

Actualización semiautomática de la malla de recintos del Mapa Forestal de España

G. Castilla*

*Sección de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional (IDR).
Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario, s/n. 02071 Albacete. España*

Resumen

Los principios que inspiran la futura Directiva Europea sobre Infraestructuras de Datos Espaciales han dado lugar a la puesta en marcha de un nuevo Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), donde se pueda integrar la información de las Bases de Datos de Ocupación del Suelo de las Comunidades Autónomas y de la Administración General del Estado, entre ellas la constituida por el Mapa Forestal de España (MFE). Este trabajo describe una prueba encargada por el Área de Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente cuyo objetivo es evaluar la posibilidad de actualizar de forma semiautomática el contorno de los recintos o teselas del MFE, que se usarán después como base para el SIOSE en zonas forestales, por medio de un segmentador de imágenes desarrollado por el autor. El resultado, si bien necesita ser contrastado con nuevas pruebas, es muy positivo, pues más del 80% de los bordes de teselas de la malla final proceden de la segmentación automática, lo que puede suponer un ahorro de tiempo de más de un 40% en la fotointerpretación.

Palabras clave: segmentación de imágenes, fotointerpretación asistida, SCRM, SIOSE, MFE.

Abstract

Semi-automated updating of polygon boundaries in the Forest Map of Spain

The principles of the future European Directive on Spatial Data Infrastructures inspire the new Spanish Information System on Land Occupation (SIOSE), where the information from the various existing landcover/landuse maps will be integrated, including that of the Forest Map of Spain (MFE). This work describes a test commissioned by the Nature Database Department of the Ministry of Environment, whose goal is to evaluate the possibility of semiautomatic updating, by means of an image segmentation algorithm developed by the author, of MFE polygon edges. The updated map may be used later to represent forest areas in SIOSE. The result, although needs to be confirmed by further tests, is very positive, because more than 80% of the edges of the final map come from the automatic segmentation, which may represent more than a 40% time-saving in the photointerpretation.

Key words: image segmentation, assisted photointerpretation. SCRM.

Introducción

El Mapa Forestal de España a escala 1:200.000 de D. Juan Ruiz de la Torre (en adelante MFE200), y su posterior síntesis a escala 1:1.000.000 (Ruiz de la Torre, 2002), constituyen una fuente imprescindible para el conocimiento de nuestros espacios forestales, pues son los únicos mapas de vegetación actual que existen para todo el territorio nacional con una metodología

única que además proporciona una variada información florística y fisionómica, lo que les hace útiles para muy diversos fines. De hecho, el diseño gráfico del mapa, con su ingenioso sistema de colores, tramas, letras y símbolos, permite transmitir visualmente un sinnúmero de detalles con una concisión difícilmente igualable. Esta información viene además reforzada por las memorias que acompañan cada hoja, que describen tanto su marco físico como el contenido de cada tesela. Otro elemento único y probablemente irreplicable de este mapa, es el ingente trabajo de campo realizado, que a lo largo de 10 años empleó a más de 130 técnicos que visitaron todas y cada una de las teselas forestales en cada una de las 92 hojas que componen el MFE200. To-

* Autor para la correspondencia: gcastill@ucalgary.ca

Recibido: 19-04-06; Aceptado: 12-09-06.

* Actualmente becario postdoctoral en la Universidad de Calgary, Canadá.

do ello hace que esta magna obra sea referencia obligada y punto de partida de los sucesivos proyectos de cartografía forestal que la Administración General del Estado (AGE) ha venido desarrollando desde entonces. En particular, el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50), heredero del MFE200, servirá de base, para las zonas forestales del territorio, de la infraestructura básica de información sobre la ocupación del suelo que la AGE y las Comunidades Autónomas (CCAA) han decidido hace poco crear formalmente a través del SIOSE. Este artículo se sitúa en el contexto de dicha iniciativa, a cuya divulgación pretende contribuir, y describe una prueba destinada a evaluar las posibilidades de ajuste automático del contorno de los recintos del mapa por medio de un segmentador de imágenes desarrollado por el autor. En lo que queda de este apartado, se detallan los antecedentes del SIOSE, la evolución técnica de la delineación de teselas en las sucesivas versiones del MFE, y el algoritmo de segmentación empleado. A continuación se describen la prueba y sus resultados, y se discuten éstos de cara a la aplicación operativa de esta técnica en la elaboración del SIOSE. Por último se hacen algunas consideraciones sobre futuras opciones de actualización, incluyendo los contenidos de tesela.

Antecedentes institucionales: INSPIRE, PNOT, SIOSE

La información territorial actualizada, detallada y accesible —física y económicamente— es una infraestructura básica en una sociedad en la que buena parte de los servicios se basan en la información. De entre ésta, uno de los temas más importantes es la distribución espacial de la cobertura del suelo, pues en función de su naturaleza y estado se ordenan las actuaciones y normativas en cada zona concreta. En los últimos años, los avances tecnológicos, unidos a una mayor prosperidad y sensibilidad de la sociedad hacia el ambiente, han hecho que los proyectos de cartografía de cobertura y/o uso (esto es, *ocupación*) del suelo se hayan multiplicado a varios niveles, desde el europeo (con el CORINE *Land Cover*) al provincial. Sin embargo, es patente la falta de coordinación institucional, que da lugar a duplicidades de esfuerzos, a inconsistencias entre los diferentes mapas, y a una disminución de la difusión y explotación de la información. Ante esta situación, que no es exclusiva de España, la Comisión Europea lanzó en 2002 la ini-

ciativa INSPIRE (<http://eu-geoportal.jrc.it/inspire>), que se espera dé lugar en 2007 a una Directiva Marco que pretende armonizar y fomentar la producción y uso de información geográfica.

Los principios INSPIRE (Tabla 1) pueden implementarse a través de las llamadas *Infraestructuras de Datos Espaciales* (IDE), que no son sino el marco tecnológico e institucional en cuyo seno se adquieren, se almacenan y se distribuyen datos sobre el territorio. Una IDE tiene que incluir bases de datos geográficos, datos sobre el origen y calidad de esos datos (*metadatos*), herramientas informáticas para buscar, consultar, y usar información territorial (catálogos y servicios de cartografía en red), métodos para acceder a ella y, sobre todo, acuerdos organizativos para su coordinación y administración. El diseño de la futura IDE de España (IDEE) está a cargo del Consejo Superior Geográfico, un órgano consultivo del Estado que integra todas las Administraciones Públicas (AAPP) y que funciona a base de comisiones. Una de ellas, la Comisión de Teledetección y Cobertura Aérea del Territorio, elaboró la propuesta de *Plan Nacional de Observación del Territorio* (PNOT), que pretende poblar de datos básicos la IDEE.

El PNOT, que desde el punto de vista organizativo se basa en los principios de voluntariedad, transparencia, descentralización, cooperación y cofinanciación, consta de cuatro componentes (Villa *et al.*, 2005):

a) *Sistema Cartográfico Nacional* (SCN), que comprende la actualización de las bases cartográficas topográficas de escala 1:5.000 a 1: 200.000 con un modelo de datos consensuado.

Tabla 1. Principios de la iniciativa INSPIRE

1. Los datos deben recogerse una sola vez y conservarse en el nivel de la Administración donde resulte más eficaz.
2. Debe ser posible casar y combinar la información procedente de diferentes fuentes europeas y ponerla al alcance de un gran número de usuarios y aplicaciones.
3. Debe ser posible que la información recogida a un nivel puedan compartirla todos los niveles.
4. La información territorial necesaria para una buena gestión debe estar disponible en condiciones que no impidan su amplia utilización.
5. Debe ser sencillo averiguar de qué información territorial se dispone, cuál se ajusta a las exigencias de un uso concreto y en qué condiciones se puede adquirir y utilizar.
6. La información territorial debe ser fácil de entender e interpretar, y poderse visualizar en el contexto apropiado de manera sencilla.

b) *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea* (PNOA), que proporcionará ortofotos digitales a color con tamaño de píxel de 0,5 m con una periodicidad de 2 años.

c) *Plan Nacional de Teledetección* (PNT), que adquirirá imágenes de satélite (SPOT, Landsat, IRS, etc.) de varias resoluciones (de 5 a 1.000 m), con periodicidad trimestral, para identificación de cultivos, cartografía de incendios y otras aplicaciones.

d) *Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España* (SIOSE), que integrará las diferentes bases de datos de ocupación del suelo a nivel nacional (MFE, CORINE, Mapa de Cultivos y Aprovechamientos-MCA) en una única capa de información en formato vectorial de polígonos y escala de referencia 1:25.000, y se actualizará con una periodicidad de cinco años.

Por tanto, el SIOSE es un componente del PNOT que pretende aplicar los principios INSPIRE y recoger la información sobre ocupación del suelo *una sola vez*, evitando duplicidades y reduciendo costes, y hacerla *utilizable por todos*, satisfaciendo las necesidades de las diferentes Administraciones. Desde el punto de vista técnico, uno de los aspectos novedosos del SIOSE es el uso de diagramas Entidad-Relación en notación UML (Lenguaje Unificado de Modelado) para definir el modelo de datos, lo que permite entre otras ventajas su posterior modificación y ampliación. La entidad básica de este modelo es el *polígono* (tesela en la terminología del MFE200), que tiene asociadas dos superclases: *Cobertura* y *Uso*. La diferencia entre ambas es que la primera describe el tipo de estructura biofísica que cubre el terreno representado por el polígono, mientras que la segunda se refiere a las actividades socioeconómicas que se realizan sobre dicho terreno (IGN, 2005).

Desde el punto de vista organizativo, la dirección del Proyecto está a cargo de la Subdirección General de Producción Cartográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que con el fin de consensuar el modelo de datos, la metodología y los criterios de disseminación, ha creado una serie Grupos de Trabajo Temáticos, integrados por representantes de las AAPP participantes. Uno de estos Grupos, el de Metodología, se encarga de establecer las especificaciones técnicas del proceso de producción y verificación. Una de ellas prescribe que en las fases previas a la asignación de contenidos de polígonos, se procederá a la integración geométrica de las bases datos existentes relativas a ocupación del suelo, dándose preferencia, el caso de zonas forestales, a la malla de recintos del MFE50, de ahí el interés de la prueba que aquí se describe para el SIOSE.

Desde el punto de vista técnico, la unidad de obra del SIOSE es la hoja del Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 (MTN25), si bien se usará como Sistema Geodésico de Referencia el ETRS89, que es el recomendado por INSPIRE como marco común de todas las IDEs europeas. La referencia geométrica del SIOSE es el mosaico imágenes SPOT5 HRG (imagen de cuatro bandas con 2,5 m de tamaño de píxel derivada de la fusión de las bandas multispectrales con la pancromática) de todo el territorio nacional capturadas durante el 2005 y ortorectificadas en UTM ETRS89. Por tanto, una etapa primaria de la elaboración del SIOSE en zonas forestales consiste en modificar aquellos bordes de tesela que a juicio del fotointérprete no se ajusten suficientemente a la nueva imagen de referencia. La posible automatización de este proceso, con las mejoras de calidad y eficiencia que conllevaría, suscita un gran interés.

Evolución técnica de la delineación de teselas en las sucesivas versiones del MFE

Podría decirse que la andadura histórica del Mapa Forestal España comienza 1868 con la creación de la Comisión homónima, a la que por motivos políticos (según Morcillo, 1998, fue considerada un estorbo para el avance de la desamortización de Madoz) se le retiró la consignación presupuestaria en 1887, dejando completados únicamente los mapas de cuatro provincias (Villaescusa *et al.*, 2001). Estos trabajos probablemente se basaron en croquis dibujados sobre rudimentarios mapas topográficos a partir de recorridos a caballo y del conocimiento previo de los Ingenieros de Montes que los realizaron.

Después de diversos avatares, se inician en 1963 los trabajos del Mapa Forestal de España a escala 1:400.000, bajo la dirección de D. Luis Ceballos, Catedrático de Botánica de la Escuela de Montes de Madrid, que encarga el trabajo de campo a tres de sus mejores alumnos ya licenciados, los ingenieros Úbeda, López Vallejo y Pardos Carrión (este último sería años después Catedrático de Anatomía y Fisiología Vegetal en dicha Escuela), que se repartieron por provincias y durante tres años las recorrieron con ayuda de los Servicios Forestales de cada una de ellas, dibujando sus observaciones sobre la distribución espacial de las masas forestales en hojas del MTN200, siendo esos croquis transferidos a la escala final por un delineante (García Viñas y López Leiva, 2006).

Veinte años más tarde, el ICONA encarga un nuevo mapa forestal al sucesor de D. Luis Ceballos en la Cátedra de Botánica, D. Juan Ruiz de la Torre, esta vez a escala 1:200.000. En la elaboración del MFE200, la delineación de recintos se realizaba a mano (con rotuladores indelebles) sobre hojas de acetato superpuestas a fotogramas pancromáticos de escala aproximada 1:30.000. Tras el trabajo de campo, se subsanaban los errores de interpretación del contenido de las fotografías y se recogían los cambios ocurridos en la cubierta desde el momento del vuelo hasta la inspección del terreno. Posteriormente se transferían a un papel de calco, de tamaño equivalente al de una hoja del MTN50, los mosaicos corregidos de los fotogramas incluidos en la hoja correspondiente a esa zona, por medio de un dispositivo óptico (cámara clara), obteniéndose una escala uniforme de 1:50.000. Finalmente, se reducían a 1:200.000 y se integraban las 16 hojas MTN50 que componen una hoja MTN200 sobre una hoja de poliéster indeformable, a partir de la cual se elaboraban las planchas de imprenta (Ruiz de la Torre, 1990).

Tras completarse el MFE200 en 1997, la ahora Dirección General de Biodiversidad, ante la necesidad de disponer de una cartografía forestal de mayor detalle espacial para el siguiente Inventario Forestal Nacional (IFN3), decide ese mismo año crear un nuevo Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 en formato vectorial (el MFE50) que sirviera como mapa de superficies del IFN3. Por primera vez, el progreso y abaratamiento de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) hace posible la digitalización directa sobre pantalla de ordenador, lo que elimina los errores de transferencia de foto aérea a mapa y el paso del mapa en papel al mapa digital (Vallejo, 2005a). Además, este nuevo proyecto se beneficia de la ortofoto pancromática de 1m de píxel del SIG oleícola, que fue realizada en 1997-98 por el Ministerio de Agricultura en cumplimiento del Reglamento (CEE) 2366/98 que obliga a los Estados Miembros a crear un sistema de control de las ayudas al sector olivarero.

Tras algunas pruebas metodológicas (Vallejo, 2005a), que incluyeron entre otras la digitalización en pantalla estereoscópica (que si bien facilita la interpretación visual, se desestimó por su mayor lentitud y coste del equipamiento), se optó por crear una aplicación a medida, a partir del SIG corporativo de la empresa adjudicataria (TRAGASATEC, 1999). Ésta se basa en una pantalla de trabajo que contienen varias ventanas, una principal con la ortofoto, y otras con car-

tografía de apoyo y con consultas a las diferentes bases de datos. La delineación de recintos se hace por digitalización directa en la ventana principal, con la particularidad de que la topología se crea en tiempo real, de forma que el sistema permite detectar y corregir fácilmente errores como arcos colgantes y polígonos espurios. La asignación del contenido de los recintos se basa en la información de la propia ortofoto y en aquella preexistente (MFE200, MCA, mapas autonómicos si existen, parcelas del IFN2). Los recintos para los que no exista información complementaria o existan dudas se completan en una visita al campo.

En la actualidad, el MFE50 está prácticamente completado, con lo que pronto comenzarán los trabajos de la nueva edición a escala 1:25.000 (MFE25), que servirá como base cartográfica al futuro nuevo Inventario Forestal Nacional (IFN4). Como el énfasis de estos inventarios se está trasladando de la clásica determinación del volumen maderable hacia aspectos más relacionados con la biodiversidad, se va a recuperar el aspecto más botánico del MFE200, de forma que en el nuevo MFE25 se volverá a incorporar la información relativa a los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea, que se dejó de lado en el MFE50. Otro aspecto que sin duda marcará esta nueva edición será su coordinación e integración con el SIOSE, en la que la separación entre las zonas agrícolas y forestales será consensuada y en el interior estas últimas primará la delimitación del MFE (Vallejo, 2005b).

Breve descripción del segmentador de imágenes SCRM

SCRM (Size Constrained Region Merging, Castilla, 2003, 2004, 2005; Castilla *et al.*, 2004, 2006), es una herramienta que genera de forma automática, a partir de una ortoimagen digital, una capa vectorial (en formato ESRI shape -.shp) de polígonos similar a la que delinearía un fotointérprete al que se le diera la tarea de dividir la imagen en un cierto número de recintos, que posean una apariencia uniforme su interior y un aspecto diferente del de su exterior, y que superen todos ellos un cierto tamaño mínimo. SCRM es por tanto una implementación de un método de segmentación de imágenes, la cual no debe confundirse con la clasificación digital. Un segmentador divide una imagen digital en trozos de apariencia interna homogénea y que presenten un cierto contraste con sus vecinos colindantes, pero nada dice acerca del tipo de cubierta de cada trozo,

no es por tanto un clasificador. La clasificación digital no es adecuada para la delineación de recintos debido a la falta de coherencia espacial de las imágenes clasificadas, que dificulta una vectorización de calidad como la que este segmentador produce.

La herramienta se basa desde el punto de vista conceptual en un modelo jerárquico del paisaje (Woodcock y Harward, 1992; Wu y Loucks, 1995) en el que éste se organiza en unidades anidadas del tipo árbol-rodal-bosque, de forma que cada unidad u *objeto* tiene una escala espacio-temporal mayor y un grado de integración menor que las de los objetos que lo componen. Los diferentes niveles que componen dicha jerarquía se pueden establecer por convención imponiendo un cierto tamaño mínimo, medio y máximo de los objetos dentro de cada nivel. SCRM toma dichos requisitos como parámetros de usuario y a partir de ellos construye de forma automática una representación vectorial que se atiene a esas restricciones y en la que cada polígono puede corresponder potencialmente, sólo o en compañía de otros vecinos, a una unidad semántica, esto es, a una tesela. Por tanto lo que viene a automatizar el segmentador es la primera fase de la fotointerpretación, consistente en la delineación de recintos radiométricamente coherentes, de tamaño en general inferior al de las teselas finales del mapa. Posteriormente estos recintos se hacen semánticamente coherentes mediante su interpretación (con apoyo de datos de campo o de fotografía de mayor resolución), lo que supone su agregación (caso normal) en unidades mayores, o su segregación (caso menos frecuente), cuando tras un análisis más detallado se constata que alguno de estos recintos presenta más de una cobertura que se han confundido por su parecido en la imagen.

La secuencia de procesamiento de SCRM es la siguiente: se carga la ortoimagen y eventualmente se remuestrea a un tamaño de píxel adecuado a la precisión de bordes requerida (ver siguiente párrafo); se filtra la imagen mediante un suavizado con preservación de bordes que elimina la textura gruesa; se deriva una imagen de magnitud del gradiente de la imagen filtrada, que es análoga a un modelo digital del terreno en el que la altitud de cada punto es inversamente proporcional a la uniformidad del entorno del punto; se delimita el área de influencia de cada mínimo local de gradiente mediante el algoritmo de las microcuencas (Vincent y Soille, 1991), obteniéndose un mosaico de

regiones primarias; se agregan esas regiones iterativamente, por orden de mayor a menor parecido, hasta obtener una partición acorde a los parámetros de tamaño introducidos, evaluándose la similitud entre regiones vecinas según la misma métrica que se empleó para producir la imagen de gradiente (distancia euclídea en un espacio multivariante en que cada dimensión es un canal de la imagen), y reevaluándose el parecido de las regiones colindantes con cada nuevo agregado después de cada iteración; y se convierte el ráster de salida en una capa vectorial. El tiempo total de procesamiento en un PC medio (CPU 1,6 Mhz, 500 MB RAM) es menos de 3 min por Megapíxel.

El algoritmo SCRM está implementado en IDL (RSINC, 2006a), un lenguaje de programación orientado a matrices especialmente adecuado para trabajar con imágenes digitales, y se puede incorporar modularmente al software de tratamiento de imágenes ENVI (RSINC, 2006b). La herramienta tiene una interfaz de usuario en la que éste puede introducir las restricciones de tamaño (mínimo, medio y máximo) para los polígonos de la capa de salida, que en adelante se llamarán *segmentos* para diferenciarlos de las teselas finales del MFE. Hay un cuarto parámetro, el *intervalo mínimo entre vértices* (IMV), que determina la complejidad de los arcos, y que es equivalente a exigir al fotointérprete una escala máxima de visualización por encima de la cual no debe digitalizar. Esto es necesario porque la complejidad de los bordes de las teselas, y por ende su longitud, crece indefinidamente con la resolución espacial, como consecuencia de su naturaleza fractal (Castilla, 2003). El valor por defecto del IMV es el doble del tamaño de píxel de la imagen original; si se modifica, la imagen se remuestrea (mediante promediado simple) a la mitad del valor de IMV introducido. La prueba que se describe a continuación pretende evaluar la conveniencia de usar SCRM para ajustar de forma semiautomática la malla de recintos del MFE a la imagen base del SIOSE.

Material y Métodos

La prueba corresponde a un área de 6×6 km² situada a unos 10 km al O de Yecla, Murcia, cuyo centro tiene como coordenadas 38.6336 N, 1.2328 W*. Se trata de una zona hiperxérica, con lluvias escasas e

* La zona se puede visualizar en 3D en alta resolución en Google Earth, hasta introducir las anteriores coordenadas en el cuadro de búsqueda («Fly to»).

irregulares (unos 300 mm/año), predominantemente agrícola en los llanos, que se sitúan a unos 600 m de altitud y están formados por depósitos cuaternarios, y en las zonas con mayor pendiente, con alturas de hasta 1.000 m y que corresponden a calizas del Cretácico, matorrales mixtos de romero y esparto, y pinares de carrasco (Fig. 1).

La imagen utilizada para la segmentación se ha obtenido a partir de una ortofoto digital a color de 0,5 m de tamaño de píxel, procedente de un vuelo fotogramétrico a escala 1:20.000 que fue realizado en el año 2002 dentro del proyecto de creación del Sistema de Información Geográfica para la gestión de las ayudas de la Política Agraria Común (SIGPAC, RD 2128/2004). Esta ortofoto se ha remuestreado a un tamaño de píxel de 2,5 m, dando lugar a una imagen que en adelante llamaremos *pseudoSPOT* y que es un sucedáneo de la imagen fusionada SPOT5 que se usará como referencia en el SIOSE, la cual aún no estaba disponible en el momento en que se hizo la prueba. Como información auxiliar se han usado las capas vectoriales del MFE200 y del MFE50 (Fig. 1) para esa zona. Por último, se usaron los siguientes valores de los parámetros de usuario para la segmentación (Fig. 2), cuya elección se justifica en el siguiente párrafo: tamaño mínimo de segmento, 2 ha; tamaño medio, 3 ha; tamaño máximo, 50 ha; y distancia mínima entre vértices, 10 m. El tiempo total de procesado fue de 3min y 35 s.

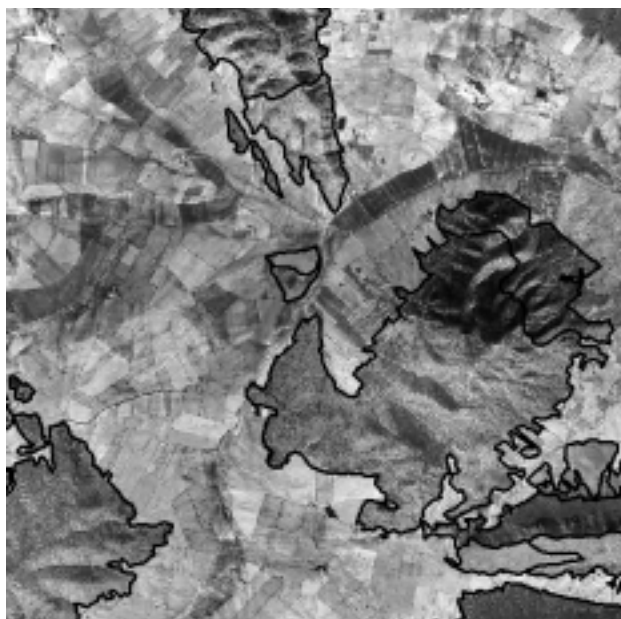


Figura 1. Ortofoto (de 1997) de la zona de la prueba (6 x 6 km²) con el MFE50 superpuesto.

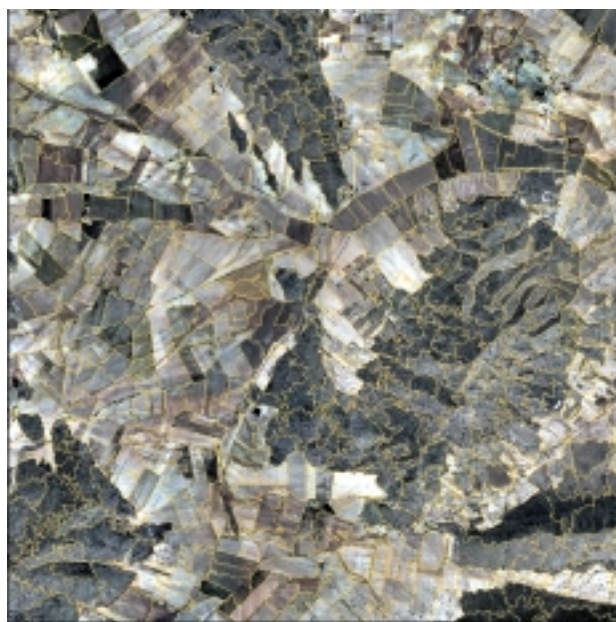


Figura 2. Imagen pseudoSPOT (de 2001) con la capa automática generada por SCRM.

El tamaño mínimo es el mismo que el definido en el SIOSE para zonas forestales, por tanto en principio no interesan segmentos menores que ese tamaño. Respecto al tamaño medio, hay dos estrategias posibles, dependiendo de cómo se vaya a usar la capa de salida, lo que su vez depende del parecido entre la imagen de la que se derivó la capa que se pretende ajustar y la nueva imagen base: si las diferencias geométricas son pocas, como es el caso de este ejemplo, es preferible tomar un valor medio cercano al mínimo, con el fin de obtener un teselado muy fino que posteriormente se puede simplificar automáticamente según caigan los segmentos en la misma tesela del MFE50. Si las diferencias son mayores y la capa requiere un mayor ajuste, ese tipo de postprocesado dará lugar a resultados indeseables, por lo que en ese caso es mejor tomar un valor medio algo mayor que el anterior y algo menor que el de la capa a ajustar, y agregar manualmente (mediante clics de ratón) los segmentos. En cuanto al tamaño máximo, se ha elegido arbitrariamente un valor seis veces inferior al máximo admitido en el MFE50 (300 ha), que al ser suficientemente grande hace que este parámetro apenas tenga influencia, pues sólo interviene si existieran zonas muy homogéneas de un tamaño superior al máximo establecido. Por último, un espaciado mínimo entre vértices de 10 metros se ha considerado adecuado para la escala 1:25,000 del SIOSE, pues un intervalo más corto da lugar a bordes que a esa escala se ven muy quebrados.

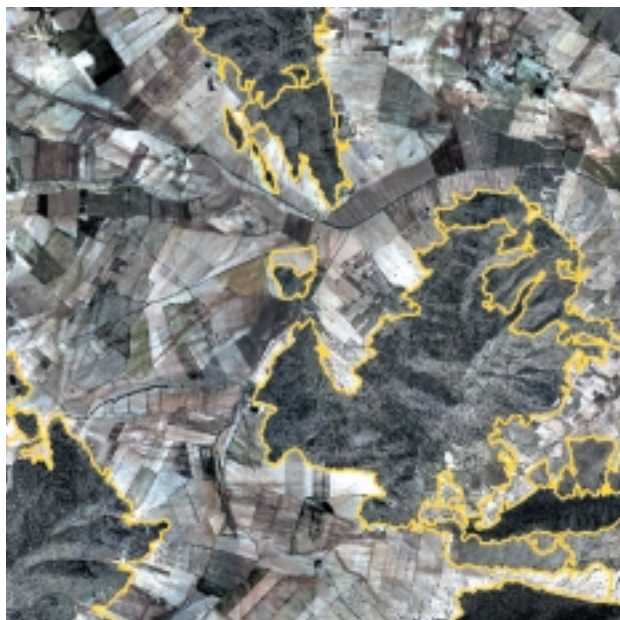


Figura 3. Capa resultante de la agregación automática de segmentos de la capa SCRM según sus centroides caigan en la misma tesela del MFE50.

Para realizar la prueba, se seleccionó a dos alumnos del Curso de Especialista en Teledetección y SIG que el IDR organiza anualmente para que hicieran las veces de intérpretes, en adelante 1 y 2, los cuales ya tenían alguna experiencia previa en fotointerpretación. Como entorno SIG se usó ArcView 3.2 (ESRI, 2006), al que se añadió una extensión de digitalización a mano alzada que permite especificar el espaciado entre vértices. En una primera etapa, se les proporcionó únicamente la imagen pseudoSPOT y la ortofoto, la primera como base geométrica y la segunda como apoyo interpretativo, y se les dio la tarea de delinear una capa con las especificaciones técnicas del MFE50, usando como orientación el MFE200 y como escala de visualización para digitalizar, 1:10.000, anotándose el tiempo invertido por cada uno. Posteriormente, se les proporcionó la capa del MFE50 y la generada por SCRM, y se les encomendó crear a partir de la capa SCRM una capa similar a la del MFE50 pero ajustada a la imagen pseudoSPOT, para lo cual una operación previa que hicieron fue agregar los segmentos de la capa de SCRM según sus centroides cayeran dentro en la misma tesela del MFE50 (Fig. 3). La capa resultante de la agregación automática se duplica, y se trabaja sobre la copia, que tras la edición se convertirá en el resultado final. La edición consiste en revisar visualmente los arcos, y corregir aquellos tramos donde la delineación automática no sea acorde al

trazado que el intérprete considere adecuado. La corrección puede hacerse bien editando (moviendo, eliminando y/o agregando) los vértices de la capa automática, o bien creando un arco nuevo con la herramienta de digitalización a mano alzada y eliminando continuación el arco no deseado (mediante la agregación del polígono espurio recién creado al polígono adyacente que comparte con él el arco que se quiere borrar).

Resultados

La figura 4 muestra el resultado final del método propuesto, esto es, la nueva capa vectorial del MFE ajustada a la imagen pseudoSPOT. De los 55.198 m de arcos (excluidos los 24 km de marco) dentro de esta capa final, tan sólo 10.612 m fueron delineados manualmente, es decir, más de un 80% de la longitud de arcos de la capa final procede de la segmentación automática. Respecto al ahorro de tiempo, los intérpretes 1 y 2 tardaron respectivamente 25 y 24 minutos en obtener la capa ajustada del MFE a partir de la capa automática de la figura 3, mientras que cuando digitalizaron todo manualmente invirtieron 50 y 45 minutos respectivamente, lo que supone un ahorro medio del 42% (descontando los 3 minutos y medio de la segmentación, si no sería más del 50%), o expresado en

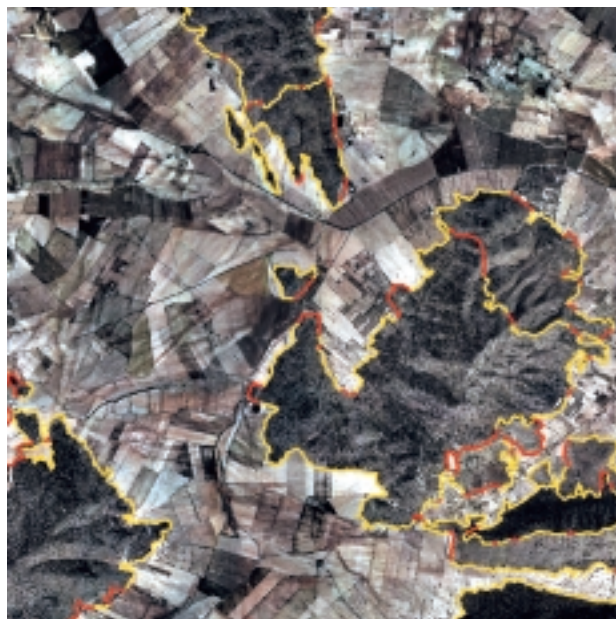


Figura 4. Capa final con el nuevo MFE ajustado a la imagen pseudoSPOT. Los arcos que han sido digitalizados manualmente se muestran en rojo.

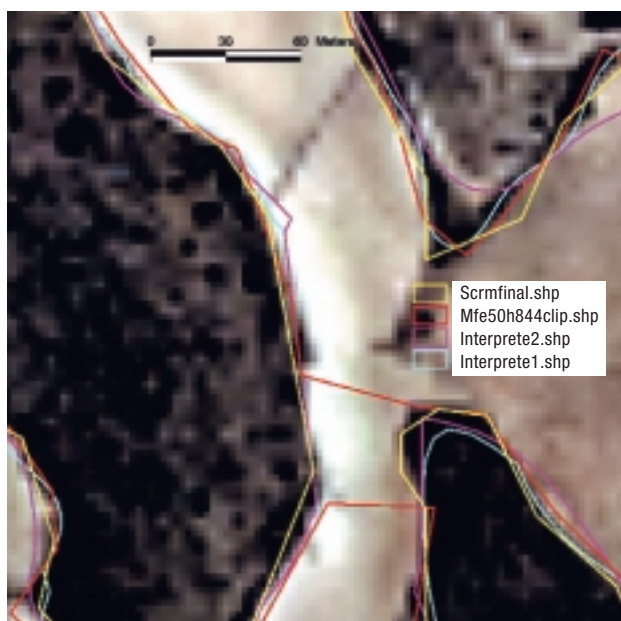


Figura 5. Detalle de las delineaciones original (MFE50, rojo), automática (SCRM, amarillo) y humanas (morado y celeste) sobre un trozo de 250×250 m².

otros términos, 22 segundos por kilómetro lineal de borde de tesela, o más de 5 segundos por centímetro de arco en la capa final a 1:25.000. Finalmente, y en relación a la calidad el trazado del resultado final, apenas se aprecian diferencias entre la delineación original del MFE50, la manual de los dos fotointérpretes, y la automática del segmentador, si bien este último parece en general ajustarse mejor a la imagen que los demás. Como ejemplo se muestra en la figura 5 un trozo de 25 ha que comprende partes de las teselas 160 (*Pinus halepensis* arbustivo), 256 (matorral mixto calcícola con pies dispersos de *Pinus halepensis*) y 106 (cultivos agrícolas) de la hoja 844 (Yecla) del MFE50. En la capa final, la tesela 160 ha sido segregada en dos polígonos (los dos islotes alargados que aparecen en el centro-norte de la zona de prueba), al estar separados por un corredor de más de 25 m de ancho. Este tipo de corredores artificiosos se permitían para preservar la información sobre manchas de arbolado fuera de monte menores que el tamaño mínimo; sin embargo, al haber disminuido este umbral, los dos islotes pueden representarse mediante recintos separados.

Discusión

Aún a falta de determinar la representatividad de esta prueba para el contexto de todo el territorio nacio-

nal, se puede concluir que el uso del segmentador SCRM en la actualización del nuevo MFE y su integración con el SIOSE redundaría en un aumento de la productividad de los fotointérpretes y de la calidad y consistencia del producto final, si bien cuantificar dicho aumento extrapolando los resultados de esta prueba parece arriesgado y prematuro. Por un lado, la zona de la prueba es relativamente simple, con un buen contraste entre lo agrícola y lo forestal, y con pocos bordes dentro de lo forestal; es posible que en zonas más complejas, en las que además haya teselas adyacentes con rótulos que no conlleven diferencias marcadas en la imagen, los resultados del segmentador no sean óptimos (aunque tampoco lo serán los de los fotointérpretes, cuya delineación será tanto más subjetiva cuantas menos diferencias se aprecien). Por otro lado, no se han probado otros itinerarios de ajuste de la capa SIOSE a la imagen base, como podría ser usar la propia capa del MFE50 como plantilla a corregir, o incluso la capa vectorial del catastro, que donde está actualizada se ajusta sorprendentemente bien al límite entre lo agrícola y lo forestal. Si bien merece la pena probar estas dos alternativas, se puede anticipar un problema, y es la falta de homogeneidad de esos productos para todo el territorio nacional, pues por ejemplo para el caso del MFE50, se ha usado como base geométrica desde las imágenes de 5 m de píxel del satélite indio IRS-1 hasta las ortofotos de medio metro del SIGPAC, además de las inevitables diferencias de criterio y estilo a la hora de trazar contornos entre los numerosos intérpretes que intervinieron.

No obstante lo dicho, se podría hacer una estimación hipotética del ahorro que el método propuesto podría suponer *ceteris paribus* para la provincia en la que está situada la zona de la prueba. El MFE50 tiene en Murcia 42.000 km de bordes de teselas, que multiplicados por los 22 s/km que se ahorraron en la prueba, darían un total de 257 h de fotointérprete, que suponiendo un coste (incluidos costes sociales y beneficio empresarial) de 30 € por hora de trabajo efectivo, supondrían cerca de 8.000 €, o más de 60 céntimos por km². En cualquier caso, quizá no sea este ahorro el mayor beneficio de usar el segmentador, sino el aumento de consistencia en los trazados, que estarían mejor ajustados, basados en un método objetivo, y con el mismo estilo en todas y cada una de las más de 4.000 hojas MTN25 del SIOSE. Además, su utilización supondría un hito mundial, pues sería la primera vez que una cartografía nacional se basa en recintos cuyos bordes en su mayor parte han sido delineados automáticamente.

Finalmente, hablando del futuro, cabe destacar que el proceso propuesto es susceptible de mejoras. Por ejemplo, la agregación de segmentos que se solapan con más de una tesela del MFE50 puede realizarse usando como criterio la distancia radiométrica en lugar de la ubicación del centroide. Si además se dispusiera de la imagen base con la que se confeccionó cada hoja del MFE50, se podrían fácilmente marcar los segmentos forestales que han sufrido un cambio radiométrico significativo que es probable se deba a un cambio de cobertura, tras p. ej. un incendio. Si se desea mantener el trazado original del MFE50 para aquellos arcos que se ajusten bien, se podría modificar el algoritmo de vectorización para que coloque los vértices de esos arcos exactamente en el mismo lugar. También se puede avanzar en la asignación semiautomática de contenidos, pero esto sin duda requerirá un esfuerzo de investigación mayor, que se podría combinar con la creación de un sistema de actualización que involucre a los servicios territoriales de medio ambiente de cada zona y al público en general. En este sentido, la difusión de los sistemas de navegación por GPS y de la información territorial por internet, con aplicaciones como el Google Earth (Butler, 2006), hacen posible que cualquier ciudadano amante de la Naturaleza y conocedor de su comarca o provincia, pueda alertar a la administración de cualquier cambio o incongruencia entre el SIOSE y la realidad. Habilitar tal posibilidad de participación pública será un paso importante en el avance hacia la sociedad del conocimiento, en la que la información dé paso a un papel preponderante de la cultura en sentido amplio, que nos hará mejores conciudadanos, pues como decía Paracelso, quien conoce, ama, comprende y otorga el valor real a las cosas.

Agradecimientos

Quisiera agradecer su colaboración a los alumnos de la VI edición del Curso de Especialista en Teledetección y SIG de la UCLM que realizaron la fotointerpretación, Milagros Alfaro y Miguel Angel Monsalve. También estoy en deuda con Roberto Vallejo e Inmaculada García Bonilla, del Área de Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente, por haber suministrado los datos necesarios para la realización de la prueba, sugerido muy oportunas correcciones al primer manuscrito, y propuesto a la Comisión de Metodología del SIOSE probar el segmen-

tador SCRM. Por último, mis agradecimientos por la oportunidad brindada a Juan Ignacio García Viñas, Editor de este Número Extraordinario en homenaje al D. Juan Ruiz de la Torre; al Redactor Jefe de esta Revista, Gregorio Montero González, por sus sugerencias para mejorar este artículo; y como no, a Don Juan, por su incondicional apoyo todos estos años. En particular, gracias a su aval conseguí una beca del Ministerio de Educación y Ciencia con la que pude especializarme en teledetección en un centro de la Agencia Europea del Espacio (ESA). Además, tras regresar a España después de la estancia de dos años en la ESA y sin apoyos financieros para continuar mi tesis doctoral, me ofreció un generoso contrato de consultoría que evitó que retomara mi vida de cooperante y abandonara la de investigador, lo que a la sazón me permitió reencontrarme con la que después sería mi esposa.

Referencias bibliográficas

- BUTLER D., 2006. Virtual globes: The web-wide world. *Nature* 439, 776-778. DOI:10.1038/439776a
- CASTILLA G., 2004. Size-Constrained Region Merging: a new tool to derive basic land-cover units from Remote Sensing imagery. Theory and Applications of Knowledge driven Image Information Mining, with focus on Earth Observation. ESA SP- 553, pp. 54-62.
- CASTILLA G., 2005. Teselado automático de ortoimágenes. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 19, 229-234.
- CASTILLA G., 2003. Object-oriented analysis of Remote Sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline partition for classification. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 226 pp. Disponible en http://www.montes.upm.es/servicios/biblioteca/tesis/GCastillaTD_Montes.pdf
- CASTILLA G., HAY G.J., RUIZ J.R. (aceptado tras revisión el 19/06/2006). Size-constrained region merging (SCRM): an automated delineation tool for assisted photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, en prensa.
- CASTILLA G., LOBO A., SOLANA J., 2004. Size-constrained region merging (SCRM): a new segmentation method to derive a baseline partition for object-oriented classification. *Proceedings of SPIE* 5239, 472-482.
- CEBALLOS L., 1966. Mapa forestal de España. Escala 1:400.000. Ministerio de Agricultura. Madrid, España.
- ESRI, 2006. ArcView - The Geographic Information System for Everyone. ESRI, Redlands, California, EEUU. Disponible en <http://www.esri.com/software/arcview/arcview3x.html>
- GARCÍA VIÑAS J.I., LÓPEZ LEIVA C., 2006. El Mapa Forestal de España a escala 1:200.000, metodología, desa-

- rollo y aplicaciones. *Sistemas y Recursos Forestales*, Número Extraordinario en homenaje al Profesor Ruiz de la Torre.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN), 2005. Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE). Documento Técnico, versión 1.0 (borrador).
- MORCILLO A., 1998. Estudio introductorio de la edición facsímil de la «Descripción Física, Genóstica, Agrícola y Forestal de la Provincia de Guadalajara» de D. Carlos Castel (1881). Junta de Comunidades de Castilla La Mancha, Guadalajara, España, pp. IX-LXXI.
- RSINC, 2006a. The Interactive data Language (IDL). RSI, Boulder, Colorado, EEUU. Disponible en <http://www.rsinc.com/idl>.
- RSINC, 2006b. The Environment for Visualizing Images (ENVI). RSI, Boulder, Colorado, EEUU. Disponible en <http://www.rsinc.com/envi>.
- RUIZ DE LA TORRE J., 1990. Memoria General del Mapa Forestal de España a escala 1:200.000. MAPA-ICONA. Madrid, España, 191 pp.
- RUIZ DE LA TORRE J., 2002. Memoria del Mapa Forestal de España a escala 1:1.000.000. MIMAM. Madrid, España, 554 pp.
- TRAGSATEC, 1999. Manual del Fotointerpretador en Dináforest. Documento interno. Madrid, España, 45 pp.
- VALLEJO R., 2005a. El Mapa Forestal de España escala 1:50.000 (MFE50) como base del tercer Inventario Forestal Nacional. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 19, 205-210.
- VALLEJO R., 2005b. Carta de presentación de la Encuesta sobre el nuevo MFE25. Área de Banco de Datos de la Naturaleza, MIMAM, 15/6/2005.
- VILLA G., AROZARENA A., DEL BOSQUE I., VARCÁRCEL N., GARCÍA C., SOLÍS M.J., 2005. El Plan Nacional de Observación del Territorio en España. XI Congreso Nacional de Teledetección, Puerto de la Cruz, 21-23 de Septiembre. Tomo I, pp. 249-254.
- VINCENT L., SOILLE P., 1991. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13(6), 583-598.
- WOODCOCK C.E., HARWARD V.J., 1992. Nested-hierarchical scene models and image segmentation. *Int Jour Remote Sensing* 13(16), 3167-3187.
- WU J., LOUCKS O.L., 1995. From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: a paradigm shift in ecology. *Quat Rev Biol* 70, 439-466.