficial de MODIS en la banda 1 y 2 es fiable ya que proporciona valores muy similares a la reflectividad superficial estimada a partir de sensores aerotransportados.

Conclusiones

El objetivo de este estudio consistía en evaluar el producto MODIS de reflectividad superficial en el contexto de la campaña CEFLES2. En el estudio, también se ha analizado el producto MODIS de aerosoles y se ha comprobado que en todas las fechas este producto sobreestima el valor de AOT, siendo el caso de junio el de mayor diferencia respecto al valor real.

Esta sobreestimación también ha sido constatada en otros estudios como hemos visto en la sección de resultados. La metodología presentada para la estimación de la reflectividad superficial en el VNIR presenta al ser aplicada a imágenes AHS un RMSE de 0,02 en el visible y 0,05 en el infrarrojo cercano. Al comparar estas imágenes de mayor resolución espacial con el producto MODIS de reflectividad superficial se ha obtenido un RMSE de 0,03 en el visible y 0,08 en el infrarrojo cercano lo que prueba la precisión de este producto MODIS.

Este estudio se ha centrado en una zona agrícola. En un trabajo futuro este estudio se aplicará a una zona urbana al procesar imágenes adquiridas en la campaña DESIREX 2008 (Dual-use European Security IR Experiment) la cual se desarrolló en Julio de 2008 en la ciudad de Madrid.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo en este trabajo por una parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología (TERMASAT, proyecto ESP2005-

07724-C05-04; EODIX, proyecto AYA2008-0595-C04-01) y por otra parte de la Unión Europea (CEFLES2, proyecto 20801/07/I-LG; CEOP-AEGIS, proyecto FP7-ENV-2007-1 proposal No. 212921; WATCH, proyecto 036946).

Referencias

- BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., HOKE, M. L., CHETWYND, J. H., BERNSTEIN, L. S., SHETTLE, E. P., MATTHEW, M. W. & ADLER-GOLDEN, S. M. 2003. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 Users's Manual. *Tech. rep., Air Force Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, USA.*
- CHU, D. A., KAUFMAN, Y. J., ICHOKU, C., REMER, L. A., TANRE, D. & HOLBEN, B. N. 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 8007. doi: 10.1029/2001GL013205
- FERREIRA, N. C., FERREIRA, L. G., HUETE, A. R. & FERREIRA, M. E. 2007. An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 28(1-2): 47-62.
- GUANTER, L., GÓMEZ-CHOVA, L. & MORENO, J. 2008. Coupled retrieval of aerosol optical thickness, columnar water vapour and surface reflectance maps from ENVISAT/MERIS data over land. *Remote Sensing of Environment* 112: 2898-2913.
- LEVY, R. C., REMER, L. A., MARTINS, J. V. & KAUFMAN, Y. J. 2005. Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over Ocean and Land during CLAMS. *Journal of the atmospheric sciences* 62: 974-992
- MU, Q., HEINSCH, F. A., ZHAO, M. & RUNNING, S.W. 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of the Environment*, 111(4): 519-536.
- NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C., HSIA, J. J., GINSBERG, I. W. & LIMPERIS, T. 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *Tech. rep., National Bureau of Standards, US Department of Commerce, Washington, DC, USA.*
- PAPADIMAS C. D., MIHALOPOULOS, N., KANAKIDOU, M., KATSOLIS, B. D. & VARDAS, I. 2008. Assessment of the MODIS Collections C005 and C004 aerosol optical depth products over the Mediterranean basin. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8: 16891-16916
- PU, Z. X., XU, L. & SALOMONSON, V. V. 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 34(6), Art. No. L06.
- REMER, L. A., KAUFMAN, Y. J., TANRE, D., MATTOO, S., CHU, D. A., MARTINS, J. V., LI, R.-R., ICHOKU, C., LEVY, R. C., KLEIDMAN, R. G., ECK, T. F., VERMOTE, E. & HOLBEN, B. N. 2005. The MODIS Aerosol Algorithm, Products and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Special Section, 62: 947-973.
- SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SORIA, G., GÓMEZ, M., BARELLA-ORTIZ, A., ROMAGUERA, M., ZARAGOZA, M., JULIEN, Y., CUENCA, J., ATITAR, M., HIDALGO, V., FRANCH, B., MATTAR, C. *et al.* 2008. Thermal Remote Sensing in the Framework of the SEN2FLEX Project: Field Measurements, Airborne Data and Applications. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 4961-4991.
- VERHOEF, W. & BACH, H. 2003. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models, *Remote Sensing of Environment*, 87: 23-41
- VERMOTE, E. F., TANRE, D., DEUZE, J. L., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., KOTCHENOVA, S. Y. & MIURA, T. 2006. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), 6S User Guide Version 3 (November, 2006), <http://www.6s.ltdri.org>
- VERMOTE, E. F. & VERMEULEN, A. 1999. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). *Algorithm technical Background Document (MODIS).*
- VERMOTE, E. F. & KOTCHENOVA, S. 2008. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces, *J. Geophys. Res.*, 113, D23S90, doi: 10.1029/2007JD009662.

Caso práctico

Aplicación de técnicas de teledetección para la gestión y control del pago de ayudas agrícolas en España

J. M. Vidal Serrano*

*Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA).
Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*

Resumen

Se relatan de forma somera los trabajos de control asistido por teledetección (CATD) en el ámbito del pago de ayudas agrícolas en España. Se hace hincapié en el uso de imágenes por satélite de diferentes resoluciones y sus productos derivados para la asignación correcta de superficies y parcelas agrícolas susceptibles de ayuda. Finalmente, se ofrecen datos orientativos sobre la importancia de estos trabajos a nivel nacional.

Palabras clave: teledetección, ayudas agrícolas, superficies, imágenes satélite, CATD, pago único.

Abstract

Remote sensing techniques application for management and control of agricultural aid schemes in Spain

Control with Remote Sensing (CwRS) of agricultural aid schemes in Spain is discussed throughout this article. It is stressed the use of satellite images in different resolution and their by-products for the correct assignment of areas and agricultural parcels eligible for aid. Finally, orientative data on the importance at national level of these works is given.

Key words: control with remote sensing, agricultural aids, areas, satellite images, CwRS, single payment scheme.

Introducción

Aunque el sector agrario español no supone más de un 4% del Producto Interior Bruto nacional, recibe, en cifras globales, unos 6 mil millones de euros en diversos conceptos de ayuda por parte del Fondo Europeo de Garantía Agrícola (FEAGA), órgano dependiente de la Comisión Europea. Esta gran cantidad de dinero es distribuida a las Comunidades Autónomas, que serán las encargadas de hacerlo llegar a los 939.877 agricultores solicitantes de ayuda de toda España (datos del 2009).

Las ayudas al sector agrícola suponen un gran porcentaje del presupuesto de la Unión

Europea, alrededor del 40% aunque la tendencia es a disminuir esta proporción, y por esta razón la Comisión Europea exige una correcta gestión y control del gasto de este dinero. En particular, considera necesario que los distintos Estados miembros se aseguren de que el dinero llega no sólo al destinatario adecuado, sino también al que cumple la normativa vigente, es decir, al receptor legítimo al que están destinadas las ayudas. Para lograr esto, ha establecido una serie de requisitos de control que deben cumplirse para el correcto pago de las diferentes líneas de ayuda. La normativa legal que incluye estos requisitos se revisa periódicamente desde que se establecieron los pilares de la Política Agrícola Común, en particular desde el año 1992, y en la actualidad está vigente por medio de los Reglamentos (CE)

* Autor para la correspondencia: jvidalse@mapa.es
Recibido: 26-07-10; Aceptado: 06-05-11.

nº 73/2009 del Consejo y 1122/2009 de la Comisión. Estos reglamentos especifican, entre otras cosas, que los controles que deberán realizarse sobre las solicitudes de ayuda de una campaña concreta deberán ser tanto administrativos como sobre el terreno.

Los controles administrativos se realizan sobre la totalidad de las solicitudes de ayuda presentadas; es un proceso programable informáticamente que consume relativamente pocos recursos, tanto en tiempo como en mano de obra. Se realizan a tres niveles: datos del solicitante, datos de los recintos SIGPAC solicitados y derechos de pago único. Su principal finalidad es detectar errores en las declaraciones previamente a los controles sobre el terreno, de tal modo que en muchos casos el agricultor tendrá abierto un plazo en el que podrá modificar su solicitud si el control detectara que esto fuera necesario.

Los controles sobre el terreno, por el contrario, se realizan sobre una muestra de las solicitudes de ayuda que la Comisión Europea establece en un mínimo de un 5% de solicitudes. En España, en el año 2009, se controlaron un 5,76% de expedientes (54.637 solicitudes). La intención de dichos controles es verificar en el campo que la realidad del terreno se corresponde a lo solicitado por el agricultor. Son de carácter definitivo, es decir, los agricultores no tienen ya posibilidad de modificar sus solicitudes de ayuda en caso de error o de irregularidad y deberán, en consecuencia, afrontar las sanciones que corresponda.

Los controles sobre el terreno consumen tiempo y recursos, ya que suponen el desplazamiento de personal y equipos (receptores GPS u otros materiales de medición, ordenadores portátiles, cámaras digitales) durante un período largo de tiempo, entre 2 y 5 meses. Además deben realizarse en un momento en que puedan evaluarse las condiciones adecuadas del cultivo de que se trate, por lo que además de estar condicionados por los plazos administrativos, están limitados por la estacionalidad. Por esta razón, y desde el año 1992 mencionado anteriormente, el Consejo de Europa admite que los Estados miembros puedan utilizar técnicas de teledetección para llevar a cabo el control sobre el terreno de las ayudas agrícolas. En España dichas técnicas empezaron a utilizarse en 1993.

Organización del control asistido por teledetección

Tal como puede apreciarse en la Figura 1, en la realización de los Controles Asistidos por Teledetección (CATD) hay tres actores principales que interactúan entre sí. La Comisión Europea, a través de la Unidad MARS del Centro de Investigación Conjunta (JRC, <http://mars.jrc.it/>) elabora el **Pliego de Condiciones Técnicas** que deben cumplir los contratistas (sean Estados miembros o empresas contratadas por los mismos) para la correcta realización del CATD, así como otros documentos de trabajo relacionados

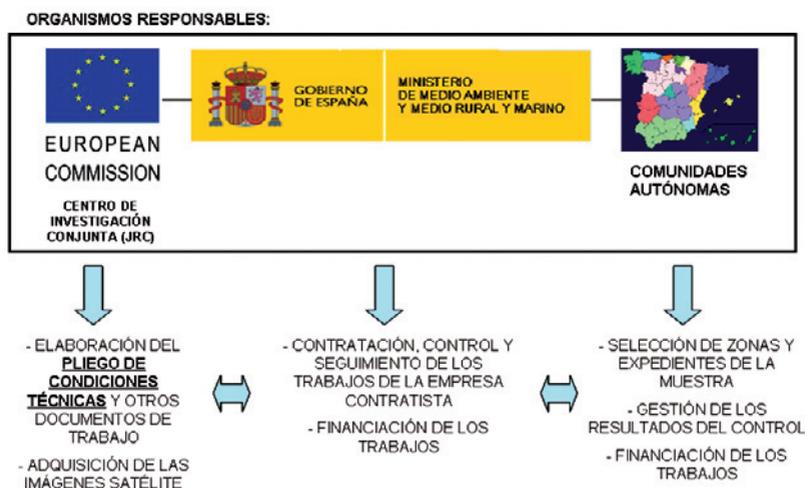


Figura 1. Organización del Control Asistido por Teledetección en España.

Tabla 1. Fases de trabajo en el CATD

1. Selección de zonas
2. Selección de la muestra de solicitudes
3. Trabajos previos a la fotointerpretación
 - 3.1. Acopio de la documentación necesaria
 - 3.2. Encuesta de campo
4. Fotointerpretación
5. Evaluación para vista rápida de campo
6. Vista rápida de campo
7. Evaluación para entrega de resultados a la administración
8. Gestión de los resultados

- Fases realizadas por la Administración.
- Fases realizadas por la Empresa contratista.

con la materia: normas de ortorrectificación de imágenes satélite, selección de zonas y expedientes de la muestra, etc. Adicionalmente negocia con los distintos proveedores la adquisición de imágenes de satélite a un precio fijo. Según datos 2010, para VHR este precio es de 22 euros/km² y para HR es de 3.250 euros por zona, precio único para todos los proveedores. El presupuesto del JRC asume el coste total de 7,6 millones de euros (para todo el territorio de la Unión Europea), por lo que las imágenes son proporcionadas a los Estados miembros gratuitamente. En España este gasto será de 648.500 euros.

El Gobierno de España, a través del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, lleva a cabo la financiación, contratación y seguimiento de los trabajos de la empresa encargada de la realización de los mismos (Tragsatec, S.A.). Las Comunidades Autónomas, por su parte, colaboran en la financiación de dichos trabajos, y además de gestionar los resultados finales del control son las responsables de seleccionar tanto las zonas como los expedientes que se vayan a controlar.

Las fases del control pueden resumirse en la Tabla 1.

Fases de trabajo

Selección de zonas y muestra de solicitudes

La normativa ofrece dos posibilidades de selección de la muestra, tanto para las zonas co-

mo para las solicitudes: de forma aleatoria o por análisis de riesgo. En el caso de la selección de zonas, deberá elegirse si la zona es de tipo 1, 2 ó 3 en función del tamaño de la ventana o ventanas de control que la Comunidad Autónoma desee tomar (400, 900 ó 2.000 km²). Si la selección de las mismas es por análisis de riesgo, deberán tenerse en cuenta factores como el importe de las ayudas que se han solicitado, los diferentes regímenes de ayuda solicitados presentes en la zona, etc. Puede observarse en la Figura 2 las diferentes ventanas que se han seleccionado para la campaña 2010. En total, hay 7 zonas tipo 1, 3 de tipo 2 y 8 de tipo 3. Las zonas se denominan con un código alfanumérico de cuatro caracteres para facilitar la gestión del JRC a la hora de contratar la adquisición de las imágenes satélite necesarias.

En el caso de las solicitudes de ayuda, si la selección de expedientes es aleatoria la Comisión Europea recomienda que se incluyan al menos el 50% de los expedientes que contengan un mínimo de un 80% de superficie dentro de la zona de control (60% en España). Si la selección es por análisis de riesgo, de nuevo tendrán que tenerse en cuenta diferentes factores tales como la presencia de irregularidades en campañas anteriores, etc. El resultado final, invariablemente, es un conjunto de parcelas pertenecientes a diferentes agricultores que serán sometidas a control.



Figura 2. Mapa de localización de las zonas de control 2010.

Trabajos previos a la fotointerpretación

Previamente los trabajos de fotointerpretación, debe procederse a recopilar una serie de documentaciones.

a) *Bases de datos SIGPAC*: El Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) es el sistema de referencia obligatorio para la realización de declaraciones y solicitudes de ayuda, es decir, todas las parcelas agrícolas deben ser declaradas o solicitadas utilizando este sistema de referencia. Por lo tanto, se recopila toda la información vectorial SIGPAC de las zonas de control.

b) *Solicitudes de ayuda*: Lógicamente, debe recopilarse también toda la información proporcionada por los agricultores en sus solicitudes. Esto servirá para asignar correctamente las parcelas y superficies cultivadas.

c) *Croquis de los agricultores*: En el caso de que haya parcelas declaradas por más de un agricultor, la legislación española exige que la solicitud de ayuda vaya acompañada del correspondiente croquis que permita la identificación inequívoca de la parcela cultivada por el agricultor declarante. Actualmente la tecnología permite su recopilación en formato digital.

d) *Resultados de la Encuesta de Campo*: Se lleva a cabo una encuesta a nivel de campo, para cada zona, con el objetivo de conocer la respuesta de cada utilización agrícola en las imágenes por satélite. Esto permitirá establecer un mapa de índices de vegetación. Se hace sobre una muestra de polígonos dentro de la zona de control, con unos criterios orientativos (por ejemplo, expedientes con más de 25 recintos SIGPAC declarados, etc.).

e) *Normas de Fotointerpretación*: Conjuntamente con los resultados de la Encuesta de Campo, se recopilan todas las particularidades asociadas al terreno de cada zona, de modo que la fotointerpretación de los usos del suelo sea lo más precisa posible.

f) *Calendario de cultivos de la zona*.

g) *Imágenes satélite*.

Las imágenes tomadas por satélite son fundamentales para realizar el CATD. Ellas permitirán adquirir el conocimiento espacial y temporal necesario de la zona de control, que

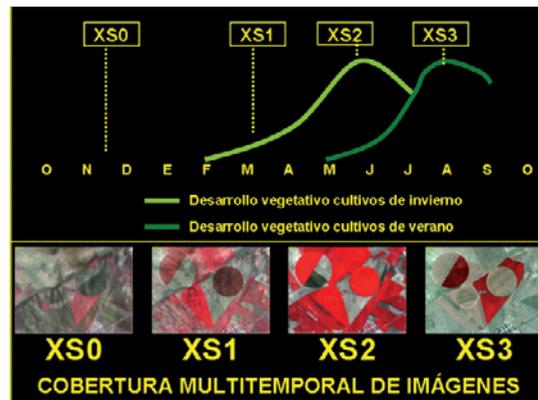


Figura 3. Momentos de toma de imágenes para el CATD.

aportará conocimiento sobre el tipo de vegetación y el estado fenológico de los cultivos sobre el terreno, así como presencia de otros compuestos específicos del suelo.

La toma de imágenes se realizará sobre varias bandas del espectro visible y a lo largo de varios períodos de tiempo en relación con los cultivos que se controlan, de modo que se posea el máximo de información asociada. En total, se toman cuatro imágenes (denominadas XS0, XS1, XS2 y XS3), de las cuales la XS2 es VHR, de Muy Alta Resolución, y las demás HR, de Alta Resolución. El momento de toma coincide con diferentes momentos del desarrollo vegetativo de los cultivos (véase Fig. 3).

Adicionalmente se utilizan, como apoyo, imágenes MR, de Media Resolución, que generalmente se obtienen de otras fuentes distintas al JRC, como el Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Fomento. En la Tabla 2 se resumen los satélites más utilizados en España para el CATD,

Las imágenes se obtienen sin ortorrectificar, por lo que es necesario llevar a cabo dicho trabajo en gabinete. Para las imágenes SPOT y estándares Landsat, se realiza una Ororrectificación, mientras que para las imágenes de las que no se posee el modelo orbital (IRS LISS e imágenes Landsat no estándares) se utiliza un modelo polinómico. Para las imágenes RapidEye se emplea un modelo paramétrico (Transformación proyectiva de 3 dimensiones). Estos procesos se llevan a cabo con el programa ERDAS Imagine 9.3.

La toma de puntos de control (GCP) se hace sobre el mosaico de imágenes Spot 5 de ve-

Tabla 2. Sensores utilizados en CATD en España

Satélite Sensor	Resolución Espacial		Resolución Multiespectral	Resolución Radiométrica
	Pan	Multiesp.		
VHR				
QUICKBIRD	0,6 m	2,4 m	4 bandas (Azul, Verde, Roja, IRC)	11 bit
IKONOS	1 m	4 m	4 bandas (Azul, Verde, Roja, IRC)	11 bit
GEOEYE-1	0,41 m	1,65 m	4 bandas (Azul, Verde, Roja, IRC)	11 bit
WORLDVIEW-2 (en pruebas)	0,46 m	1,84 m	8 bandas (Azul1, Azul2, Verde, Amarillo, Rojo1, Rojo2, IRC1, IRC2)	11 bit
HR				
SPOT 5 Pan/XI	5 m (2,5 m supermode)	10 m	4 bandas (Verde, Roja, IRC, IRM)	8 bit
RAPIDEYE	—	5 m	5 bandas (Azul, Verde, Rojo, límite Rojo, IRC)	12-8 bit
MR				
SPOT 4 Pan/XI	10 m	20 m	4 bandas (Verde, Roja, IRC, IRM)	8 bit
IRS Pan/LISS III	6 m	23 m	4 bandas (Roja, Verde, IRC, IRM)	6 bit/7 bit
LANDSAT 5 TM	—	30 m	7 bandas (Azul, Verde, Roja, IRC, IRM, Térmico)	8 bit

rano de 2005 del PNT (2,5 metros de resolución espacial). Dicha selección se lleva a cabo mediante técnicas automáticas de correlación que permiten agilizar el proceso de medición de GCP dentro de la fase de georreferenciación, siendo el número mínimo por imagen superior a 20. La precisión obtenida en la georreferenciación viene dada por el error cuadrático medio (RMSE) de los residuos de todos los GCP medidos, que para todas las escenas de media y alta resolución tiene que ser inferior a un píxel o su equivalente al terreno. En este proceso se está utilizando el módulo Autosync de ERDAS Imagine que permite la selección y transferencia automática de los GCP, utilizando como imagen de referencia la imagen Spot 5 del PNT. Posteriormente, se revisan los puntos, tomando nuevos GCP en las zonas que no han tenido buena correlación y eliminando aquellos con errores más altos. El Modelo Digital del Terreno (MDT) empleado en la ortorrectificación de las imágenes de media resolución procede del proyecto SIGPAC. El paso de malla de este MDT es de 20 metros, con una precisión en Z de 5 metros.

En la fase final del proceso de corrección geométrica se realiza un remuestreo de la imagen que tiene como finalidad colocar los píxeles en la posición geométrica adecuada al sistema de coordenadas de referencia. Este proceso modi-

fica la posición de la malla del ráster, lo que obliga a recalcular los valores que le corresponden a cada píxel después de georreferenciar, mediante interpolación. En el proceso de remuestreo también se define el tamaño de salida del píxel que para todas las imágenes de media resolución (SPOT 4, Landsat 5 e IRS LISS) es de 20 metros, mientras que para las imágenes con resoluciones mayores se mantiene su tamaño de píxel teórico (10 metros para SPOT 5 multiespectral y 5 metros para Rapideye).

Para las imágenes VHR, en el caso de las imágenes Ikonos, Quickbird, GeoEye-1 y WorldView-2, el proceso de corrección geométrica se realiza con el módulo Ortho Engine del programa PCI V10.3.1. El modelo empleado es el de «Rational Functions» que utiliza el fichero RPC (Rapid Positioning Capability) suministrado con las imágenes. Este fichero contiene los coeficientes de la función que resuelve el modelo matemático de la imagen. Estos coeficientes los proporciona el distribuidor de las imágenes y se obtienen a partir de las efemérides del satélite.

Los GCP utilizados en la fase de medición tienen tres procedencias posibles: puntos GPS tomados en campo, puntos pertenecientes a la base de datos corporativa y puntos de aerotriangulación. La precisión de los puntos obtenidos por GPS es siempre mejor que 0,30 m.

en X, Y y Z, mientras que la precisión de los GCP de aerotriangulación, al ser extraídos de diferentes fuentes (vuelos analógicos o digitales), tienen una precisión que oscila entre 0,25 m (vuelo digital, Z = 0,60 m) y 0,60 m (vuelo analógico, Z = 2 m).

El MDT empleado para la corrección de las imágenes VHR procede del proyecto SIGPAC actualizado con los sucesivos lotes del PNOA. En algunas zonas el MDT puede ser aportado por las Comunidades Autónomas.

En el caso de las imágenes VHR el método de remuestreo utilizado es bilineal, tal como indica el manual del JRC para las imágenes sobre las que se realizan fusiones y labores de fotointerpretación (ver Tabla 3). El tamaño de

píxel de salida, tras el proceso de georreferenciación, para las bandas multiespectral y pancromática respectivamente, es de 4 y 1 m para Ikonos, de 2,4 y 0,6 m para Quickbird y de 2 y 0,5 m para GeoEye-1 y WorldView-2.

Una vez se obtiene la imagen ortorrectificada se procede a elaborar los productos derivados que van a utilizarse para el CATD:

— *Imagen de fusión*: En el proceso de fusión se utiliza la banda pancromática VHR y las multiespectrales (bien de la propia VHR o de una imagen de media-alta resolución) de manera que se obtenga una única imagen que tenga la resolución espacial de la banda pancromática (1 m para Ikonos, 0,6 m para Quickbird y 0,5 m para GeoEye-1 y World-

Tabla 3. Resumen del procedimiento de ortorrectificación de imágenes satélite propuesto por el JRC

Fase	Procedimiento	Tolerancia aceptable
Modelo orbital	No se requiere control.	Presente en la información de encabezado.
Selección de GCP en HR (SPOT, IRS, Landsat)	Los GCP deberían quedar bien distribuidos, por ejemplo uno por cada celda de una malla de 4 × 4 que divide la imagen con puntos adicionales lo más cerca posible de la esquina/borde.	Cantidad de combamiento polinómico (no para VHR): > 15 GCP por fotograma u ortorrectificación de modelo físico (al menos 9 GCP por fotograma): registrar el número en los metadatos/Registros de Control de Calidad (RCC)
Selección de GCP en VHR El proveedor aporta información con un fichero de capacidad de posicionamiento rápido (RPC)	La recomendación es utilizar los datos proporcionados por el vendedor – podrían utilizarse hasta dos GCP por fotograma o 100-200 km ² aunque sería preferible utilizar 4 puntos localizados en las esquinas de la imagen. Para las tiras de imagen de Ikonos, añadir como mínimo dos GCP por cada 100 km ² adicionales. Para el procesado en bloque de VHR (múltiples fotogramas), los GCP pueden reducirse hasta a 1 por fotograma si hay suficientes puntos de enganche disponibles entre imágenes.	Mínimo, 2-4 por fotograma, más 2 por cada 100 km ² de tira de imagen. La distribución de GCP no es crítica, pero se prefiere que estén bien distribuidos. Registrar el número en los metadatos/RCC. Los GCP pueden caer en zonas de solape (esquinas de imagen), pero no es crítico.
Selección de GCP en VHR Con modelo físico o generación de RPC a partir de control terrestre	Para ortorrectificación de VHR utilizando un modelo de sensor físico, se requieren como mínimo 9 GCP, habitualmente por imagen (100 km ²). Para EROS B y Formosat-2 los GCP deberían estar distribuidos equitativamente. Para las escenas vectoriales de EROS A este número debería doblarse. Para Formosat-2, la cantidad de GCP debería ser de 15 por escena. La generación de RPC requiere de muchos GCP: no se recomienda.	Se requieren más de 9 GCP (modelo físico) o 16 GCP (generación de RPC) por fotograma. La distribución de GCP debería cubrir completamente la Zona de Interés (AOI). Registrar el número en los metadatos/RCC.

Tabla 3 (cont). Resumen del procedimiento de ortorrectificación de imágenes satélite propuesto por el JRC

Fase	Procedimiento	Tolerancia aceptable
Control de Errores GCP	HR: Ajustar una polinómica de primer orden a los GCP. VHR: Debería calcularse el residuo en aquellos casos en que esté disponible la redundancia de los GCP; si no es así comprobar puntos independientes.	El residuo máximo no debería superar el triple del RMSE objetivo. Registrar el número en los metadatos/RCC.
<i>Sólo para combamiento polinómico</i>	<i>Utilizar una polinómica de primer o segundo orden; no debería utilizarse ninguna de tercer orden.</i>	<i>Registrar el orden polinómico en los metadatos/RCC.</i>
Resultados de Rectificación	Calcular discrepancias de RMSE sobre 10 puntos de control (si es posible), O BIEN registrar la recta de regresión de la suma de cuadrados (RSS), si está disponible. Registrar los residuos de cada GCP y su RMSE en comparación con el modelo ajustado.	Punto de control RMSE < tolerancia de la precisión geométrica. $\sqrt{\text{RSS}} < \text{tolerancia de la precisión geométrica}$. RMSE, si se calcula sobre residuos debería < $0,5 \times \text{tolerancia de la precisión geométrica}$: Guardar GCP/residuos en archivo. Registrar el resumen de resultados en los metadatos/RCC.
Remuestreo	Para imágenes que sea poco probable que vayan a ser cuantitativamente clasificadas/analizadas —particularmente imágenes pancromáticas o pansharpened— es apropiada la interpolación bilineal o la convolución cúbica; el tamaño de salida del píxel debería ser igual aproximadamente al tamaño de entrada del píxel. Se puede utilizar el método de vecino más próximo si está justificado (por ejemplo, para clasificación), pero el tamaño de salida del píxel debería ser $0,5x$ tamaño de entrada del píxel.	Registrar el método de remuestreo y el tamaño de salida del píxel.
Control de Precisión Visual	Superponer datos de mapas digitales sobre la imagen e inspeccionar sistemáticamente.	Control independiente por parte del supervisor. Registrar Aceptado/No Aceptado y fecha de inspección de la imagen en el RCC.
Precisión de la Imagen Máster	Medir la precisión de la imagen máster utilizando aquellos puntos de control que no se utilizaron como GCP durante la corrección geométrica.	Mínimo de 20 puntos de control distribuidos en una malla regular. Precisión: $3 \times \text{RMSE tolerable}$. Archivar registro fechado de los resultados de control. Registrar los resultados en los metadatos e identificar como imagen máster.

View-2), pero con la resolución espectral de las bandas multispectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano y las intermedias para el caso de WorldView-2). Los métodos de fusión empleados varían en función de la in-

formación a integrar. Para fusión de pancromática y multispectral VHR se utiliza el método *Pansharp* del software de PCI Geomatics, y para fusión de pancromática VHR y multispectral HR se utiliza el método

Brovey, proporcionado por el software de ERDAS.

— *Compuesto en falso color*: Para cada una de las imágenes multispectrales de media y alta resolución y de fusión se genera una composición en falso color (RGB) que permite resaltar el nivel de actividad vegetativa en la zona de análisis, lo cual será esencial para la fase de fotointerpretación. En las composiciones en falso color la actividad vegetativa se relaciona con distintas tonalidades de rojo, ya que se hace corresponder la banda espectral del infrarrojo cercano con el canal rojo, donde la cobertura vegetal refleja más radiación, virando hacia el verde conforme desciende el nivel de actividad vegetativa. Estos compuestos en falso color, dependiendo del tipo de cultivo y de su estado vegetativo tendrán una respuesta distinta en color e intensidad dentro de la imagen y a lo largo del tiempo.

— *Generación de la composición del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) de tres fechas*: De cada imagen multispectral se elabora un índice de vegetación normalizado (NDVI) correlacionado con la cantidad de biomasa y pigmentos fotosintéticos existentes en cada píxel. Este índice compara el valor de dos bandas, el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo

visible (R). Las imágenes de los NDVI de cada una de las fechas se componen en dos imágenes multitemporales, una para la primera fase (imágenes XS0, 1 y 2) y otra para la segunda (XS1, 2 y 3). La composición del NDVI se realiza de manera que cada canal de color (rojo, verde, azul) se hace corresponder a una de las tres fechas. Según predomine un color u otro en esta imagen se identifican cultivos con diferentes ciclos fenológicos. En el caso más sencillo, un cultivo aparecerá azul cuando esté activo sólo en la primera imagen, rojo cuando sólo tenga actividad en la segunda imagen o verde cuando éste presente actividad sólo en la tercera imagen. Las mezclas de estos colores indican actividad vegetativa de un cultivo en más de una imagen.

— *Clasificación automatizada*: Mediante procesos informáticos que utilizan, entre otras fuentes de datos, la información residente en el SIOSE, utilizando algoritmos basándose en las diferentes respuestas en las bandas del espectro de los distintos usos del suelo, y comparándolos con los datos reales de la zona, se obtiene una imagen que consiste en un mapa de usos del suelo donde se le ha aplicado una paleta de color que identifica un uso y una precisión determinada (75 y 85%).

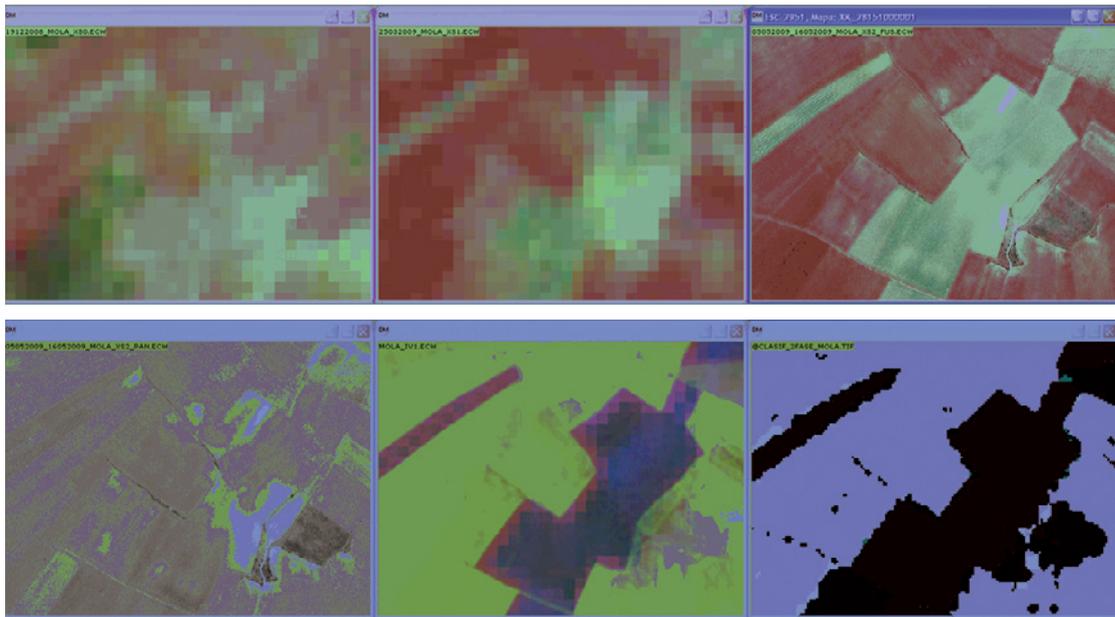


Figura 4. Imágenes satélite y productos derivados utilizados en CATD (las tres imágenes superiores son compuestas de falso color de HR —primera y segunda— y VHR, la primera inferior es la VHR pancromática, la segunda es la imagen NDVI y la tercera es la imagen clasificada).

Fotointerpretación

La fotointerpretación incluye a todos los procesos necesarios para comprobar que el parcelario se ajusta a la imagen (si esto es necesario de comprobar), la subdivisión de usos dentro de los recintos declarados y la asignación de códigos de usos del suelo, que ayudarán a determinar si un recinto ha sido declarado correctamente o no. La subdivisión se realiza a nivel de usos permanentes del terreno, para luego pasar a otros usos no admisibles para el pago de ayudas y finalmente todos aquellos usos admisibles. El fotointérprete tiene a su disposición toda la documentación recopilada en el apartado anterior con el fin de que la asignación de códigos sea lo más precisa posible.

Evaluación

El proceso de evaluación consiste en asignar las diferentes líneas de declaración de las solicitudes de los agricultores a los recintos que se han fotointerpretado y comprobar que la superficie y uso fotointerpretados se corresponden con dichas líneas de declaración. Todo ello realizado mediante la aplicación de fórmulas matemáticas programables informáticamente. La evaluación puede hacerse en dos fases (una

para visita rápida y otra para entrega de resultados a la Administración) o en una sola.

Para comprender mejor en qué consiste el proceso de evaluación, hay que entender algunos conceptos relativos a la solicitud de ayudas:

— Expediente: se denomina expediente a cualquier solicitud única que lleva un número de registro único y distinguible. Dentro de un expediente pueden controlarse la totalidad de parcelas solicitadas (expediente completo) o sólo una parte de ellas (expediente incompleto).

— Línea de declaración: cada recinto SIG-PAC declarado por el agricultor en su solicitud. Un recinto es una porción de parcela catastral con un único uso continuo del terreno. En la reglamentación comunitaria se correspondería a la definición de «parcela de referencia».

— Bloque: clasificación de las diferentes ayudas agrícolas que pueden solicitarse. Una línea de declaración puede contener varios bloques, en caso de ser así a cada bloque se le denominará como sublínea.

— Grupo: conjunto de sublíneas que solicitan un mismo bloque de ayuda (estaría constituido por varios recintos).

— Parcela agrícola: igual que en grupo, pero en este caso las sublíneas se corresponden con recintos colindantes entre sí.

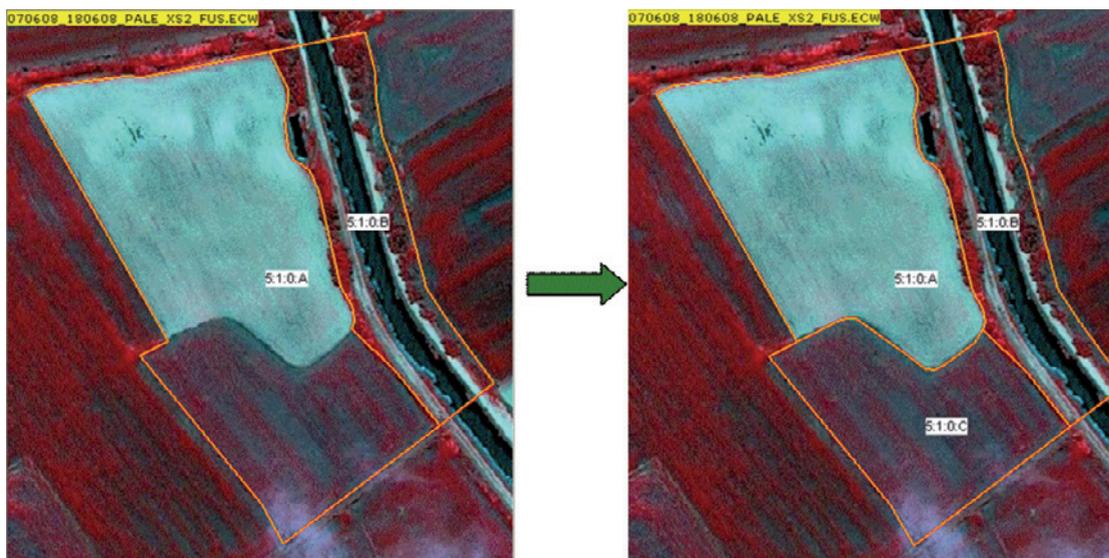


Figura 5. Ejemplo de fotointerpretación. Se ha subdividido la porción del recinto en el que se observa actividad vegetativa y se le ha asignado un código (5:1:0:C).

— Subrecinto: subdivisión de un recinto, producto de los trabajos previos de fotointerpretación.

La evaluación se hace a cuatro niveles: a nivel de recinto, a nivel de parcela agrícola, a nivel de grupo y a nivel de expediente. Para visita rápida sólo es necesario evaluar a nivel de recinto y de parcela agrícola.

El proceso general de evaluación a nivel de recinto puede resumirse en la figura 6. En el ejemplo, el fotointérprete ha subdividido el recinto 8:1:0 en dos, tras observar actividad vegetativa en una parte del mismo, asignando a los subrecintos resultantes los códigos 8:1:0:a y b, respectivamente. El subrecinto 8:1:0:a es medido en pantalla dando una superficie de 2,12 ha. Ya en el proceso de evaluación, se observa que en la línea de declaración 1 (LD1) el agricultor ha declarado que el recinto 8:1:0 tiene 2,12 ha de cebada, para los que ha solicitado ayudas para el bloque pago único —desacoplada (sublínea 1) y ayuda por fomento de la rotación— acoplada (sublínea 2). No solicita ninguna ayuda más. Adicionalmente, aporta un croquis en el que ha delimitado la porción del recinto por la que está solicitando ayuda. A simple vista puede verse en el croquis que la delimitación es muy similar a la fotointerpre-

tación, por lo que se considera válido y se asigna la LD1 al subrecinto 8:1:0:a, asignándole posteriormente un código de evaluación.

Dentro de cada línea de declaración se evalúan todas y cada una de las sublíneas o bloques, de modo que una misma línea de declaración puede ser evaluada tres veces. La Tabla 4 muestra los diferentes bloques de ayuda.

Para la evaluación a nivel de parcela agrícola, el proceso seguido es el mismo, con la salvedad de que es necesario crear una «entidad virtual» matemática que unirá los recintos colindantes declarados dentro del mismo expediente para el mismo grupo de cultivo. Puede verse mejor en la Figura 7, donde los recintos 1 y 2 colindantes generarían tres parcelas agrícolas diferentes, una para el bloque de pago único, otra para el bloque de rotación y otra para el bloque de ayuda específica (algodón).

Para la evaluación por grupo de cultivo se procede a asignar las superficies que corresponden a cada grupo, en función de lo que se declara y lo que realmente se evalúa. Puede ser necesario recurrir a algún tipo de tolerancia técnica. Normalmente esto es así cuando un recinto es declarado por varios agricultores y hay varios usos fotointerpretados, ya que el croquis que es obligatorio presentar no es más que un

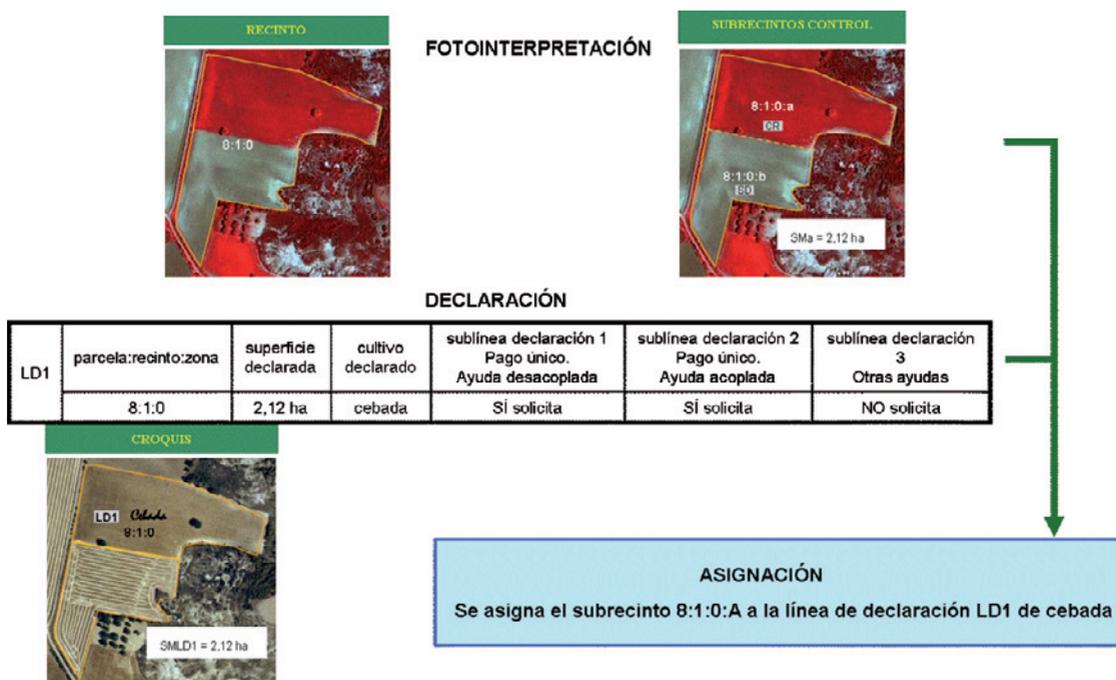


Figura 6. Proceso de evaluación.

Tabla 4. Bloques de ayuda para la evaluación en el CATD

Bloque pago único	Bloque pagos por rotación y otros	Bloque específicos
<i>Régimen pago único</i> <i>Pagos desacoplados</i>	<p><i>Pagos por rotación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - GR cereales. - GR oleag., proteaginosas, lino y cáñamo. - GR leguminosas acogidas a programa de fomento de la rotación. <p><i>Otros grupos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - GR superficie forrajera. - GR barbechos. - GR no subvencionables. 	<p><i>Otros regímenes de ayuda</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - GR prima a proteaginosas - GR pago específico arroz y semillas de arroz. - GR frutos de cáscara. - GR patata para fécula. - GR semillas. - GR algodón. - GR tomate pelado entero. - GR tomate, productos elaborados distintos de pelado entero. - GR remolacha azucarera. - GR calidad leguminosas. - GR tabaco. - GR ayuda complementaria al avellano.

esquema orientativo. La tolerancia de medición viene expresada en función del tamaño del píxel de la imagen utilizada; para Ikonos, por ejemplo, es de 1,25 metros x perímetro del recinto. En ningún caso pueden excederse ni la superficie que ha declarado el agricultor (si éste declara 2 ha, no pueden asignársele 2,1) ni la superficie que indica el SIGPAC. Además se establece una limitación máxima de 1 ha de superficie de tolerancia.

La evaluación a nivel de expediente se hace por medio de dos test; uno de conformidad y otro de integridad. El primero determinará si el expediente es aceptado o rechazado, por medio de unos criterios de aceptación establecidos por el JRC. Como norma general, un expediente se considerará aceptado cuando todos

los grupos de cultivo admisibles para la ayuda de ese expediente se consideren aceptados. También se admite un margen de tolerancia de 0,1 ha siempre que esta superficie no supere el 20% del total, y sin compensaciones entre grupos (no se puede asignar la superficie excedente de un grupo a otro).

El test de integridad tiene como objetivo determinar si el expediente es válido para ser controlado por teledetección. Esta validez se establece en función de dos cosas: la cantidad de líneas de declaración dudosas (la superficie evaluada corresponde a la declarada pero no es posible aceptar la línea de declaración) y la cantidad de superficie dudosa. Los criterios de aceptación son establecidos de nuevo por el JRC.

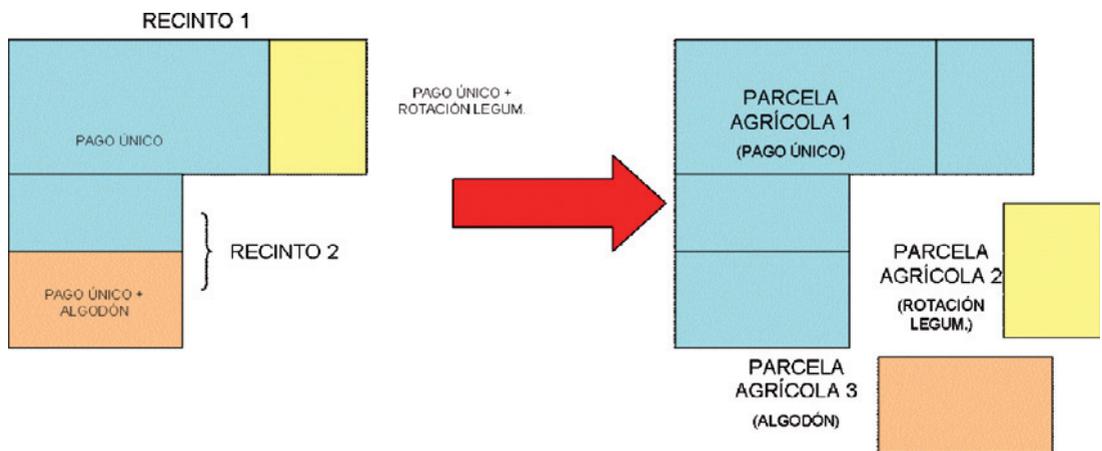


Figura 7. Evaluación por parcela agrícola.

Visita Rápida de Campo

En la visita rápida de campo se van a ver:

- Recintos rechazados por uso o por imposibilidad de interpretación de ese uso.
- Recintos rechazados por superficie (recintos declarados por más de un agricultor).
- Recintos dudosos (presencia de nubes, fuera de imagen, respuestas similares de cultivos en las imágenes compuestas).

El controlador toma nota del uso de terreno, del estado del cultivo y de los límites de la superficie ocupada por cada uso. Para apoyar su trabajo toma fotografías y vídeos digitales que posteriormente se acompañarán al informe de resultados del expediente. La dirección de toma de los mismos también se registra para dar mayor fiabilidad. Se anota también la fecha de realización de la inspección, así como se identifica al técnico que la ha realizado.

La documentación de que se dispone para el control está tanto en formato papel (pañoleta 1:50.000 superpuesta sobre imágenes SIGPAC, salidas gráficas de la zona de análisis) como en formato digital (PDA con GPS y módem HSDPA para el envío de datos por telefonía 3G). El controlador indica constantemente su posición, por lo que es posible hacer un seguimiento completo de su actividad y programar las inspecciones mediante aplicaciones informáticas de gestión. Así mismo, en las zonas donde la cobertura lo permite, remite todos los datos por telefonía móvil 3G, los cuales son recogidos por un servicio Web que integra toda la información en una base de datos central. En caso de no tener cobertura se utilizan tarjetas de memoria miniSD para el almacenamiento de datos.

Gestión de Resultados por parte de la Administración

Con el informe final de resultados, que se acompaña de diversos manuales asociados, se aporta la aplicación informática ED@CON, que integra en una única interfaz la capacidad de realizar consultas sobre expedientes, incluyendo sus datos de declaración y de SIGPAC, conjuntamente con la visualización de todas las imágenes disponibles relativas a los mismos (ver Fig. 8), incluyendo tanto las imágenes

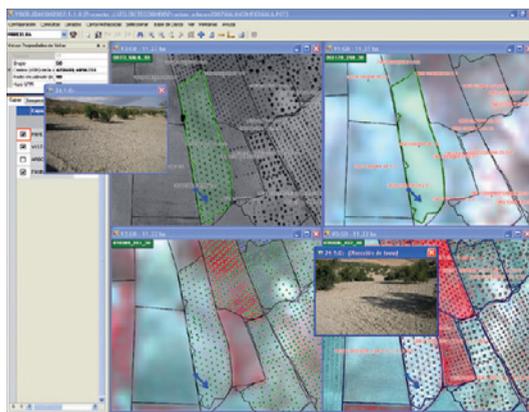


Figura 8. Aspecto externo de la aplicación ED@CON. Las flechas azules indican la dirección de toma de las fotografías.

multiespectrales como las fotografías digitales y los vídeos tomados en aquellos recintos que han presentado problemas.

Esta aplicación está diseñada para proporcionar el máximo de servicio e información a los gestores de las Comunidades Autónomas, ya que permite la generación de cartas oficiales (con textos pregenerables y diversos grados de adaptabilidad a medida de las Comunidades Autónomas), conjuntamente con fichas completas de cada expediente, detallando las incidencias y aportando fotografías de apoyo. En principio la aplicación no maneja datos personales (únicamente referencias de expediente), aunque esto también puede ser adaptable según las necesidades de la Comunidad Autónoma gestora. ED@CON, además, permite la exportación de la información a otros formatos SIG, por ejemplo SHAPE, para que puedan ser utilizados por otras aplicaciones si los gestores lo desean.

Resultados

En la Tabla 5 se muestra un resumen de resultados de los trabajos de CATD para la campaña 2009.

Finalmente, la Tabla 6 muestra un resumen de los resultados de los controles en las últimas 5 campañas (2005-2009). Puede observarse cómo los datos objeto de análisis se mantienen aproximadamente constantes. La tendencia es a hacer más zonas de control de menor tamaño; de este modo en 2005 las 10 zonas controladas

Tabla 5. Resultados CTD 2009

Zonas controladas	19 ¹
Superficie total (km ²)	21.900
Zona útil examinada (km ²) ²	18.862,23
Expedientes seleccionados	30.569
Municipios analizados (en paréntesis, polígonos)	564 (6.029)
Recintos sigpac declarados dentro de las zonas	383.711
Superficie declarada total (km ²)	6.109,92
Media de recintos por polígono	63,64
Media de recintos por expediente	12,55
Expedientes aceptados tras el control	40,91%
Grupos de cultivo aceptados tras el control	85,08%
Coste de los trabajos (euros)	5.113.622,76
Coste por expediente (euros) ³	167,28

¹ En 11 Comunidades Autónomas. ² La zona útil es la zona que contiene las parcelas declaradas y que por tanto puede ser objeto de control. ³ Un expediente = un agricultor.

fueron de tipo 3 (2.000 km²), y en 2009 el número de zonas ha aumentado a 19, pero sólo 8 de ellas son de tipo 3 (véase apartados anteriores). Así mismo, se tiende a seleccionar expedientes con menos superficie para así abarcar mayor número de agricultores. El espectacular aumento de costes a partir del año 2007 se debe a la introducción reglamentaria del control de la ayuda acoplada del olivar (ya derogada en la campaña 2010).

El control asistido por teledetección, pues, ahorra tiempo y esfuerzos a la Administración, ya que se controla una gran cantidad de solicitudes en un período corto de tiempo. Como se hace una fotointerpretación previa, se controlan en campo únicamente los expedientes con

irregularidades, lo que acelera a su vez el trámite de expedientes que están correctos. Las Comunidades Autónomas ven reducida su carga de trabajo al disminuir el número de recintos que hay que visitar en campo, y así mismo reciben una gran cantidad de información asociada a todos los expedientes controlados, lo que facilita enormemente los trabajos de gestión administrativa. La contrapartida es que la fotointerpretación previa es susceptible de errores, sobre todo si no se dispone de una imagen de suficiente calidad, lo que puede dar lugar a la admisión de expedientes con irregularidades que en una visita de campo serían diagnosticados como inválidos para el pago de las ayudas. No obstante, tanto por parte del JRC

Tabla 6. Resumen de resultados CATD en las campañas 2005-2009

Campaña	2005	2006	2007	2008	2009
Zonas controladas	10 ¹	12 ²	15 ³	21	19
Superficie total (km ²)	20.000	19.200	22.500	20.400	21.900
Zona útil examinada (km ²)	16.780,22	16.946,96	19.191,12	19.281,98	18.862,23
Expedientes seleccionados	17.344	27.437	37.050	33.369	30.569
Municipios analizados	369 (6.126)	385 (5.013)	691 (7.008)	611 (6.690)	564 (6.029)
Recintos sigpac declarados dentro de las zonas	429.544	398.264	517.981	410.920	383.711
Superficie declarada total (km ²)	7.256,12	6.753,10	8.615,15	6.183,10	6.109,92
Media de recintos por polígono	70,12	79,45	70,96	61,42	63,64
Media de recintos por expediente	24,77	14,52	13,42	12,22	12,55
Expedientes aceptados tras el control (%)	41,17	41,70	46,60	50,68	40,91
Grupos de cultivo aceptados tras el control (%)	68,09	63,53	65,36	63,60	85,08
Coste de los trabajos (euros)	2.693.459,42	3.415.881,58	4.240.022,27	5.535.200,95	5.113.622,76
Coste por expediente (euros)	155,29	124,49	114,44	165,87	167,28

Siete Comunidades Autónomas. ² Ocho Comunidades Autónomas. ³ Once Comunidades Autónomas (mismo número en 2008 y 2009).

como de las Comunidades Autónomas (en particular, Andalucía y Cataluña) se están haciendo estudios y experimentando nuevas técnicas (por ejemplo, apoyo con fotografías aéreas de 20 cm. de resolución) que, de tener éxito, podrán complementar o añadir mejoras a la metodología ya existente.

Referencias

- JRC IPSC/G03/P/HKE/hke D(2009)(11047). 2009. Common technical specifications for the 2010 campaign of remote-sensing control of area-based subsidies. *MARS Unit, Joint Research Centre-ISPRA (Italy)*.
- JRC IPSC/G03/P/HKE/hke D(2007)(8218). 2007. Selection of control zones and risk analysis draft guidance document. *MARS Unit, Joint Research Centre-SPRA (Italy)*.
- JRC IPSC/G03/P/SKA/ska D(2003)(2402). 2003. Guidelines for best practice and quality checking of ortho imagery. *MARS Unit, Joint Research Centre-ISPRA (Italy)*.
- TRAGSATEC, S.A. 2005-2009. Informe Final de los Trabajos de Control Asistido por Teledetección de los Regímenes de Ayudas Agrícolas en España. Publicación anual.

Caso práctico

A MODIS generated land cover mapping of Honduras: a base-line layout to create a national monitoring center

S. Rivera^{1*}, J. L. Lowry¹, A. J. Hernández¹, R. D. Ramsey¹,
R. Lezama² and M. Velázquez²

¹ *Remote Sensing and GIS Laboratories. Department of Wildland Resources. College of Natural Resources. Utah State University. Logan. Utah 84322-5230. USA*

² *Geographic Information Center. Department of Forestry Applied Research. National School of Forest Sciences-ESNACIFOR Siguatepeque. Honduras*

Abstract

The Remote Sensing and GIS Laboratory at Utah State University (USU) began the process of establishing a remote sensing national land cover monitoring center in order to monitor land cover and use in Honduras. A national land cover map derived from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) imagery products was developed. We designed a protocol for interpretation and analysis of MODIS data products that included a Google-Earth on-screen sampling scheme, a field data collection of training samples and a classification tree algorithm. The first land cover map prototypes and algorithms were developed using a time series of MODIS 2007 and 2008 imagery, elevation data (STRM) and a time series of MODIS's Enhanced Vegetation Index (EVI). In the model validation, the Kappa coefficient was $K = 65.1\%$ and the overall model accuracy was 70%. This map will serve as a base line to monitor future land cover changes in Honduras.

Key words: mapping, MODIS, tropics, Google, EVI.

Resumen

Generación de un mapa de cobertura del suelo en Honduras a partir de datos MODIS: una base para el diseño de un centro nacional de seguimiento

El Laboratorio de Teledetección y SIG en la Universidad Estatal de Utah (USU) inició el proceso de establecer un centro de monitoreo de detección de la cobertura y uso de la tierra a fin de monitorear la cobertura en Honduras. Un mapa de la cobertura derivado de MODIS (Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada) fue desarrollado. Se diseñó un protocolo para la interpretación y análisis de productos de datos MODIS que incluyó un protocolo de Google-Earth para toma de muestras en pantalla, una colección de campos de datos de muestras de entrenamiento y una clasificación basada en un algoritmo de árboles de decisión. El primer prototipo de mapas y algoritmos fueron desarrollados usando una serie temporal de imágenes MODIS del 2007 y 2008, datos de elevación (STRM) y una serie de tiempo del Índice Mejorado de Vegetación de MODIS (EVI). En la validación del modelo, el coeficiente Kappa fue de $K = 65,1\%$ y la exactitud global del modelo fue del 70%. Este mapa servirá como línea base para monitorear cambios en la cobertura futura de la tierra en Honduras.

Palabras clave: Mapeo, MODIS, Trópicos, Google, EVI.

* Corresponding author: samuel.rivera@aggiemail.usu.edu
Received: 11-04-110; Accepted: 10-05-11.

Introduction

Land resources throughout the world are rapidly being depleted, and developing countries in the tropics are experiencing some of the most detrimental effects from rapid land use conversion. Some 10.4 millions of tropical forests were lost in the last five years (FAO, 2005). Central America and Mexico have the second highest global deforestation rate (Eggen-McIntosh, 1994). All Central American countries are classified with a *high threat* to loose their forest resources (Global Forest Watch, 2010). The global Forest Resources Assessment indicates that Honduras lost some 186,000 hectares of forest between 2000-2005, the highest annual deforestation rate in Central America: 2.8% (FAO, 2005). This causes an enormous environmental disruption and jeopardizes the weak economy and the well-being of the country.

Appropriate monitoring is an important step to determine how much forest resources should be harvested versus what should be conserved. Remote sensing approaches for assessing and monitoring forest resources provide a cost-effective means by which forest inventories and land use monitoring can be achieved. Various methods may be used to map vegetation patterns on the landscape, the appropriate method depending on the scale and scope of the project (DeFries *et al.*, 2004). Projects focusing on smaller regions, such as national parks, may rely on aerial photo interpretation. Mapping vegetation over larger regions has commonly been done using digital imagery obtained from satellites, and may be referred to as *land cover mapping*.

In 1995 the country of Honduras produced a land cover map with the help of the German government (COHDEFOR, 1996). This forest resources map contained 8 land cover classes (dense conifer forest, sparse conifer forest, mangrove forest, broadleaf forest, mixed forest, water bodies, neighboring country, non-forestlands) and was produced using a visual interpretation method of Landsat imagery. The methodology to produce the map was time-consuming and not easily replicable, thus making it a useful product at a single moment in time, but not useful for monitoring purposes. Currently it is outdated.

Some other attempts have been done in the last decade. Two land cover maps were developed. In 2001, a land cover map was developed by a World Bank sponsored initiative (PMDN) and another one by the Tropical Agricultural Centre for Higher Education and Research, CATIE (Ordenez and House, 2002). None of them had a transparent and replicable methodology and the government was still uncertain about how much area is covered by forest or other lands. In 2005, a forest inventory was conducted throughout the country. Around 300 sampling plots were established systematically all over the country. Due to the lack of funding the inventory was not complemented with the remote sensing assessment and rapidly became obsolete (AFE-COHDEFOR, 2006).

Our proposal is to produce a similar land cover map with the same 8 land cover classes (and possibly more) using contemporary MODIS satellite imagery in a fashion that can be done relatively rapidly and over time-specifically for long term monitoring purposes. This was not possible in 1995, and is indeed feasible today because of advancements in image processing technology since 1995 and the availability of MODIS imagery since 2000.

Utah State University, located in Logan, Utah had the responsibility of coordinating the development of field data collection protocols, mapping methodologies, and coordinating land cover mapping for the region. ESNACIFOR was responsible for field data collection, image and ancillary data preparation, and land cover modeling. The development and refinement of the legend was coordinated by ESNACIFOR with input from managers, government officials and investigators in Honduras. This paper presents an overview of the methodology used to create the national land cover dataset, and highlights several of the issues associated with achieving this product through a coordinated process between the two locations-countries.

The goal of this project was to develop and transfer a methodology (protocol) using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) imagery to create a national-level land cover map. Other products, such as a national-level ecosystems map —not described on this paper—, were derived from the land cover map. It should be emphasized that developing the

map was not the sole goal of the project. In addition, the other goal of the project was to train Honduran scientists in the development of this map, so that they can continue monitoring national resources in the future.

Objectives

Specific objectives for this project were:

1) Develop an image classification methodology using MODIS imagery to create a national-level land cover map for the country of Honduras.

2) Train Honduran scientists in fundamental knowledge of remote sensing technologies, and remote sensing-based mapping.

3) Provide training to the scientists on the GIS methodologies (protocol) developed by USU for creating the national land cover map.

4) Demonstrate how the protocol can be used for future land resource monitoring as well as assessment of land cover change between 2009 and the future.

Project organization

Project study area

Honduras is located in the center of the Central American isthmus, between 13° and 16° la-

titude North and 83° and 89.5° longitude West (Fig. 1). It has an area of 112,088 square kilometers. It is a rich country in terms of natural resources and has the highest percentage of forest lands among the other Central American nations (AFE-COHDEFOR, 2006). Approximately 50% of the country is still covered by undisturbed forests (Richards, 1996) which include humid tropical forests, arid or deciduous tropical forests, cloud forests, mangrove wetlands, and pine forests. Forests in Honduras are being depleted at an accelerated rate. The deforestation rate is currently 80,000 hectares per year, which is one of the highest deforestation rates in the hemisphere (Stonich, 1993).

Tropical forests are typically associated with coastal mountains receiving high amounts of precipitation while pine forests are located in the headwaters of rivers in the mountains of central Honduras. In Honduras, two major river systems drain the central highlands to both the Caribbean Sea (eight river basins) and the Pacific Ocean (two river basins) (Gutiérrez, 1992; Laboranti, 1982). The average precipitation rate is 2,000 mm per year and this rainfall produces significant runoff from watersheds (Hargreaves, 1992).

The country is composed of extremely fragile ecosystems. Since it is a narrow strip of land, rivers run from the continental divide (2,000 meters above sea level) to the lowlands

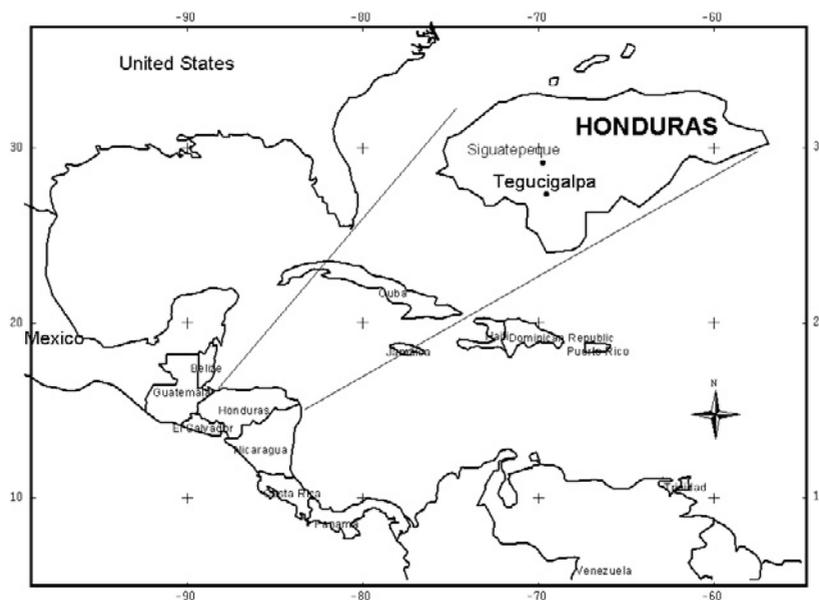


Figure 1. Location of Honduras, Central America. Siguatepeque is the town where ESNACIFOR is located.

in the Pacific and Caribbean coasts in very short distances. As a result, rivers are typically steep, enclosed in v-shaped valleys, and exhibit dendritic drainage patterns. Greater than half of Honduras might experience 300 mm of rain in 24 hours (Hargreaves, 1992). Soils are formed from metamorphic, volcanic, and sedimentary parent materials. As a result, eight of the ten world soil orders exist in Honduras. These soils are classified with a high to very high erosion risk. In addition, the terrain in Honduras is characteristically steep with 75% of the territory having slopes greater than 30% (Hargreaves, 1992). Forest cover removal produces an enormous environmental disruption.

Division of responsibilities

Overall project tracking and management was conducted by the RS/GIS Lab at Utah State University. The lab was responsible for developing the methodology and providing training to ESNACIFOR personnel in the use of the aforementioned methodology. ESNACIFOR provided the appropriate funding for the project, including salaries, fees, and travel expenses for all project participants of both parties. ESNACIFOR was also responsible for providing access to possible field data from forest management plans from ICF: the Honduran Forest Service.

Project coordination and timeframe

Training workshop and the assessment of the ESNACIFOR's GIS lab capability were conducted in spring of 2008. Initial field data collection protocols were established by the lab at Utah State University. Google sampling data collection primarily occurred at the end of 2008 in Honduras. MODIS image processing and classification workshop dedicated to ensure consistent mapping methods was conducted during the winter of 2009 at Utah State University lab. Periodic meetings, teleconferences and field visits (in Honduras) were conducted in the summer of 2009 to ensure the collaborative mapping process. Additional field data to improve the model and for validation was

collected from May through September of 2009. Mapping efforts were completed by the end of 2009. Last training session and completion of final products was held at Utah State University lab in April of 2010. The land cover map was completed and delivered to the public in May 2010.

Methods

Image selection and preparation

An important part of this project involved determining the best image classification approach for the monitoring protocol. The MODIS sensor provides an ideal remotely sensed platform for developing a national-level land cover/resource monitoring program (Muchoney *et al.*, 2000; Loveland *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2007). With 500 meter pixel resolution it is considered a moderate resolution imaging sensor and cannot be used for highly detailed land cover mapping (by comparison the Landsat sensor offers 30 meter pixel resolution). However, MODIS had several key advantages that made it highly suitable for this project. With 7 spectral bands, MODIS provides adequate spectral resolution to map vegetation. These 7 bands approximate the 6 spectral bands offered by the Landsat sensor.

- 1) The MODIS sensor orbits the earth each day (Vermote, 2008). The daily capture of MODIS imagery means MODIS can provide daily images of the Earth's surface, making it ideal for monitoring purposes.

- 2) In addition to the daily MODIS surface reflectance product, MODIS provides a suite of derived products. One of these products is the *Daily Surface Reflectance Quality Product* which is an 8-day composite of images intended to provide the best image pixels for an 8-day period (Vermote, 2008). This is helpful in Honduras where cloud cover presents a significant challenge for remote sensing-based mapping, as the best cloud free pixels are used in the composite image (Vermote, 2008).

- 3) The MODIS image scene encompasses the entire country of Honduras with a single swath. This is important because other sensors, such as Landsat, would require mosaicking

multiple image scenes (approximately 12 Landsat scenes are required to cover the country of Honduras) from several swaths, imposing considerable technical challenges.

4) Imagery and products derived from MODIS are offered without cost from the United States Geological Survey (USGS) and be downloaded from the World Wide Web (www.glovis.gov).

Generally, land cover mapping is accomplished by segmenting the landscape into areas of relative homogeneity that correspond to land cover classes from an adopted or developed land cover legend. Technical methods to partition the landscape using digital imagery-based methods vary. Unsupervised approaches involve computer-assisted delineation of homogeneity in the imagery and ancillary data, followed by the analyst assigning land cover labels to the homogenous clusters of pixels. Supervised approaches utilize representative samples of each land cover class to partition the imagery and ancillary data into clusters of pixels representing each land cover class. An important part of mapping involved the use of training data for image classification, whether a supervised or unsupervised approach was used. Sampling can be a time consuming and costly part of any remote sensing-based land cover mapping project. We determined the best approach to collecting sampling data through the course of the project. Possible options included using existing forest plot sampling sites (AFE-CODHDEFOR, 2006), collecting additional sampling plots, and most likely, a combination of both.

Land use classification system

Utah State University conducted some preliminary tests using MODIS imagery to create a national-level map of Honduras. These preliminary results were presented to the government authorities in spring of 2008. The preliminary results were developed through a lattice of points that were used to train the classification tree algorithm. These training points were labeled by drilling them through the 1995 forest resources map. The training samples were then imported to the classification tree al-

gorithm and rules were generated to derive the resulting land cover map. The classes that were best mapped were: broadleaf forest, mangrove forest, and pine forest.

We decided to use a modified land use classification system used by the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) (Jensen 2005). This classification system was selected because it has been used by the Honduran government authorities. This classification system has also been largely used by other projects either globally (Friedl *et al.*, 2002; Loveland *et al.*, 2000) or in the Central and South American Regions (Muchoney *et al.*, 2000; Latifovica *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2007), due to its capacity to fit the MODIS resolution.

In the final land use and cover map, 13 classes were delineated (Table 1). Initially eight classes were assumed to be mapped (Dense and sparse pine forest, broadleaf forest, mixed forest, urban, mangrove forest, water bodies and agriculture farms/pasture), however, through the whole process of Google-Earth sampling plus the field visits, five more classes were added to the classification (Commercial agriculture, shrublands, dry forest, savannas, and shrimp farms).

High resolution imagery sampling

Image interpretation was conducted using Landsat ETM with ArcGIS[®] and high resolution orthophotography using Google Earth[™]. Table 1 identifies which classes (10 classes initially) that we anticipated that were going to be identifiable with each method (UNESCO, 1983). Training data were obtained from three sources: Existing data, Image Interpretation of Landsat ETM and Orthophotography, and field samples. Existing data were available from two sources: Forest management plans, and point data collected by the FAO (AFE-COHDEFOR, 2006). These data were carefully checked to make sure that they were reliable, and then they were formatted in preparation for digital image classification. Formatting was done within a spread-sheet (e.g. Excel).

The sampling approach can be described as a systematic-selective hybrid sampling design. The image interpretation of Landsat ETM in-

Table 1. Legend used in the land cover mapping of Honduras

Label	Symbol	Classification System (adapted from IGBP Jensen, 2005)
Dense Evergreen Needleleaf forest	BCD	Lands dominated by trees with a percent canopy cover >60% and height exceeding 2 meters. Almost all trees remain green all year. Canopy is never without green foliage.
Sparse Evergreen Needleleaf forest	BCR	Lands dominated by trees with a percent canopy cover between 30-60% and height exceeding 2 meters. Almost all trees remain green all year. Canopy is never without green foliage.
Broadleaf Forest	BLF	Lands dominated by trees with a percent canopy cover > 60% and height exceeding 2 meters. Almost all trees remain green all year. Canopy is never without green foliage.
Mixed Forest	BMX	Lands dominated by trees with a percent canopy cover > 60% and height exceeding 2 meters. Consists of tree communities with interspersed mixtures or mosaics of the other four forest cover types. None of the forest types exceeds 60% of landscape.
Shrublands	MAT	Lands with woody vegetation less than 2 meters tall and with shrub canopy cover is > 60%. The shrub foliage can be either evergreen or deciduous.
Mangrove	BMG	Lands with a permanent mixture of water and herbaceous or woody vegetation that cover extensive areas. The vegetation can be present in either salt, brackish, or fresh water.
Water Bodies	LYL	Oceans, seas, lakes, reservoirs, and rivers. Can be either fresh or salt water bodies
Agriculture and Pasture	AGP	Lands covered with temporary crops followed by harvest and a bare soil period (e.g., single and multiple cropping systems. It also includes natural or planted pasture for livestock.
Commercial Agriculture	AGC	Land covered by perennial crops such as bananas, pineapple, and oil palm.
Urban	URB	Land covered by buildings and other man-made structures. Note that this class will not be mapped from the AVHRR imagery but will be developed from the populated places layer that is part of the Digital Chart of the World.
Woody Savannas	SAB	S Lands with herbaceous and other understory systems, and with forest canopy cover between 30-60%. The forest cover height exceeds 2 meters.
Dry Forest	BSE	Lands dominated by trees with a percent canopy cover > 60% and height exceeding 2 meters. Consists of seasonal broadleaf tree communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods. Dominant species are: <i>Simarouba glauca</i> , <i>Switenia humilis</i> , <i>Casia grandis</i> , <i>Mimosa sp.</i> , <i>Albizia guachepele</i> , <i>Sterculia apétala</i> , <i>Enterolobium cyclocarpum</i> , <i>Karwinskia calderonii</i> , <i>Crecentia alata</i> , <i>Bursera simaoruba</i> , <i>Leucaena salvadorensis</i> , <i>Tabebuia rosea</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Bombacopsis quinata</i> and <i>Cedrela odorata</i> .
Shrimp Farms	CAM	Formerly covered by Mangrove forest and now they are ponds-water bodies dedicated to shrimp production. All sites are located in the Pacific coast at an elevation below 200 meters above sea level.

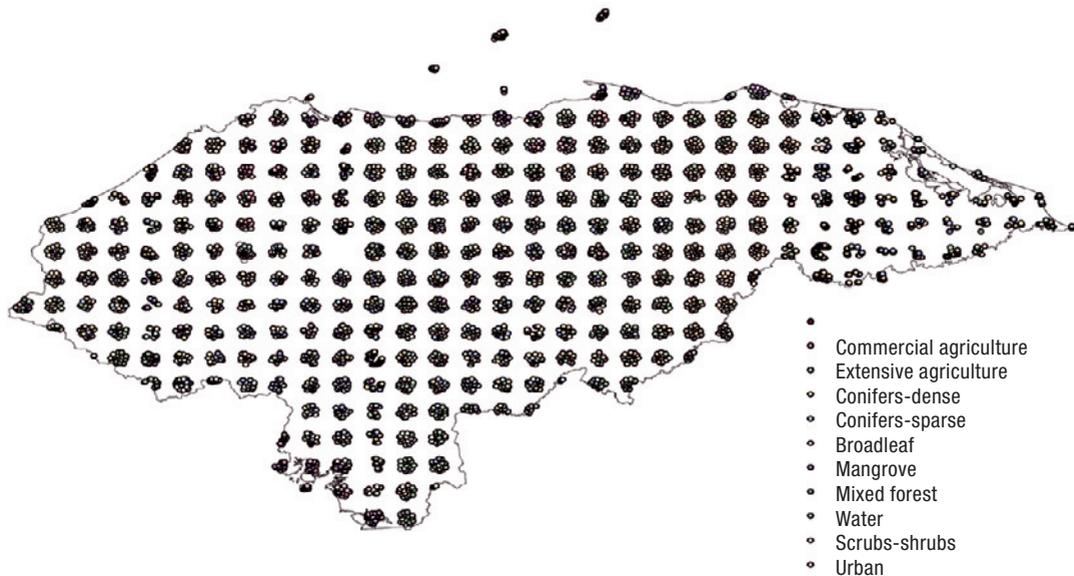


Figure 2. Site areas within which point locations were opportunistically chosen to be used as training data. These are 311 locations containing more than 5,000 points that were photo interpreted in Google Earth images.

involved the assigning label attribute to each point location on a systematic grid of site areas. There were 311 site areas on a grid covering the entire country (Fig. 2). Each site area represents an area of about 80 km² (10 km diameter). Within each site area the image analyst chose the best point location representative of the land cover classes in the site area. Between 10 and 15 point location samples were chosen for each site area, and samples were at least 1 sample point apart. The analyst tried to get samples for as many different land cover classes seen in the site area polygon.

Google-Earth™ data collection protocol

Google Earth as a scientific and environmental visualization tool has been increasingly used since its launch in 2005 (Sheppard and Cizek, 2009). We basically used the same procedure that was used with the interpretation of Orthophotography in Google Earth™. The site area and point location feature classes had to be converted to .kml format and were used with Google Earth™ to interpret higher resolution imagery (though perhaps not as up-to-date as the ETM imagery). The best way to use Google Earth™ was to add the site area and point location .kml files to Google Earth™,

and use them as a point of reference. The analyst had the option to place the road network or other layers in Google Earth® for reference. With ArcMap® open on one screen and Google Earth™ open on another screen, the analyst used Google Earth™ to interpret the imagery, but as added the label in ArcMap®. Some 5,616 samples were collected to build the training data set.

Ground truth data collection

Training and map validation data were collected through ground-based field work to supplement the existing field and Google Earth™ collected data (5,616 data points). The ground-based field samples were 240 samples, collected by traversing navigable roads in three different a mapping zones (North coast, South and Western part of the country) and opportunistically selecting plots that met criteria of appropriate size (500 by 500 mts or 25-hectare minimum) and composition (stand homogeneity). Field data were collected using ocular estimates of biotic and abiotic land cover components, including percent cover of dominant classes. Laptop computers, Landsat imagery, digital orthophotoquads, and GPS devices were used for navigation and plot identification whenever possible. Each plot was identified

with a UTM coordinate using a GPS. Field data were recorded onto paper field forms and subsequently entered into a database.

Predictor layers

Utah State University has considerable experience using a wide variety of image classification approaches. Most recently we completed a five year project mapping land cover over a large portion of the southwestern United States (Lowry *et al.*, 2007) using a classification tree algorithm. Several predicting layers were used in the primary classification. Spatial data layers used to map land cover included image-derived and ancillary datasets. Core image-derived datasets included individual seven bands of MODIS images from 2007 and 2008, the Enhanced Vegetation Index (EVI). Ancillary datasets were derived from 30 meter digital elevation models (DEM) obtained from the NASA's STRM (Shuttle Radar Topography Mission) (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Modeling approaches and procedure

The USU-ESNACIFOR team investigated several avenues for image classification. In particular we experimented with methods similar to those used in previous large landscape mapping efforts such as the 1995 Utah GAP land cover project (Homer *et al.*, 1997). The cluster-busting method was the first modeling approach that we used. In this method we visually determined an appropriate number of clusters. Then we ran an initial map with isodata, to create a cluster map with maximum likelihood classifier using the signature file from isodata. Then we used this output to subsequent steps.

The next method was the use of decision tree classifiers that are well suited for land cover mapping. Classification and regression trees (CART) were developed by Breiman *et al.* (1984) and were quickly recognized as a valuable tool for discriminating complex relationships among environmental variables (Friedl *et al.*, 2002). Decision trees readily ac-

cept a variety of measurement scales in addition to categorical variables, and have demonstrated improved accuracies over the use of traditional classifiers (Hansen *et al.*, 1996; Pal and Mather, 2003). Finally, decision tree software is readily available, computationally efficient, and by using a hierarchical approach to define decision rules, is intuitive to a variety of users.

For our project we incorporated the decision tree software See5 (RuleQuest Research, 2004) with ERDAS Imagine[®]. The tool, developed for the National Land-Cover Dataset 2001 (Homer *et al.*, 2004) project (hereafter «NLCD mapping tool») provided the ideal solution to our need for an efficient integration of the decision tree software within a spatially explicit modeling environment.

Using the NLCD mapping tool, decision tree models were generated in See5 (RuleQuest Research, 2004) with the boosting option, and then spatially applied in ERDAS Imagine[®]. Modeling was iterative and subsequent iterations tested using different combinations of predictor datasets, or additional samples in an attempt to improve the model. An iterative process of adding/subtracting predictive layers from the model produced, finally, a more refined map.

Map validation using Google Earth[™]

Sample polygons were generated from the final land cover map. First, the raster version of the map was converted to a vector polygon dataset. The size of land cover polygons, for all classes, in the final land cover map was heavily skewed toward many small polygons and a few large polygons (i.e. a Poisson distribution). Randomly selecting a set of polygons from such a distribution results in many small polygons and very few large polygons (by simple probability given such a distribution). For our selection process we wanted to randomly select polygons that were large enough that an assessment of their accuracy could tell us something about the map at the stand level. We also wanted to select polygons that were within the high resolution portion of Google Earth[™] Images. In other words, we wanted to

identify polygons where land cover could be interpreted from higher resolution imagery, and which were not too small.

To begin, we recognized that all the land cover classes do not have the same spatial pattern; which is often a result of their unique ecological characteristics and abundance on the landscape. Some classes may be considered «matrix» communities and are spatially represented by large contiguous areas. Other classes are best described as «patch» communities that are imbedded within the broader matrix. Based on the notion of matrix and patch communities (Poiani *et al.*, 2000) we divided the mosaic of land cover classes into two groups based on their proportional abundance on the landscape. Figure 3 shows the division between matrix and patch classes. Examples of large matrix classes include *Broadleaf Forest*, *Dense Pine Forest*, and *Sparse Pine Forest* while examples of patch classes are *Mixed Broadleaf-Pine Forest*, *Dry Forest*, and *Urban Areas*.

Candidate polygons for accuracy assessment were first selected based on whether they were within the high resolution portion of Google Earth™ Imagery (Fig. 4). Then they were selected based on size. Matrix classes were selected as potential sample polygons if they were between 1,000 hectares and 2,000,000 hectares in size. Patch classes were selected if they were larger than 100 hectares, the minimum mapping unit for the map. Following these two selecting rules up to 60 polygons were ran-

domly selected for each land cover class. Table 1 identifies the number of randomly selected polygons for each class, the total area sampled (sum of sample polygons) and the percent of the total map the sampled portion represents. A total of 685 polygons were chosen as sample polygons to be used for accuracy assessment. Figure 4 shows the selected polygons (Table 2). The process basically consisted on the analyst using numeric codes for label assignment. The Google™ file (.kml) was later converted to ArcGIS® file (shapefile).

Results

Land cover map

The most important and identifiable mapped classes were Broadleaf forest and pine forest (sparse and dense) that cover more than half of the country (58.1%) (Table 3, Fig. 5). These forest types are located following the mountain chains that go from west to east and north to south in the central part of the country. They are distributed along this rough topography in which 70% of the territory is located over 30% slopes. The broadleaf forest is located along the north coast and in a corridor that goes from the middle to the north-western part of the country, following areas of higher precipitation. Pine forests are located in drier areas in smaller patches scattered all over the central and western

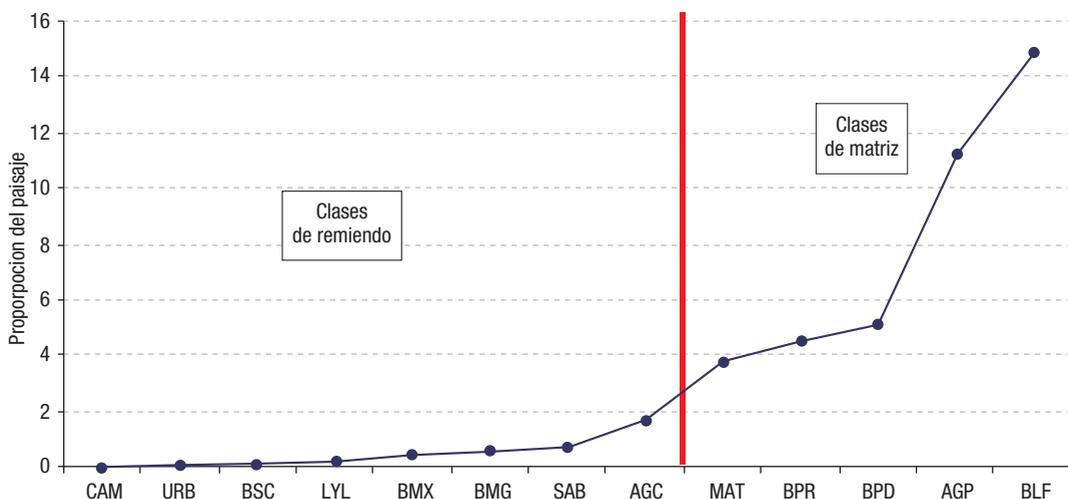


Figure 3. Matrix and patch land cover classes based on proportional abundance: basis for the map validation protocol using the Google-Earth sampling scheme.

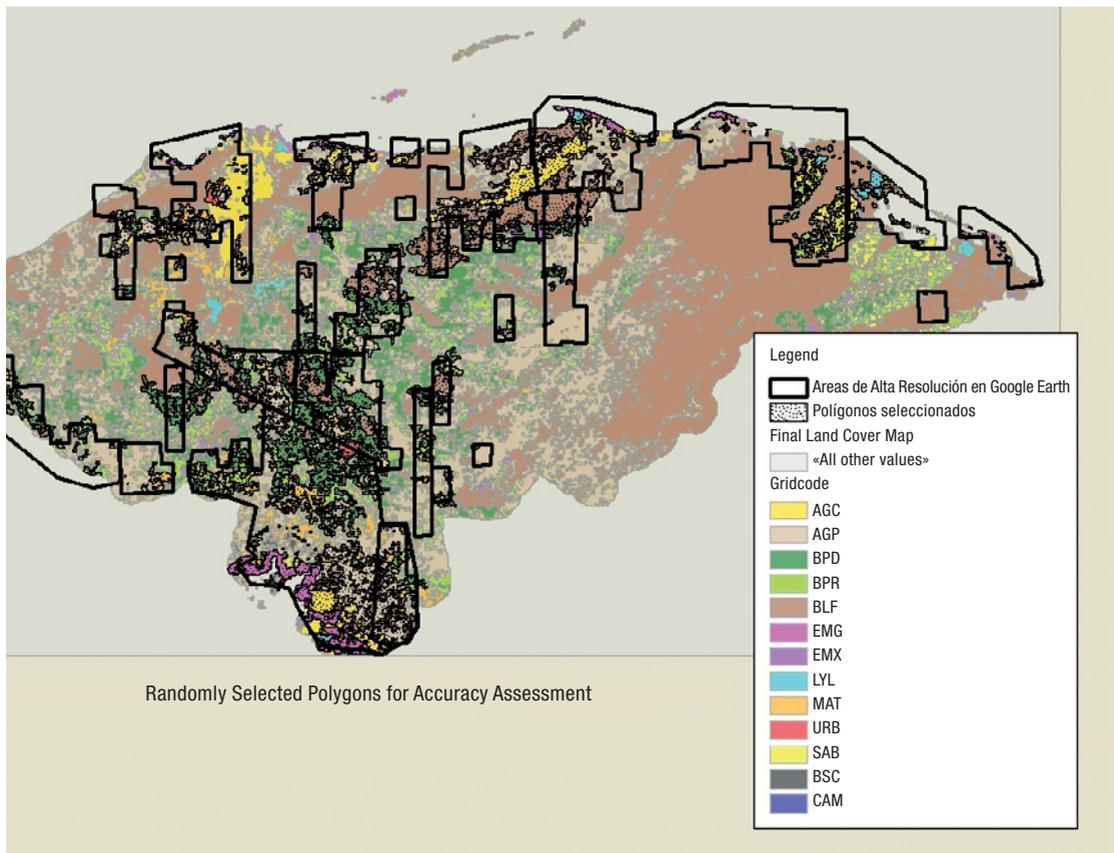


Figure 4. Randomly selected polygons for accuracy assessment and map validation.

part of the country. In between these patches, subsistence agriculture and pasture lands areas are found, forming a mosaic of agricultural and forest patches. In bigger patches, agro-commercial activities are located in the intermountain larger valleys. These areas are dedicated to

high yield crops such as: bananas, cantaloupes, oil palms, citrics, sugar cane, and pineapples. Mangrove forest was found only in the pacific coast where most of this coastal ecosystem is located. Significant areas of mangrove forest have been cut and inundated to establish shrimp

Table 2. Randomly selected polygons to be used as reference data for the map validation procedure

Class name	Code	Numeric code	Type	Count	Sampled area (ha)	Total area (ha)	Percent area sampled
Ag. Farm/Pasture	AGP	2	Matrix	60	416,250	3,192,275	13.04
Dense Pine Forest	BPD	3	Matrix	60	437,375	1,448,275	30.20
Sparse Pine Forest	BPR	4	Matrix	60	227,600	1,273,625	17.87
Broadleaf Forest	BLF	5	Matrix	48	475,625	4,226,675	11.25
Shrubland	MAT	9	Matrix	60	202,375	1,088,825	18.59
Ag. Commercial	AGC	1	Patch	60	210,275	478,050	43.99
Mangrove Forest	BMG	6	Patch	60	147,100	192,875	76.27
Mixed Conf.-Broadleaf	BMX	7	Patch	60	16,475	136,775	12.05
Lakes & Lagoons	LYL	8	Patch	60	39,875	77,425	51.50
Urban Areas	URB	10	Patch	23	23,425	25,925	90.36
Savannah	SAB	11	Patch	41	95,550	218,500	43.73
Dry Forest	BSC	12	Patch	60	24,575	56,425	43.55
Shrimp Farms	CAM	13	Patch	10	2,325	3,600	64.58
				662	2,318,825	12,419,250	18.67

Tabla 3. Areas of land use and cover as a result of the land cover mapping of Honduras

Legend (name-code)	Area in 2009	
	km ²	%
Commercial agriculture-AGC	4,042	3.63
Agriculture pasture-AGP	28,961	25.98
Dense pine forest-BPD	13,859	12.43
Sparse pine forest-BPR	11,919	10.69
Broadleaf forest-BLF	39,037	35.02
Mangrove forest-BMG	1,067	0.96
Mixed forest-BMX	673	0.60
Waters bodies-LYL	689	0.62
Shrublands-MAT	8,592	7.71
Urban-URB	204	0.18
Woody savanna-SAB	2,121	1.90
Dry forest-BSC	212	0.19
Shrimp farms-CAM	93	0.08
Total	111,468	100.00

farm ponds. We were able to identify these large areas. Dry forest was located in the southern portion of the country and in small areas in the central and northern regions where it is known

that precipitation is limited in amount and period of occurrence, meaning less than 1,000 mm/year distributed in 3-4 months. Shrublands were also located mostly in the western and central regions and are often seen as areas of transitions where the forest has been cleared and/or burned and most of the cleared areas have remained untouched to produce a secondary forest. This is true for most of the cleared and/or burned areas for either pine or broadleaf forest. The urban class identified only when urban settlements were larger than 200,000 people. Smaller urban centers were hardly captured given the spatial resolution and spectral of the MODIS signal. The mixed forest was detected in the transitional zones between the pine forest and broadleaf forest. Due to its foliar composition, its detection was not very accurate. An explanation to this is discussed later in this paper. Honduras has only 2 important lakes: one is natural and the other is a man-made water body. They both are located in the central part of the country and were accurately mapped. The last class detected by the MODIS sensor was

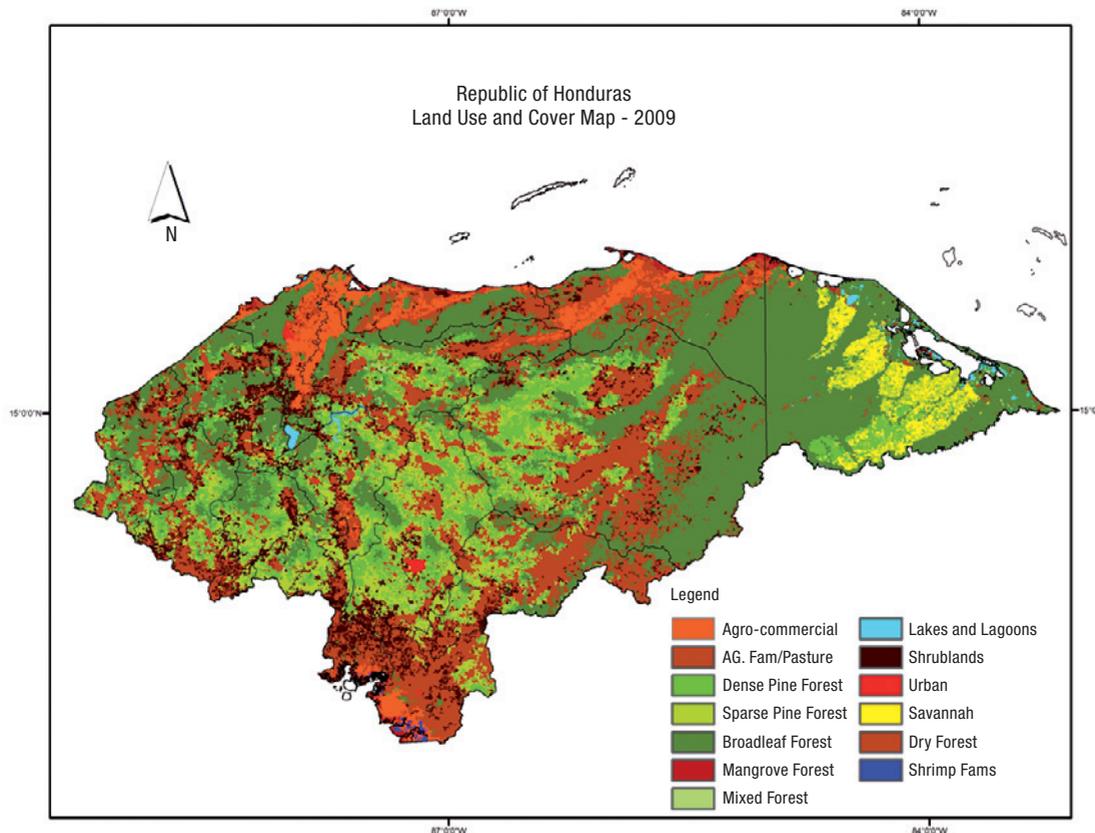


Figure 5. The MODIS imagery-derived map of land use and cover of Honduras, Central America.

the woody savanna. A peculiar ecosystem located in the northern and eastern portion of the country, close to the Caribbean coast. This is typically composed by grass and shrub vegetation accompanied by sparse pine trees. These areas are for high precipitation (between 3-4 meters per year), giving as a result highly leached soils, and sparse taller vegetation.

Model validation

The model validation has the purpose of measuring, as objectively as possible, the accuracy of the map. Usually this is given by providing a quantitative measure of map accuracy (Congalton and Green, 1999). The accuracy assessment was run using the Kappa Tool. The results showed that the Kappa Index was: 0.651258 (Standard error of kappa: 0.0055672, Z-Score for kappa: 116.981) see Table 4. The Kappa statistic can be interpreted as follows: Values below 0.40 would suggest the agreement between reference data and the mapped data is poor and could occur by chance. Values between 0.40 and 0.80 represents moderate agreement and values over 0.80 represents strong agreement (Congalton and Green, 1999).

The Kappa statistic for the land cover map was in the «moderate agreement» ranging indicating the results of the error matrix good. The Z-score for Kappa tells us whether the

agreement between the mapped data and the reference data could occur by chance. A Z-score higher than 1.96 suggests that, at a 95% confidence level, the results of the error matrix do not represent chance agreement. The Z-scores for both maps are well above 1.96 indicating that we can have a high level of confidence in the error matrix and Kappa statistic.

The error matrix is also very useful to visually and quantitatively see which classes are highly confused with one another. This is done by examining the numbers in the off-diagonal cells. The error matrix for the land cover map also tells us that the overall accuracy of the map was 70%. However, the error matrix is most useful for telling us something about the accuracies of the individual land cover classes. The error matrix provides information on two types of error: 1) errors of commission, and 2) errors of omission (Jensen 2005). Errors of commission represent reference locations that were incorrectly mapped as other mapped classes, and are presented as the percentages at the right of the row totals (Table 4). For example, there were 415 reference samples that «landed on» AGC, but only 352 of those were AGC. The 90 samples that were not AGC, but landed on AGC are considered errors of commission. Errors of omission represent locations on the map that were not mapped correctly, and are presented as the percentages at the bottom of the column totals. For example, there were a

Table 4. Accuracy assessment results of the land cover mapping of Honduras

Class	AGC	AGP	BPD	BPR	BLF	BMG	BMX	LYL	MAT	URB	SAB	BSC	CAM	Row total	Row %
AGC	352	21	0	0	6	1	0	5	21	2	0	0	7	415	85%
AGP	0	662	0	7	7	0	0	0	99	10	0	0	0	785	84%
BPD	0	15	583	193	7	0	6	0	16	0	0	0	0	820	71%
BPR	0	103	31	217	0	0	10	0	24	0	57	0	0	442	49%
BLF	0	66	71	8	627	3	0	0	80	0	31	0	0	886	71%
BMG	1	23	0	3	0	240	0	10	9	2	10	1	0	299	80%
BMX	1	15	13	5	6	2	4	0	13	0	6	0	0	65	6%
LYL	4	19	0	0	2	5	0	67	4	0	3	1	1	106	63%
MAT	3	128	0	22	0	0	56	4	160	0	0	3	0	376	43%
URB	3	0	0	0	0	0	0	3	1	47	0	0	0	54	87%
SAB	0	0	0	5	0	1	1	0	0	0	186	0	0	193	96%
BSC	3	29	0	0	1	0	0	0	35	1	4	6	0	79	8%
CAM	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	7	12	58%
Column total	367	1,081	698	460	656	252	77	94	462	62	297	11	15	4,532	
Accuracy	96%	61%	84%	47%	96%	95%	5%	71%	35%	76%	63%	55%	47%		70%

Kappa: 0.651258. Standard error of kappa: 0.0055672. Z-Score for kappa: 116.9.

total of 367 AGC reference locations, but only 352 (96%) were in locations mapped as AGC. The remaining 4% were mapped as something else and are considered errors of omission.

Examining the error matrices for the map we can see that some land cover classes were mapped very well, while others were mapped quite poorly. If we consider any class mapped with accuracy greater than 80% mapped well, we note that AGC, BPD, BLF, and BMG are all mapped very well. Classes mapped moderately well (50%-80%) are AGP, LYL, URB, and SAB. Classes mapped poorly (<50%) are BPR, BMX, MAT, and CAM. For example in the map, we noted that 56 BMX reference locations were erroneously mapped as MAT. We can say that BMX was «confused» with MAT.

Discussion

About the modeling approach

A primary objective of this land cover mapping project was to develop a transparent methodology that was repeatable and could be consistently and independently applied by the Honduran scientists. The decision tree classifier combined with the Google™-sampling protocol met this objective well. We found the decision tree classifier considerably more time-efficient. The decision tree classifiers are a more powerful tool for discriminating land cover classes. Our results were very consistent with other investigations (Lativovic *et al.*, 2000; Friedl *et al.*, 2002). They are also a very interpretable method and explicit method, because their hierarchical decision rules and splits can be revealed and explained.

About Google Earth™ sampling and validation

Throughout the course of the project we recognized the importance of providing a measure of map quality to users of the land cover map. While limitations of time, money and logistics prohibited a formal accuracy assessment (i.e. external validation with probability-based sample design), we believe the methods we em-

ployed provide useful information to map users. Google Earth™ is a readily available tool that can be accessible to almost anyone in the world (Sheppard and Cizek, 2009). The novelty of this approach allows enormous saving in time and resources and training. We found very little references that confirm that this tool has been used to collect training samples in a land use classification map. We hope it can be used in the future.

Examining the error matrices for the map we can see that some land cover classes were mapped very well, while others were mapped quite poorly. If we consider any class mapped with accuracy greater than 80% mapped well, we note that AGC, BPD, BLF, and BMG are all mapped very well. Classes mapped moderately well (50%-80%) are AGP, LYL, URB, and SAB. Classes mapped poorly (<50%) are BPR, BMX, MAT, and CAM. The Google Earth™ validation sampling scheme proved to be a very cost-effective procedure. No references were found on the use of this approach for validation a land map use.

About MODIS Selection

MODIS capability and the classification procedure exceeded the project expected goals. Initially, 8 classes were set up in such way that can potentially be discriminated and mapped. As the project progressed, five (5) more classes were added to the classification algorithm. MODIS imagery proved to be very affordable and successful by identifying and discriminating land use classes at the country level. The accuracy assessment of the map was very high particularly for the some classes such as broadleaf forest, mangrove forest and commercial agriculture.

We also recognize that MODIS data had some limitations, especially at discrimination some classes such as: Sparse Pine Forest (BPR), Mixed Forest (BMX), and Shrublands (MAT). This is basically a limitation of the sensor to identify clearly these classes, which are transitional classes, at a resolution of 500 meters. However, these classes are considered a transition of secondary forest which is constantly growing to become primary forest or fully

grown forest. In the case of Shrublands, they will grow until they become adult trees. Similarly, in the mixed forest, trees will mature until either conifer or broadleaf species become dominant. Therefore, we believe that the MODIS signal does not work very well at determining different vegetation stages at this resolution. Although it does very well differentiating fully grown or developed vegetation classes and types. Other researcher found these MODIS limitation in the past (Muchoney *et al.*, 2000; Latifovic *et al.*, 2000). Similarly Eggen-McIntosh *et al.* (1994) found the same obstacles using AVHRR imagery.

Summary

MODIS capability and the classification procedure exceeded the project expected goals. Initially, 8 classes were set up in such way that can potentially be discriminated and mapped. As the project progressed, five (5) more classes were added to the classification algorithm. MODIS imagery proved to be very affordable and successful by identifying and discriminating land use classes at the country level. The accuracy assessment of the map was very high particularly for the some classes such as broadleaf forest, mangrove forest and commercial agriculture.

The Google™ sampling protocol showed a high confidence as was used to collect the sampling training data. With minor training sessions, analysts were able to operate and collect samples. Despite the tedious work involved in the sampling collection, very few mistakes were made when interpreting the images. This protocol seems very promising as a cost-effective method to collect training samples without needing costly field visits.

The objective of the accuracy assessment was to quantitatively measure the accuracy of a MODIS derived land cover map product. The accuracy assessment described in this document outlines a methodology using freely available imagery through Google Earth™ to interpret reference polygons that were subsequently used to generate sample locations used in the accuracy assessment. Thirteen land cover classes were mapped and their agreement assessed with

an error matrix and Kappa statistics. Overall accuracy was 70% for the generalized map product. This is comparable to other large landscape mapping efforts (Laba *et al.*, 2002; Lotsch *et al.*, 2003). Looking into individual classes through the error matrix reveals that some classes were mapped better than others. Fully grown vegetation classes such as AGC, BPD, BLF, and BMG are all mapped very well. Transitional vegetation classes, such as BMX were very poorly mapped and is highly confused with MAT, BPD, and BPR.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the financial support of the World Bank and the Government of Honduras, without which completion of this project could not have been possible. We also would like to thanks ESNACIFOR officials: Asdrubal Calderon, Gabriel Barahona and Daniel Galeano. And finally, we would like to recognize the vision to develop the land cover map of Honduras: Mr. Atilio Ortiz who passed away during the course of this project. His leadership and initiative made this work possible.

References

- AFE-COHDEFOR. 2006. *Evaluación Nacional Forestal de Honduras 2005-2006*. Proyecto Apoyo al Inventario y Evaluación de Bosques y Arboles TC-HON-3001 (A). Resultados del Inventario de Bosques y Arboles 2005-2006. Honduras. Octubre 2006. 127 pp.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J. H., OLSHEN, R. A. & STONE, C. J. 1984. *Classification and Regression Trees*. Belmont, CA: Wadsworth, Inc.
- BROWN, J. C., JKASTENS, J., WARDLOW, B., JEPSON, W., CAMARGO COUTINHO, A., VENTURIERI, A., LOMAS, J. & K. PRICE, K. 2007. Using MODIS to detect cropping frequency variation in mechanized agriculture in Amazonia. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, pp. 99-101.
- COHDEFOR. 1996. *Plan de acción forestal de largo plazo 1996-2015*. PLANFOR. Borrador. Unidad de Planificación Institucional. AFE-COHDEFOR. Tegucigalpa MDC, Honduras. 127 pp.
- CONGALTON, R. G. & GREEN, K. 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Boca Raton: Lewis Publishers.

- DEFRIES, R. S., FOLEY, J. A. & ASNER, G. P. 2004. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Front. Ecol. Environment*, 2(5): 249-257.
- EGGEN-MCINTOSH, LANNON, S. K. B. & JACOBS, D. M. 1994. Mapping distributions of central America and Mexico. USDA-USFS. Southern Experiment Station. New Orleans LA. USA. Proceeding reprint.
- FALZARANO, S., THOMAS, K. & LOWRY, J. 2005. Using decision tree modeling in GAP analysis land cover mapping: Preliminary results for northeastern Arizona. In: C. van Riper III and D.J. Mattson (Eds.). *The Colorado Plateau II: Biophysical, Socioeconomic, and Cultural Research*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- FAO. 2005. *Forest Resources Assessment*. FAO. Rome, Italy.
- FOREST WATCH. 2010. <http://www.globalforestwatch.org/> consulted on Jun 21, 2010.
- FRIEDL, M. A., MCIVER, D. K., HODGES, J. C. F., ZHANG, X. Y., MUCHONEY, D., STRAHLER, A. H., WOODCOCK, C. E., GOPAL, S., SCHNEIDER, A., COOPER, A., BACCINI, A., GAO, F. & SCHAAF, C. 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83: 287-302.
- GOPAL, S. & WOODCOCK, C. 1994. Theory and methods for accuracy assessment of thematic maps using fuzzy sets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(2): 181-188.
- GUTIERREZ, L. A. 1992. *Diagnostico de las cuencas hidrográficas de Honduras*. Informe de Consultoria: Banco Interamericano de Desarrollo. Tegucigalpa, Honduras. 124 pp.
- HARGREAVES, G. 1992. *Hydrometeorologic data for Honduran water resources development*. USU, Dept. of Biological and Irrigation Engineering. Logan, Utah, 77 pp.
- JENSEN, J. R. 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 3rd. Ed. Pearson-Prentice Hall. 526 pp.
- LATIFOVIC, R., ZHU, Z., CIHLAR, J., GIRI, I. & OLTHOF, I. 2000. Land cover mapping of North and Central America-Global Land Cover. *Remote Sensing of Environment*, 89(2004): 116-127.
- LABA, M. L., GREGORY, S., BRADEN, J., OGURCAK, D., HILL, R., FEGRAUS, E., FIORC, J. & DEGLORIA, S. D. 2002. Conventional and fuzzy accuracy assessment of the New York Gap Analysis Project land cover map. *Remote Sensing of Environment*, 82: 443-456.
- LOTSCH, A., TIAN, Y., FRIEDL, M. A. & MYNENI, R. B. 2003. Land cover mapping in support of LAI and FPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 24(10): 1997-2016.
- LOVELAND, T. R., REED, B. C., BROWN, J. F., OHLEN, D. O., ZHU, Z., YANG, L. & MERCHANT, J. W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 6, 1303-1330.
- LOWRY, J., RAMSEY, R. D., THOMAS, K., SCHRUPP, D., SAJWAJ, R., KIRBY, J., WALLER, E., SCHRADER, S., FALZARANO, S., LANGS, L., MANIS, G., WALLACE, C., SCHULZ, K., COMER, P., POHS, K., REITH, W., VELASQUEZ, C., WOLK, B., KEPNER, W., BOYKIN, K., O'BRIEN, L., BRADFORD, D., THOMPSON, B. & PRIOR MAGEE, J. 2007. Mapping moderate-scale land-cover over very, large geographic areas within a collaborative framework: A case study of the Southwest Regional Gap Analysis Project (SWReGAP). *Remote Sensing of Environment*, 108: 59-73.
- MUCHONEY, D., BORAK, J., CHI, H., FRIEDL, M., GOPAL, S., HODGES, J., MORROW, N. & STRAHLER, A. 2000. Application of the MODIS global supervised classification model to vegetation and land cover mapping of Central America. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6): 1115 -1138.
- ORDÓNEZ, T. M. M. & HOUSE, P. 2002. *Mapa de Ecosistemas Vegetales de Honduras: Manual de Consulta*. Proyecto P.A.A.R., Tegucigalpa, Honduras.
- POIANI, K. A., RICHTER, B. D., ANDERSON, M. G., & RICHTER, H. E. 2000. Biodiversity Conservation at Multiple Scales: Functional Sites, Landscapes, and Networks. *Bioscience*, 50(2): 133-146.
- RICHARDS, M. 1996. Protected areas, people and incentives in the search for sustainable forest conservation in Honduras. *Environmental Conservation* 23 (3): 207-217.
- RULEQUEST RESEARCH. 2004. WWW URL: <http://www.rulequest.com/index.html> (accessed on June 21, 2010).
- SHEPPARD, S. R. J. & CIZEK, P. 2009. The ethics of Google Earth: Crossing thresholds from spatial data to landscape visualization. *Journal of Environmental Management*, 90(2009): 2102-2117.
- STONICH, S. C. 1993. *I am destroying the land. The political ecology of poverty and environmental destruction in Honduras*. Westview Press, Boulder, Colorado, 204 pp.
- UNESCO. 1973. *International Classification and Mapping of Vegetation*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France.
- VERMOTE, E. F. 2008. *MODIS Surface reflectance user's guide*. MODIS land use reflectance science computing facility. Prepared by E. F. Vermote, S. Y. Kotchenova and J. P. Ray. Web site: <http://modis-sr.ltdri.org>. 26 pp.

¿Quién es quién?

La Unidad de Observación del Territorio del Instituto Geográfico Nacional

La Unidad de Observación del Territorio (UOT) se constituyó en el IGN en 2009, unificando en una estructura común los Servicios de Teledetección, Fotogrametría, Levantamientos Topográficos, Ocupación del Suelo y Sensores Aerotransportados y Ortoproyección, todo ello bajo la dirección de Antonio Arozarena. A nivel nacional, las variadas actividades de esta unidad se han englobado en el «Plan Nacional de Observación del Territorio» (PNOT), que se estructura en tres Planes Nacionales:

— Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA): tiene como objetivo la obtención coordinada de coberturas del territorio de España con vuelos fotogramétricos cada 2/3 años según las zonas. A partir de ellos se obtiene un modelo digital del terreno y ortofotos digitales en color. El PNOA consta de los subproyectos PNOA 25/50 (coberturas con resoluciones de 25 cm ó 50 cm de todo el territorio), PNOA 10 (10 cm sólo en las zonas urbanas y la costa), PNOA Lidar (coberturas de todo el territorio con vuelos Lidar de 0,5 pto/m² de densidad) y PNOA Histórico (escaneado y ortoproyección de vuelos fotogramétricos históricos sobre España).

— Plan Nacional de Teledetección (PNT): coordina la obtención y tratamiento de recubrimientos compartidos de imágenes de satélite sobre nuestro territorio de alta, media y baja resolución, de forma que se adquieran y se procesen una sola vez y puedan ser utilizadas por todos los organismos de las distintas administraciones españolas. La UOT realiza el procesado de las coberturas de alta y media resolución del PNT.

— Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE): creación y

mantenimiento de una base de datos de Ocupación del Suelo a escala 1:25.000, con un modelo de datos innovador orientado a objetos, actualizada periódicamente.

El responsable de la UOT es Antonio Arozarena Villar, su subdirector adjunto es Guillermo Villa, y los ingenieros que se encargan de los distintos proyectos son:

— PNOA: Jorge Martínez Luceño, Javier Hermosilla, Francisco Papí Julián González, José Antonio Montón, Diego Ruiz, Emilio Santiago, Eduardo González, Magdalena Lequerica, Javier Nistal, Rafael Fernández, Pedro Muñoz, Juan Carlos Ojeda, Carlos García, Lidia Martínez.

— PNT: Juan José Peces, Emilio Domech, José Antonio Tejeiro, Nuria Plaza.

— SIOSE y Corine Land Cover: Nuria Valcárcel, M^a Ángeles Benito, Julián Delgado, M^a Elena Caballero, Xalo Fernández.

La unidad cuenta asimismo con un excelente equipo de operadores muy experimentados.

El PNOT es un proyecto cooperativo, coordinado y cofinanciado entre seis Ministerios (Fomento, Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Defensa, Economía y Hacienda, Interior, Ciencia e Innovación) y todas las Comunidades Autónomas. Por este motivo, la gestión del mismo requiere una amplia variedad de tareas, tanto técnicas como organizativas: estudio y redacción de Especificaciones Técnicas, cronogramas, presupuestos, financiación, producción, control de calidad, diseminación, generación de productos derivados y servicios basados en los datos producidos, gestión de convenios y contratos, contactos permanentes con todos los organismos participantes, organización de reuniones de grupos de trabajo, asambleas y jornadas técnicas; ade-

más de una variada actividad de I+D+i, realizada en muchos casos en colaboración con universidades, organismos públicos, empresa, fundaciones, etc. Todos los datos generados en el PNOT se ponen a disposición de las administraciones españolas y el resto de agentes sociales.

La UOT colabora en la prestación de información y servicios de análisis y geoprocésamiento espacial al grupo de trabajo interministerial para la elaboración del Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Convenio marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), dentro de la categoría Land Use. También colabora en el tratamiento y análisis de datos de ocupación del suelo para la elaboración del Perfil Ambiental de España y proporcionando datos y apoyo técnico a otros organismos españoles como el Observatorio de la Sostenibilidad de España, universidades, etc. Por otro lado colabora con otros organismos aportando datos para sistemas de información tales como el SIU (Sistema de Información Urbana), SIA (Sistema de Información del Agua), SNCZI (Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables), MFE (Mapa Forestal de España), etc. La UOT es responsable también de Iberpix, visor de imágenes y mapas del IGN.

A nivel internacional, el IGN a través de la UOT, es National Reference Center on Land Cover, Land Use and Spatial Planning de la red

EIONET ante la Agencia Europea de Medio Ambiente, por delegación del Ministerio de Medio Ambiente. Como tal, coordina la participación española en el servicio «Pan-EU Land Cover Services» de GMES, que incluye:

— CORINE Land Cover: realización y actualización, en cooperación con las Comunidades Autónomas y Ministerios, de la base de datos europea de coberturas y usos del suelo a escala 1:100.000 coordinada por la Agencia Europea de Medio Ambiente; en sus ediciones CLC90, CLC2000, CLC2006, CLC2012.

— High Resolution Layers, validación de las coberturas raster que conforman el componente de alta resolución de dichos servicios.

La actualización de ambos conjuntos de datos se realiza, en coordinación con las CC.AA., de modo que a partir de los datos nacionales SIOSE se elaboren los conjuntos de datos europeos. Por tanto, se puede definir el PNOT como la aportación española a los Servicios Land de GMES.

Además, la UOT participa en los proyectos FP7 HLANDATA y HELM, y aporta expertos a los siguientes «Thematic Working Group» de INSPIRE: Orthoimagery (Juan José Peces), Elevation (Eduardo González); Land Cover (Nuria Valcárcel) y Land Use (Julián Delgado) que tienen como propósito la elaboración de las «Data Specifications» de Inspire en los temas de los Anexos I-II y III. La UOT también participa en el Mediterranean Action Plan del



Parte del equipo de la Unidad de Observación del Territorio del IGN: De izquierda a derecha: De pie: Javier Nistal, Jorge Martínez Luceño, Nuria Valcárcel, Francisco Papí, Emilio Domenech, Juan Carlos Ojeda, Xalo Fernández, Pedro Muñoz, José Antonio Tejeiro. Sentados: Guillermo Villa, Antonio Arozarena, Magdalena Lequerica, M^a Ángeles Benito, Eduardo González Cristóbal, M^a Elena Caballero, Julián Delgado, Carlos García González, Juanjo Peces, Nuria Plaza, Javier Hermosilla.

Programa Medioambiental de las Naciones Unidas. También cabe destacar que Antonio Arozarena ha sido entre los años 2009 y 2010 presidente de EuroSDR, organización en la que la UOT mantiene una actividad constante, en colaboración con varios organismos y universidades europeos.

Como resumen, podríamos decir que el mayor valor que aporta la UOT es su labor de co-

ordinación de estos proyectos a nivel nacional y europeo, así como su encaje en el resto de temas de información geográfica y geoespacial coordinados por el IGN: IDEE (Infraestructura de Datos Espaciales de España), Sistema Cartográfico Nacional, Red Geodésica Nacional y EUREF, etc.; y su relación con organizaciones internacionales tales como: ISO/TC211, OGC, CEN/TC287 y otras.

Tesis doctoral

Estimación de parámetros térmicos mediante datos de alta frecuencia temporal: aplicación al sensor MSG2/SEVIRI

Autor: M. Atitar

Directores: J. A. Sobrio y N. Faissouni

Lugar: Laboratorio de Procesado de Imágenes. Universitat de València

Fecha: Abril de 2011

El uso de datos de Observación de la Tierra obtenidos mediante instrumentos embarcados en satélites se ha ido generalizando en un número creciente de disciplinas científicas, comerciales e industriales. Por ejemplo, se utilizan imágenes de satélite en la estimación de la temperatura de la superficie terrestre o de mar, la estimación del contenido total de vapor de agua, en estudios de producción primaria del océano, calidad del agua, control de parámetros ambientales, desertización, incendios forestales, control de mareas negras, aplicaciones cartográficas y por supuesto meteorológicas. Los datos de satélite son la única fuente de información disponible, sobre todo en situaciones de emergencia. Por esta razón es indispensable contar con sistemas de recepción de datos de satélite que garanticen la continuidad en la obtención de datos de satélite.

La Estación de Recepción de Datos de Satélites del LPI (Laboratorio de Procesado de Imágenes) de la Universidad de Valencia permitirá asegurar la obtención continua de imágenes de los satélites MSG2, NOAA, Feng-Yun1 y TERRA/AQUA. La estación se mantiene operativa desde junio del 2007.

La presente tesis doctoral aborda el tema de estimación de parámetros térmicos mediante datos de alta frecuencia temporal usando imágenes del sensor SEVIRI del satélite Meteosat Segunda Generación MSG2 recibidas en la estación de recepción de datos de satélites del LPI.

El parámetro más importante desarrollado en esta tesis es la temperatura de superficie terrestre TST, de hecho se ha elaborado un algoritmo de la estimación de la TST usando imágenes del infrarrojo térmico. La necesidad del conocimiento de la temperatura de la superficie terrestre para estudios medioambientales y para la administración de los recursos de la Tierra ha convertido la estimación de la temperatura desde satélite en uno de los temas de investigación más importantes en el campo de la Teledetección en el infrarrojo térmico durante las últimas dos décadas. Excepto para los componentes de la irradiancia solar, los flujos que intervienen en el balance de energía en la interface superficie/atmósfera únicamente pueden parametrizarse a partir del uso de la temperatura de la superficie terrestre. Por lo tanto, el conocimiento de la temperatura resulta de gran interés para muchas aplicaciones, como la estimación de los balances de agua y energía, evapotranspiración, inercia térmica, modelos de circulación general, efecto invernadero, estudios de desertificación, etc.

En esta tesis se estudia en profundidad el tema de la estimación de la temperatura TST a partir de los datos proporcionados por el sensor SEVIRI, sobre todo en la región espectral del infrarrojo térmico comprendida entre los 8 y los 13 μm . El algoritmo desarrollado en el trabajo se aplica a imágenes SEVIRI para su posterior validación.

Una vez presentada la teoría y desarrollado el algoritmo necesario para la estimación de la TST, llega el momento de aplicarlo a imágenes de satélite y validarlo. Para ello, previamente evaluamos su precisión frente a datos medidas in situ. El proceso de validación consiste en una comparación entre los resultados extraídos de las imágenes de satélite una vez aplicados los algoritmos y los resultados obtenidos a partir de medidas de campo u otros productos de satélites. De esta forma se considera que las medidas de campo o los resultados extraídos a partir de ellas son los más fiables, lo que habitualmente se llama verdad terreno, por lo que resulta de vital importancia disponer de unas medidas de campo de calidad. En esta tesis, se ha validado el algoritmo propuesto resultados con datos in situ de la zona de Le Bray, Burdeos, y además, con los productos MODIS y LANDSAF. los resultados

Una de las aplicaciones del algoritmo de la TST es el ajuste diario de temperaturas mediante un modelo que pueda reproducir la TST diurna y modelar el ciclo diario de temperatura, de esta manera, se han reducido las 96 tomas diarias del MSG2 a 5 parámetros. La reducción de parámetros con el CDT es ventajosa para los estudios climatológicos que requieren el tratamiento de series históricas. De lo anteriormente expuesto, se concluye que las diferencias entre las TSTs y el ajuste, por ejemplo, debidas a la presencia de algunas nubes, pueden considerarse mínimas si el ajuste continúa rápidamente con las TSTs similares a los que habría llegado sin nubes anteriormente. Cualitativamente, esto se puede observar, pero a fin de establecer una relación cuantitativa entre la cubierta de la nube (tipo y duración) y su efecto sobre la CDT, un análisis estadístico tiene que ser realizado. Las temperaturas ajustadas con el modelo para la cobertura de nubes tienen que ser tratadas con cuidado ya que no reflejan la verdadera temperatura de la superficie bajo las nubes. Sin embargo, la modelización permite la determinación de las temperaturas y, especialmente, la amplitud, que se han observado en el caso de cielo sin nubes.

Otros parámetros térmicos estimados en este trabajo encontramos la emisividad de la superficie terrestre, el vapor de agua y la inercia térmica.

A modo de resumen, presentamos a continuación las conclusiones más interesantes que puedan extraerse del trabajo expuesto en la presente memoria:

1. Se ha presentado la plataforma de recepción de datos MSG2, así como todas las etapas de adquisición, procesamiento y archivo de los datos

2. Se ha desarrollado un algoritmo operativo de tipo Split-Window para la estimación de la temperatura de la superficie terrestre a partir de los datos MSG2/SEVIRI, con un error de 1.3K, bajo ángulos de visión inferiores a 50 grados.

3. Se ha llevado a cabo una evaluación del algoritmo propuesto usando para ello un conjunto de medidas realizadas in situ en una región del sur de Francia (Le Bray-Burdeos) en el marco del proyecto CEFLES2, y se ha evaluado también con datos de satélite, MODIS y LANDSAF. Los resultados de esta evaluación corroboran el error obtenido por las simulaciones.

4. Se ha presentado un modelo de ajuste del ciclo diario de temperaturas. El modelo funciona bien en zonas homogéneas y sin nubes.

5. Como aplicación del algoritmo propuesto, se ha calculado la imagen de inercia térmica usando un algoritmo operativo de Xue y Cracknell (1995) y el algoritmo propuesto.

6. Se ha mostrado como otra de las posibilidades de la aplicación de inercia térmica la predicción de la temperatura mínima de la superficie de un día usando los valores de inercia térmica, siempre y cuando las condiciones de la superficie (humedad) y la situación atmosférica (sin nubes y en calma) no seas muy diferentes en ambos días, esta predicción dio una diferencia de 2K en zonas homogéneas como el desierto. Este resultado preliminar muestra la potencia del MSG2 para la predicción de la TST, lo que sin duda es necesario en aplicaciones como la predicción del riesgo de heladas por radiación, en la actualidad estamos completando el estudio con nuevas imágenes.

Para finalizar, debemos reseñar que todo el trabajo aquí realizado constituye una solución al problema de la determinación de la TST y la inercia térmica. Así se ha pretendido mostrar

la potencia del modelo propuesto, si bien es cierto, que aún queda un trabajo importante para llevar a cabo. Entre ellas, la de realizar nuevas experiencias de validación que tengan en cuenta zonas heterogéneas y rugosas, y mejo-

rar la estimación de los parámetros del CDT. Además, la posibilidad de la predicción de la temperatura de la superficie, puede ser útil para aplicaciones como la predicción del riesgo de las heladas por radiación.

Revista de Teledetección

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN

Nº 35

JUNIO 2011

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Comparación de la temperatura de la superficie del mar calculada a partir de datos AVHRR y MODIS.

C. Robles-González, N. López Gordillo, A. Fernández-Renau, A. García-Sevilla y J. Santana-Suárez

Utilización del sensor de imagen Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) para la cartografía de bosques de *Sargassum muticum* en la Ría de Vigo (Galicia).

G. Casal, J. A. Domínguez, N. Sánchez-Carnero y J. Freire

Evaluación de distintos métodos de medida de la irradiancia atmosférica descendente en el infrarrojo térmico.

V. García Santos, E. Valor, M. Mira, C. Coll, J. M. Galve y V. Caselles

Efecto de la atmósfera en la resolución óptica de la Z/I Digital Mapping Camera.

L. Martínez, M. E. Soler, F. Pérez y R. Arbiol

Delimitación de zonas forestales afectadas por vendaval mediante fotogrametría.

R. Riera

Airborne soil moisture determination at regional level: a data fusion mission approach for Catalan territory.

F. Martín, J. Corbera, J. F. Marchan, A. Camps y A. Aguasca

Aplicación de técnicas de teledetección y GIS sobre imágenes quickbird para identificar y mapear individuos de peral silvestre (*Pyrus bourgeana*) en bosque esclerófilo mediterráneo.

S. Arenas, J. F. Haeger y D. Jordano

Estimación de la reflectividad superficial mediante datos del sensor aéreo AHS y comparación con el producto MODIS en la campaña CEFLES2.

J. A. Sobrino y B. French

CASOS PRÁCTICOS

Aplicación de técnicas de teledetección para la gestión y control del pago de ayudas agrícolas en España.

J. M. Vidal Serrano

A MODIS generated land cover mapping of Honduras: a base-line layout to create a national monitoring center.

S. Rivera, J. L. Lowry, A. J. Hernández, R. Douglas Ramsey, R. Lezama y M. Velázquez

¿QUIÉN ES QUIÉN?: La Unidad de Observación del Territorio del Instituto Geográfico Nacional

TESIS DOCTORAL: Estimación de parámetros térmicos mediante datos de alta frecuencia temporal: aplicación al sensor MSG2/SEVIRI