

MODELOS DE SIMULACIÓN ESPACIO-TEMPORAL Y TELEDETECCIÓN: EL MÉTODO DE LA SEGMENTACIÓN PARA LA CARTOGRAFÍA CRONOLÓGICA DE USOS DEL SUELO

Paegelow, Martin

Laboratorio GEODE UMR 5602 CNRS

Universidad de Toulouse Le Mirail, Francia.

Tel: +33561503627 – Fax: +33561504275

E-mail: paegelow@univ-tlse2.fr – URL: <http://w3.geode.univ-tlse2.fr>

Camacho Olmedo, María Teresa

Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física

Universidad de Granada

Tel: +34958243639 – Fax: +34958246213

E-mail: camacho@ugr.es – URL: <http://www.ugr.es/local/geofireg>

RESUMEN

El desarrollo de modelos para la simulación de dinámicas ambientales o simulaciones geomáticas, persigue trazar las evoluciones del pasado y actuales, extraer los comportamientos espacio-temporales más característicos y, mediante una base de reglas, prever los cambios futuros o, al menos, construir los escenarios previsibles a corto y medio plazo. Modelizar dinámicas ambientales contribuye a comprender y prever la evolución futura, y la simulación prospectiva proporciona una herramienta de ayuda a la decisión para la gestión ambiental.

Las simulaciones geomáticas se apoyan en bases de datos espacio-temporales (principalmente en cartografías de usos del suelo), en cuyo proceso de elaboración tienen un papel fundamental la Teledetección aérea y de satélite, y todas aquellas herramientas de clasificación tanto analógicas como digitales.

En el marco de varios proyectos de investigación centrados en el análisis y puesta en funcionamiento de modelos de simulación de dinámicas ambientales, se está potenciando la utilización de procedimientos de clasificación recientemente implementados en el SIG IDRISI Taiga para obtener la cartografía cronológica de usos del suelo en la que se apoyan dichos modelos.

En concreto, el método de clasificación por *segmentación* se está aplicando a ortofotografías aéreas, como método alternativo al clásico de fotointerpretación manual. En este trabajo se muestran los resultados de la construcción de una serie cronológica de usos del suelo en los Pirineos Orientales franceses. Una segmentación puramente espectral ha sido aplicada a la BD Ortho del Institut Géographique National (Francia) de 2004 (fotografía aérea digital con tres bandas RGB del visible), y a la fotografía aérea escaneada y posteriormente ortorectificada más antigua (1980, pancromática). Los segmentos sirven a continuación como entidades espaciales a los que se les atribuye la clase dominante extraída de una clasificación supervisada. En el trabajo se explica su puesta en práctica y se discuten los resultados obtenidos. Como principal conclusión, se puede indicar que la automatización del método permite agilizar, en tiempo y trabajo, la etapa de detección de unidades espaciales homogéneas y su asignación de atributos, lo que constituye una eficaz ayuda para la configuración de las bases de datos de series cronológicas.

Palabras Clave: modelos de simulación, segmentación espectral, ortofotografía aérea.

ABSTRACT

The conception of geomatic simulation models applied to environmental dynamics aims to carry out past and present dynamics, to reveal the characteristic spatiotemporal behaviour and, through a rule base, to anticipate future changes, or at least, to build foreseeable scenarios in the short to medium term. Modelling environmental dynamics contributes to understanding and anticipating future developments, forecasting and simulation tools provides a decision support for environmental management.

The geomatic simulations are based on spatiotemporal databases (mainly land use maps). In order to build these databases aerial and satellite remote sensing, but also any other tool providing both, analogue and digital, classification has an inescapable role.

In the framework of several research projects focused on the analysis and the implementation of simulation models applied to environmental dynamics, the usefulness of classification procedures recently implemented in the IDRISI Taiga GIS such as segmentation to obtain chronological land use maps supporting these models has been shown.

In practical terms, the segmentation classification approach is being applied to aerial orthophotographs as an alternative to the classic manual photo interpretation. This paper shows the results of the construction of a time series of land use maps in the Eastern French Pyrenees. A purely spectral segmentation has been applied to the BD Ortho 2004 (Institut Géographique National, France), a digital aerial photography with three visible RGB bands, and to an older one which had to be scanned and subsequently orthorectified (1980, panchromatic). In the next step, the main class drawn from a supervised classification is assigned to the segments. This paper explains the implementation and discusses the results. The principal conclusion is that the automation made by the presented method allows important savings in time and work during the detection stage of homogeneous spatial units and the allocation of attributes. This represents an effective help for configuring series of chronological databases.

Key Words: simulation models, spectral segmentation, aerial photographs

1.- INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación espacio-temporales basados en herramientas geomáticas (en gran medida incluidas en software SIG y Sistemas de Tratamiento de Imágenes), están cobrando un protagonismo cada vez mayor por el interés que conlleva poder modelizar dinámicas ambientales o cambios de usos o coberturas del suelo. Los trabajos a diferentes escalas espaciales, desde la local a la global, se benefician de las posibilidades que brindan estos modelos, tanto para comprender los procesos de los cambios acaecidos (“trends”, “driving forces”), como para poder prever la situación futura o, al menos poder representar los escenarios previsibles a corto y medio plazo, que suponen una herramienta útil de ayuda a la decisión.

Para su aplicación, los modelos se apoyan en datos espaciales en distintos intervalos de tiempo (bases de datos espacio-temporales), principalmente en cartografías de usos o coberturas del suelo, en cuyo proceso de elaboración tiene un papel fundamental la Teledetección aérea y de satélite, tanto por su papel como proveedora de imágenes analógicas o digitales, como por los procedimientos de clasificación desarrollados que permiten una rápida obtención de las series cronológicas necesarias. Ésta es una de las más delicadas y decisivas operaciones para el correcto uso de los modelos y es importante incidir en la complementariedad entre la Teledetección y las herramientas SIG, particularmente en modelización, puesto que los com-

ponentes espaciales están íntimamente ligados a los componentes temporales en dichos modelos, y ambas tecnologías trabajan de forma paralela, ya sea facilitando y actualizando de manera regular las bases de datos espaciales como integrando las mismas para el análisis y la modelización de las dinámicas ambientales a distintas escalas (Chuvieco 2008a, 2008b).

La discusión en torno al concepto de *tiempo* en el ámbito de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIGs) es compleja e inacabada, y las decisiones acerca de la escala temporal y los diferentes pasos temporales son un punto común en la aplicación de muchas de estas técnicas (Coquillard y Hill, 1997; Worboys y Duckham, 2004)

En este sentido, el desarrollo de varios proyectos de investigación¹ cuyo objetivo es la comparación metodológica y temática de algunos de los modelos de simulación más usuales (entre otros DINAMICA <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>, CLUE-s <http://cluemodel.nl/>, CA_MARKOV y LCM, ambos en IDRISI 16.03 Taiga <http://clarklabs.org/>), está planteando, entre otras cuestiones, la necesidad de definir adecuadamente el *factor temporal* en el proceso de aplicación de los mismos. Esto afecta a los tipos de modelos utilizados (estáticos o dinámicos), la definición de las fases de verificación, calibración y validación, el ritmo temporal de la serie cronológica utilizada y la necesidad de contar con fuentes espacio-temporales y procedimientos de clasificación de las mismas que sean ágiles y adecuados.

Como indican Koomen *et al.* (2007), una de las más importantes distinciones en los *modelos de cambios de usos del suelo* es la referida a los modelos estáticos frente a los modelos dinámicos. Los primeros realizan los cálculos a partir de la situación en un solo momento temporal, mientras que los dinámicos trabajan con pasos intermedios, cada uno de los cuales constituye el punto de partida para la siguiente etapa. Los modelos más sofisticados incorporan además variables de tipo dinámico (relacionadas, por ejemplo, con distancias a infraestructuras o a determinados usos del suelo), que permiten incorporar al modelo variaciones temporales en el período de tiempo considerado. Software como DINAMICA, CLUE-s o el módulo Land Change Modeller (LCM) de las últimas versiones de IDRISI, incorporan este tipo de variables. DINAMICA, además, permite incluir el concepto de "Sojourn time", en el que es posible definir un límite máximo de duración para cada una de las categorías de ocupación o uso del suelo (por ejemplo, los diferentes estados de la vegetación en un proceso de reforestación, los cultivos itinerantes en medios tropicales, etc.)

La fase de *calibración* y, como consecuencia, la decisión sobre la escala temporal, es pues esencial para la correcta puesta en marcha de los modelos de simulación. La calibración requiere la definición de un periodo temporal de entrenamiento que incluya una serie cronológica de mapas relativos a la dinámica o dinámicas que vayan a ser modelizadas y el conjunto de las variables explicativas de las mismas. La calibración utiliza un número determinado de fechas sucesivas más antiguas (t-1, t-2, etc.) para simular el estado actual (t0) o, en forma de escenarios, fechas futuras (t+1, t+2, etc.) (modelización prospectiva). En el caso de la modelización retrospectiva, la calibración se basa en fechas actuales hasta fechas pasadas para reconstruir situaciones anteriores a las verificadas en la calibración (Camacho *et al.*,

2007). La mayor parte de los modelos de simulación incluidos en software comerciales o de acceso libre (los citados DINAMICA, CLUE-s, módulos de IDRISI) utilizan dos fechas para modelizar una tercera, basándose, entre otros, en matrices de probabilidades de transición. Esto supone un cierto hándicap puesto que la calibración sólo tiene en cuenta dos momentos temporales. Otros modelos no comerciales (basados, por ejemplo, en redes neuronales² o análisis de regresión³), tienen en cuenta todas las fechas disponibles y explicativas de la dinámica analizada y la calibración trabaja fecha a fecha, en etapas sucesivas, constituyendo la fase de optimización del modelo por aprendizaje.

La *fase de validación*, por su parte, consiste en la comparación (utilizando, entre otros, métodos estadísticos como Índices de Kappa o ROC, Pontius 2002) de los resultados de la simulación y la cartografía real (por ejemplo, del estado actual, t0). La cartografía utilizada en la validación no debe ser conocida por el modelo para poder confirmar la bondad del mismo. No obstante, algunos trabajos utilizan alguna de las simulaciones obtenidas tanto para el proceso de calibración como para la validación (Aguilera *et al.*, 2008) En este caso la calibración es una fase para la configuración del modelo en el que se generan varias simulaciones para la fecha actual y se comparan con la realidad hasta conseguir el mejor resultado.

Respecto a la elección de la *escala o ritmo temporal* de la serie cronológica, esta está condicionada por la propia naturaleza de la dinámica analizada, la disponibilidad de los datos y los requisitos de los modelos y software utilizados. La escala temporal a corto plazo exige la disponibilidad de datos actuales y recientes con un límite temporal de dos a tres años, siendo el objetivo la simulación en tiempo casi real. La mayor parte de las investigaciones (Paegelow y Camacho Olmedo,

1 • *Sistemas de Información Geográfica y modelización de la dinámica paisajística de la montaña mediterránea: Sierra Nevada y Pirineos Orientales franceses*. Proyectos de I+D. MCYT. Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Granada. (1-12-2003 hasta 30-11-2007). BIA2003-01499.

• *Simulaciones geomáticas para modelizar dinámicas ambientales. Avances metodológicos y temáticos*. Proyectos de I+D. MICIIN. Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Granada. Laboratorio GEODE CNRS, Universidad de Toulouse Le Mirail, Toulouse. Instituto de Geografía, UNAM, México. Duración 1-01-2009 hasta 31-12-2011. BIA2008-00681.

• *Modélisations prospectives de l'occupation du sol par approches géomatiques et statistique*. Projet ECOS (Evaluation-orientation de la Coopération Scientifique)-NORD MEXIQUÉ (n° M05A04) : 01/09/2005 - 31/08/2009. Coordinadores: JF Mas (Mexico, UNAM), M. Paegelow (Francia).

2 http://nathalie.vialaneix.free.fr/math/article-normal.php?id_article=49

3 <http://www.lsp.ups-tlse.fr/Ferraty/GEO/>

2008b) no obstante trabaja en la media escala temporal, que oscila entre una y varias décadas, aunque la escala temporal puede llegar en algunos casos a los setenta años (Hersperger y Bürgi, 2007) o a varios siglos (Gonçalves y Dentinho, 2007; Camacho *et al.*, 2007), al incluir en el modelo el análisis de series históricas. Otra cuestión es el tiempo transcurrido entre la última fecha de calibración y la fecha de validación, que suele respetar, en la mayor parte de los casos, el ritmo temporal del período de calibración (corto o medio plazo).

Cualquiera de las opciones expuestas anteriormente exige contar con al menos tres fechas cartografiadas de la dinámica o dinámica que queramos modelizar: dos fechas para la calibración y una fecha como mínimo para la validación. La serie cronológica deberá ampliarse en el caso de que el proceso se reitere para mejorar el funcionamiento del modelo o, como hemos comentado con anterioridad, en el caso de que éste acepte un número mayor de fechas en la fase de calibración.

Esto nos lleva, por una parte, a la necesidad de poder obtener los mapas de ocupación o usos del suelo con facilidad. Para ello diversas fuentes son potencialmente útiles según la escala de trabajo y el grado de detalle de la nomenclatura utilizada. A baja resolución espacial (del orden de 1 Km. a 250 m de lado), un buen número de imágenes de satélite están disponibles gratuitamente (NOAA, MODIS, SPOT Végétation). La situación es diferente en la media resolución (alrededor de 10 – 30 m). Algunas imágenes son ya de acceso gratuito (Landsat TM et ETM), otras tienen un coste bajo (Aster), mientras que ciertas imágenes continúan teniendo un coste muy elevado (SPOT). A esto se añade la dificultad de disponer, para una zona concreta, de una serie diacrónica que satisfaga las exigencias atmosféricas o estacionales necesarias. Por último, es preciso mencionar la disponibilidad de mapas de ocupación del suelo a escala media como los obtenidos en el proyecto CORINE Landcover (Europa, unidad mínima 1 ha) o la cartografía mundial SPOT Vegetación de 300 m de resolución (Forumsig, 2009). Respecto a la alta resolución espacial (alrededor de 1 m), existen desde hace una década imágenes de satélites como Ikonos o Quickbird (relativamente caros) y las clásicas series de fotografías aéreas, en algunos casos ya ortorectificadas.

Pero, sin duda, una de las fases esenciales para la buena consecución de los objetivos propuestos en los modelos de simulación es poder aplicar, de

manera rápida y eficaz, herramientas de clasificación o interpretación de imágenes y fotografías aéreas para configurar las series cronológicas de mapas de ocupación o usos del suelo. En este aspecto se va a centrar el presente trabajo, en concreto en la presentación (a modo de ejemplo) de los resultados del método de clasificación por *segmentación* (implementado en IDRISI 16, versión Taiga), que supone una herramienta digital relativamente nueva que mejora en gran medida los resultados obtenidos tanto por el clásico proceso de fotointerpretación manual como por la aplicación de clasificaciones digitales que no incorporan la segmentación en el algoritmo. En los siguientes apartados se muestra la metodología, resultados y discusión de la aplicación de una segmentación puramente espectral a la ortofotografía de 2004 (fotografía aérea digital con tres bandas RGB del visible), y a la fotografía aérea escaneada y posteriormente ortorectificada de 1980 (pancromática) de una zona de los Pirineos Orientales franceses. Los segmentos sirven a continuación como entidades espaciales a los que se les atribuye la clase dominante extraída de una clasificación supervisada para la construcción de una serie cronológica de usos del suelo.

Resumiendo, los objetivos del trabajo serían los siguientes:

- Mostrar el interés de la modelización geomática espacio-temporal prospectiva.
- Presentar la técnica de la segmentación de imágenes como alternativa a la fotointerpretación manual y a la clasificación por píxel.
- Aplicar el proceso de segmentación espectral con IDRISI 16 (versión Taiga).
- Reflexionar sobre las ventajas e inconvenientes del método de la segmentación aplicada a fotografías aéreas (multiespectral y pancromática) de alta resolución.

2.- METODOLOGÍA

2.1.- Presentación de la Zona de Trabajo

Los Garrotxes (fig. 1), situados en los Pirineos Orientales (Francia), en el extremo Noroeste del Conflent, están formados por cinco municipios y tienen un extensión aproximada de 8570 has. En la vertiente occidental de esta cuenca del Cabrils (curso de agua que vierte hacia el río Têt en Olette), con modelado granítico, se localizan la mayor parte de las antiguas terrazas de cultivo y los bosques de *Pinus uncinata* y *Pinus sylvestris*, constituyendo un espacio de dinámica vegetal muy

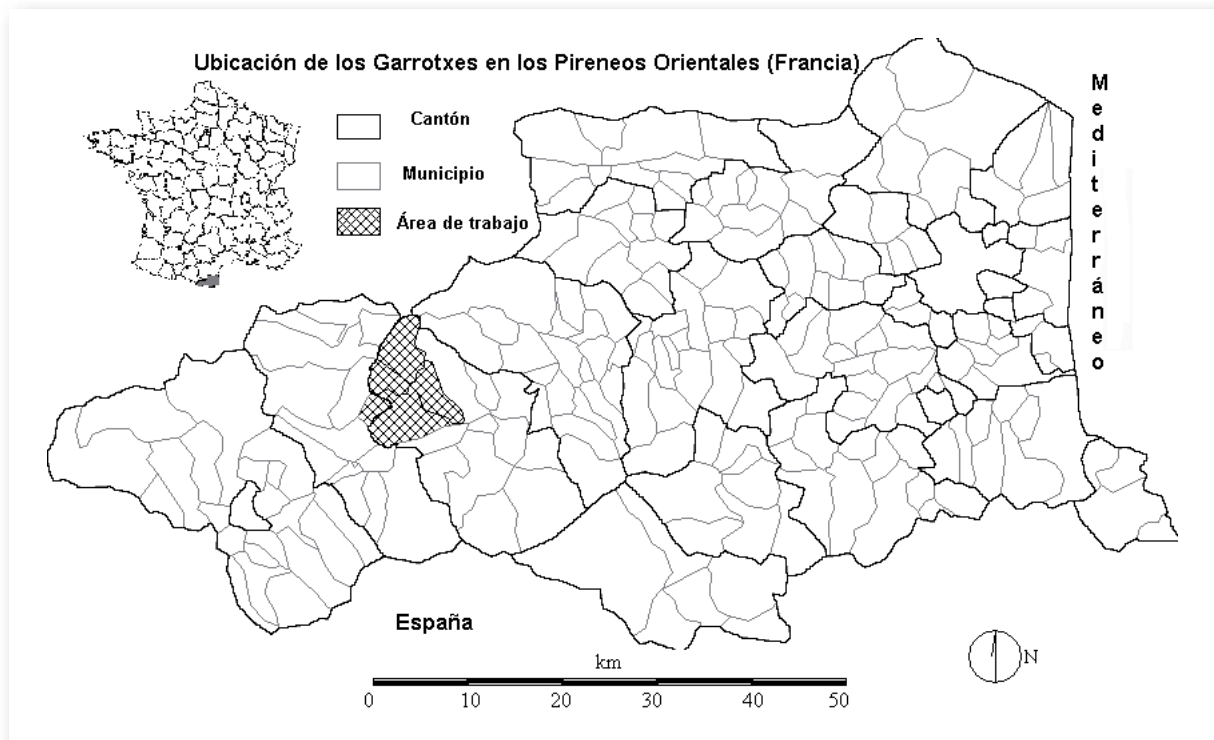


Figura 1.- Localización de Los Garrotxes, Pirineos Orientales, Francia.

rápida. La vertiente oriental es una amplia solana orientada al Suroeste sobre substrato esquistoso con metaformismo de contacto en las zonas más bajas, y cubierta de landas de tipo leñoso (*Genista purgans* y, en menor medida, *Calluna vulgaris*), que conviven en altitudes más bajas con encinares (*Quercus ilex*). El valle del Cabrils muestra una degradación progresiva del clima mediterráneo. Este trabajo se centra en la vertiente izquierda de la cuenca – la solana (fig. 2 y 3) – que forma una gran zona pastoral para ganado ovino y bovino. Tras la extensificación pastoral (menos ganadería, rebaños menos numerosos, « ranching » que consiste en subir el ganado en primavera y recuperarlo a finales del verano), los pastos están desde los años ochenta viéndose transformados por la reforestación espontánea (fig. 4). La acción antrópica se limita a la práctica del fuego dirigido para poder mantener estos espacios abiertos. No obstante, los fuegos dirigidos – iniciados para eliminar la vegetación leñosa en beneficio de las gramíneas – se están reduciendo, dejando paso a la regeneración arbustiva y posteriormente arbórea. Para ilustrar la utilización de la técnica de la segmentación hemos elegido una zona test (fig. 2) de 1 km², situada en el Sureste de la solana (entre 900 y 1300 m de altitud).

2.2.- Fuentes

Se ha utilizado una serie pancromática de fotografías aéreas (formato analógico) de 1980, 1989, 1995 y 2000. A ella se añade la BD Ortho del IGN francés del año 2004 (formato digital, 24 bits, RGB dominio visible, fig. 5). Esta imagen ortorectificada presenta una resolución de 50 cm y ha servido de referencia para escanear y ortorectificar las fotografías aéreas analógicas. La base de datos se completa con un MDT obtenido por digitalización de las curvas de nivel de los mapas topográficos (resolución 2.5 m) e interpolación (RMS de 0.5 m, aunque en ciertos sectores las distorsiones pueden llegar a 2 m).

Como se puede comprobar en la figura 5, la calidad de los documentos es muy irregular, destacando la resolución y el contraste de la serie de 2004. Además, la disponibilidad de 3 bandas del visible en la imagen de 2004 facilita la discriminación de los objetos, tanto por clasificación como por segmentación.

Los tratamientos han sido realizados con el software ERDAS 9.0 (ortorectificación) e IDRISI 16.03 Taiga (segmentación).

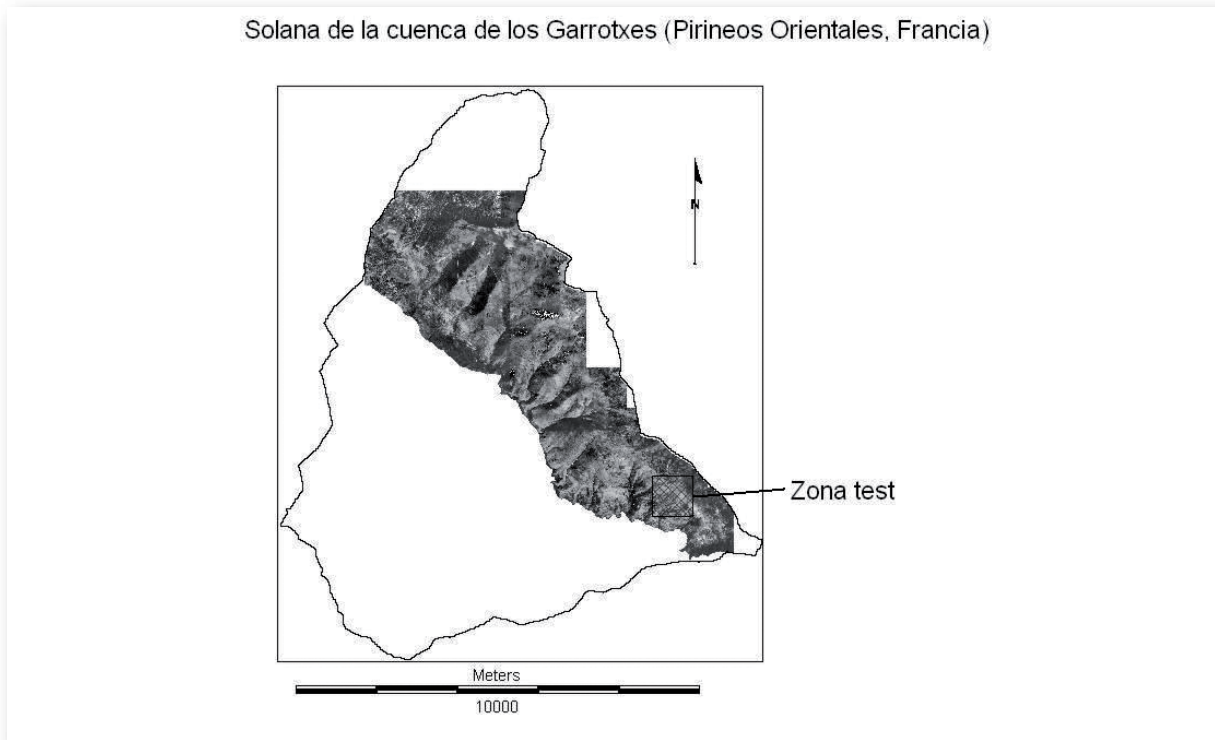


Figura 2.- Solana de la cuenca de los Garrotxes (Pirineos Orientales, Francia) con la ubicación de la zona test de 1 km².



Figura 3.- Vista de la solana de los Garrotxes donde predominan los pastizales y las landas de genistas. La recolonización espontánea es visible en la parte derecha de la fotografía así como en los barrancos.



Figura 4.- Vista de detalle de la solana, con la presencia de *Genista purgans* (en primer plano) y de *Quercus ilex* (en segundo plano y al fondo). Arriba a la izquierda de la fotografía se distingue el valle encajado del Cabrils: sus vertientes de fuerte pendiente están casi enteramente recolonizadas (matorral boscoso a bosque aclarado).

2.3.- Métodos

Existen diferentes métodos para transformar las respuestas radiométricas en categorías de ocupación o usos del suelo: la fotointerpretación, la clasificación digital píxel a píxel (*per píxel classifiers*) y, desde hace aproximadamente una década, el método de la segmentación. Para ser más precisos, la segmentación es una extensión de la clasificación supervisada: con ella se generan grupos de píxeles contiguos relativamente homogéneos (según los parámetros de proximidad espectral y, en algunos programas, de textura/estructura). Su asignación temática se basa –como en la clasificación supervisada– en la elección de parcelas de entrenamiento y la generalización de sus características al conjunto de la imagen.

Respecto a los principales límites de la fotointerpretación manual (digitalización de unidades espaciales y asignación de atributos) son:

- la subjetividad en la delimitación de polígonos (fig. 6), especialmente en el caso de los ecoto-

nos o zonas de transición para una leyenda dada.

- la lentitud de digitalización, especialmente a alta resolución.
- la necesidad de identificar manualmente cada polígono fotointerpretado.
- la subjetividad en la gestión de los límites que cambian o permanecen de una fecha a otra en los estudios multitemporales: una digitalización independiente genera polígonos de error mientras que la modificación de polígonos obtenidos a partir de una fecha para adaptarlos a la situación de la fecha posterior conduce, generalmente, a una actitud relativamente conservadora y costosa en tiempo invertido.

No obstante, las ventajas de este método clásico de fotointerpretación no pueden ser subestimadas: corrección intuitiva de los defectos de superposición de capas temporales y detección de «trampas» de la imagen como las sombras, las condiciones de iluminación y exposición, y la integración de los contrastes y tonos de grises diferentes de un vuelo aéreo a otro.

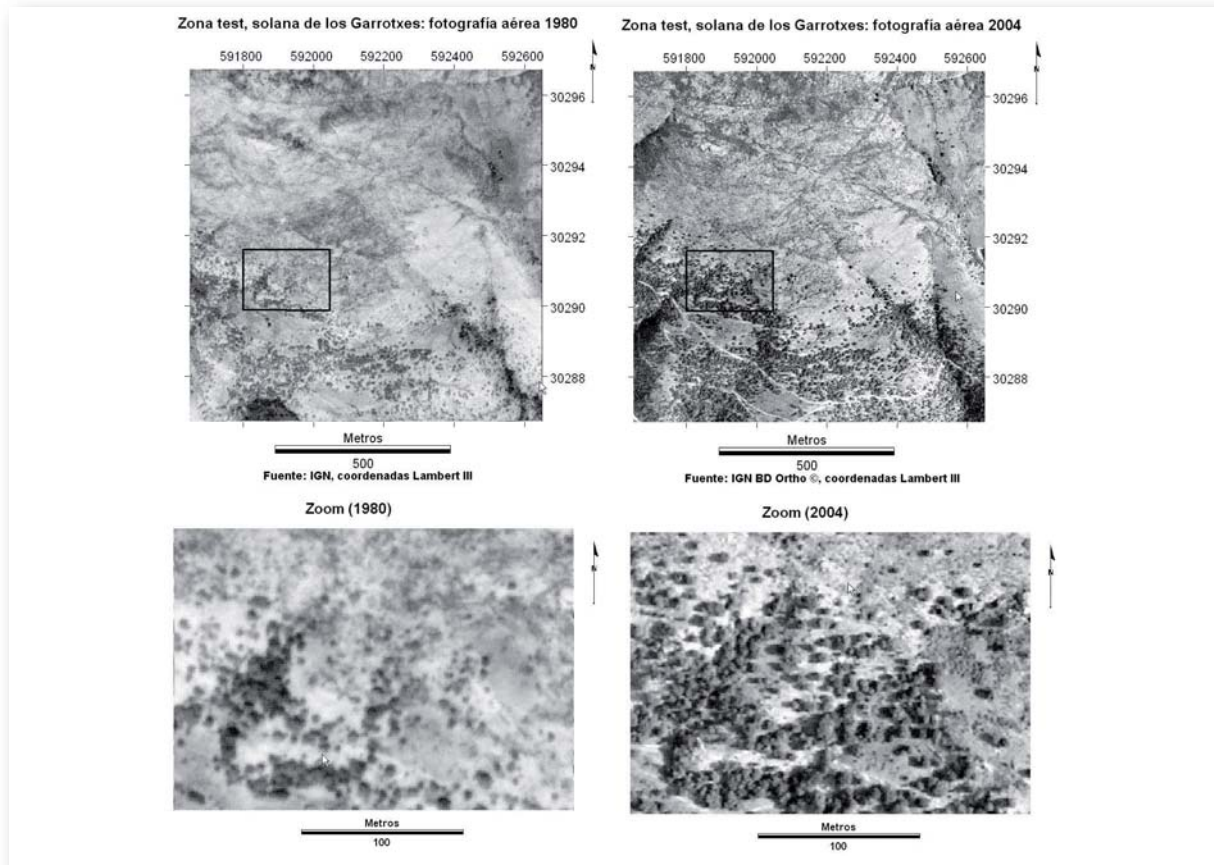


Figura 5.- Zona test en la solana. Arriba: a la izquierda, fotografía aérea de 1980, y a la derecha, ortofotografía de 2004. Abajo: un zoom ilustra la calidad de las imágenes (resolución) y la dinámica de la vegetación. Abajo a la derecha (2004) se observan las sombras de los árboles, que suponen un gran obstáculo en el tratamiento automático de las imágenes, ya sea por segmentación o clasificación. Los trazos de los fuegos dirigidos son particularmente visibles en el sector noreste de la fotografía de 2004 (592400-592600 / 30294- 30296) y en la parte este (592200-592650 / 30289-30293) de ambas fechas.

En contraste, la segmentación permite crear un número muy elevado de unidades espaciales en poco tiempo (fig. 7) y sin un filtro subjetivo de percepción. La vulnerabilidad de este método reside paradójicamente en la exclusión del factor humano, puesto que éste es esencial para mitigar los defectos ya mencionados de la imagen (sombras, variedad de contrastes o tintas para el mismo tipo de uso del suelo...).

Comparada, por otra parte, con la clasificación píxel a píxel, la segmentación permite superar la ardua tarea de delimitar las unidades espaciales, a la vez que se beneficia de las posibilidades que le brindan los algoritmos de clasificación supervisada. Diversos autores vienen planteando desde hace años la necesidad de incluir los operadores de contexto en dichos clasificadores (Ehlers *et al.* 2003).

De hecho, el clasificador ECHO (Extraction and Classification of Homogeneous Objects), se pro-

puso ya en 1975 por Ketting y Landgrebe para incorporar el análisis del contexto espacial en la fase inicial de entrenamiento, pero ha sido en los últimos años cuando se está generalizando su uso ante el interés por clasificaciones más robustas (Chuvieco Salinero, 2008). Se trata de considerar no ya al píxel como unidad previa de análisis, sino al segmento creado a partir de la agrupación de los píxeles por similitud espectral y espacial.

Un paso más es la reciente incorporación, en algunos de los software de mayor uso, del criterio de contexto en el propio algoritmo de clasificación, que está suponiendo un gran avance en los resultados de las clasificaciones temáticas, al realizar la asignación de la categoría no al píxel aislado sino al conjunto de píxeles vecinos que pertenecen al mismo segmento. En concreto, los módulos incorporados en el GIS IDRISI (versión Taïga), clasifican la imagen asignando a cada segmento la clase mayoritaria de la leyenda de referencia. Este

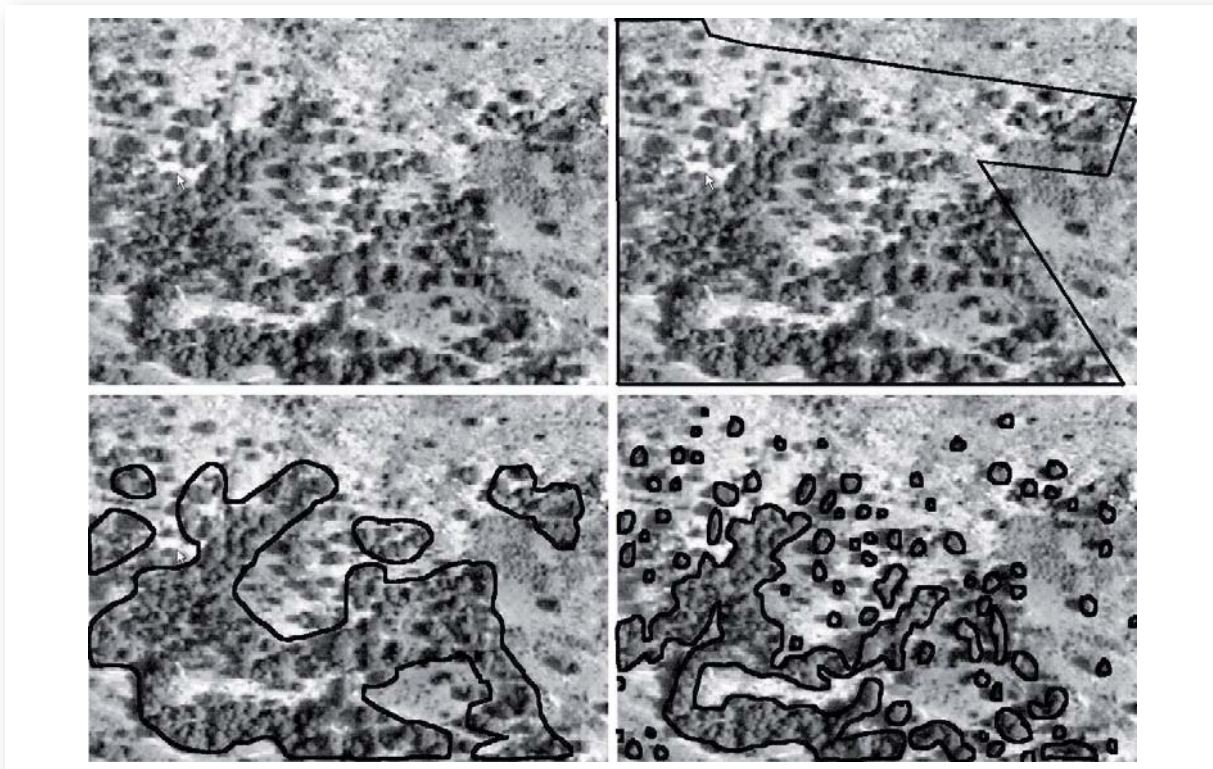


Figura 6.- Zoom de la figura 5, ortofotografía de 2004. Ilustración de distintas posibilidades de fotointerpretación manual de elementos boscosos (todas ellas discutibles).

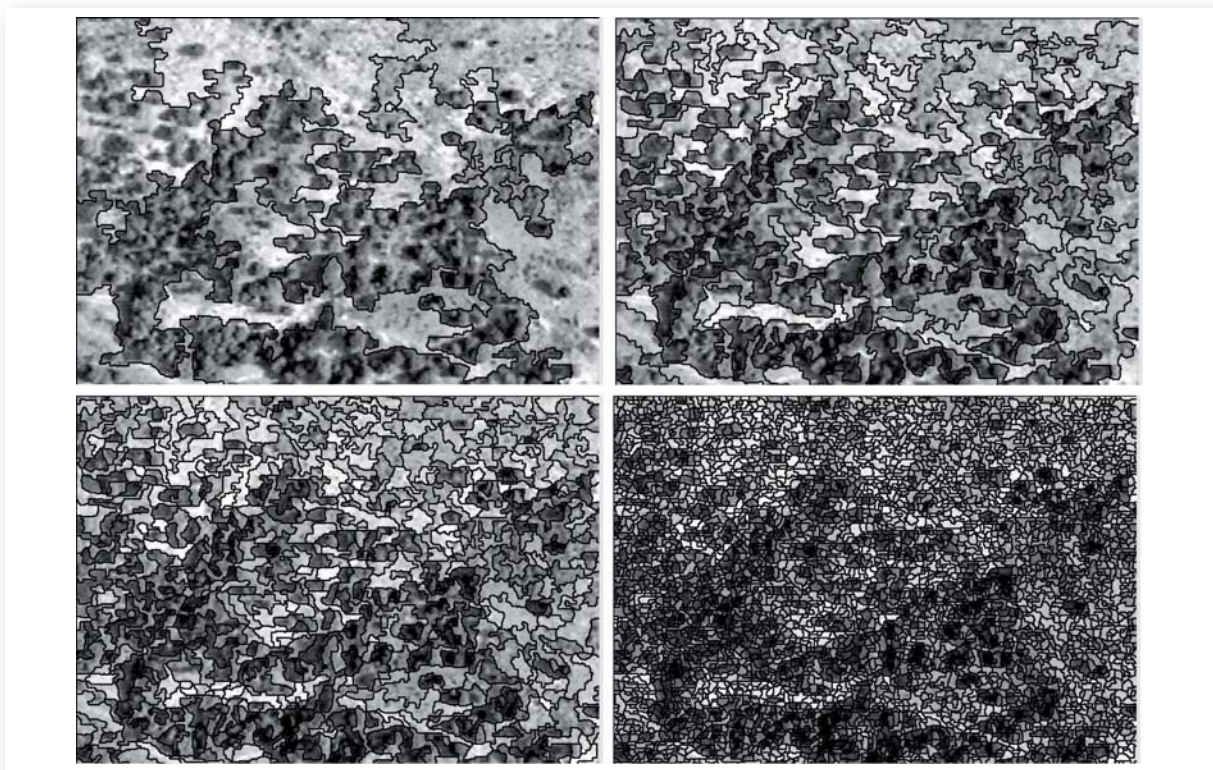


Figura 7.- Resultados de varias segmentaciones con un índice de similitud de 100 (superior izquierda; 5 segmentos), de 50 (superior derecha; 138 segmentos), de 30 (inferior izquierda; 562 segmentos) y de 10 (inferior derecha; 4453 segmentos).

algoritmo de clasificación mejora las clasificaciones basadas en el píxel como unidad y da lugar a una imagen más suavizada que respeta los límites de los segmentos.

2.4.- Aplicación del método

La segmentación de la ortofotografía de 2004 y la fotografía aérea de 1980 ha sido realizada con los módulos SEGMENTATION, SEGTRAIN et SEGCLASS de IDRISI (versión Taiga).

La primera etapa consiste en segmentar la imagen a partir de informaciones espectrales presentes en la imagen. El desarrollo de la función tiene en cuenta:

- a)El peso de cada banda espectral: 3 bandas en 2004 (azul, verde y rojo) – cada una con un peso de 1/3.
- b)El tamaño de la matriz para generar las unidades espaciales homogéneas (segmentos): 3 x 3 píxeles en nuestro caso.

c)Los pesos respectivos de la media y de la varianza espectral calculada: 50% para cada una de ellas.

d)El índice de similitud: éste determina el tamaño de los segmentos y, como consecuencia, su número y la homogeneidad de los mismos. Tras diversos ensayos, hemos optado por un índice de 30 (cf. zoom de la fig. 7).

El algoritmo ha generado un total de 10 035 segmentos en una superficie de 1 km² de la ortofotografía de 2004. Respecto a la fotografía aérea de 1980 (con una sola banda pancromática), hemos aumentado, tras varios ensayos, el índice de similitud a 20 para poder alcanzar un número de segmentos comparable: 11 470.

La segunda etapa (SEGTRAIN) es similar a la seguida para una clasificación supervisada (fig.8): la elección de parcelas de entrenamiento. Con el fin de obtener un mapa de ocupación del suelo de seis categorías (bosque denso, bosque aclarado, matorral boscoso, landa y matorral, pastizal y pastizal ralo), hemos definido, para algunas de

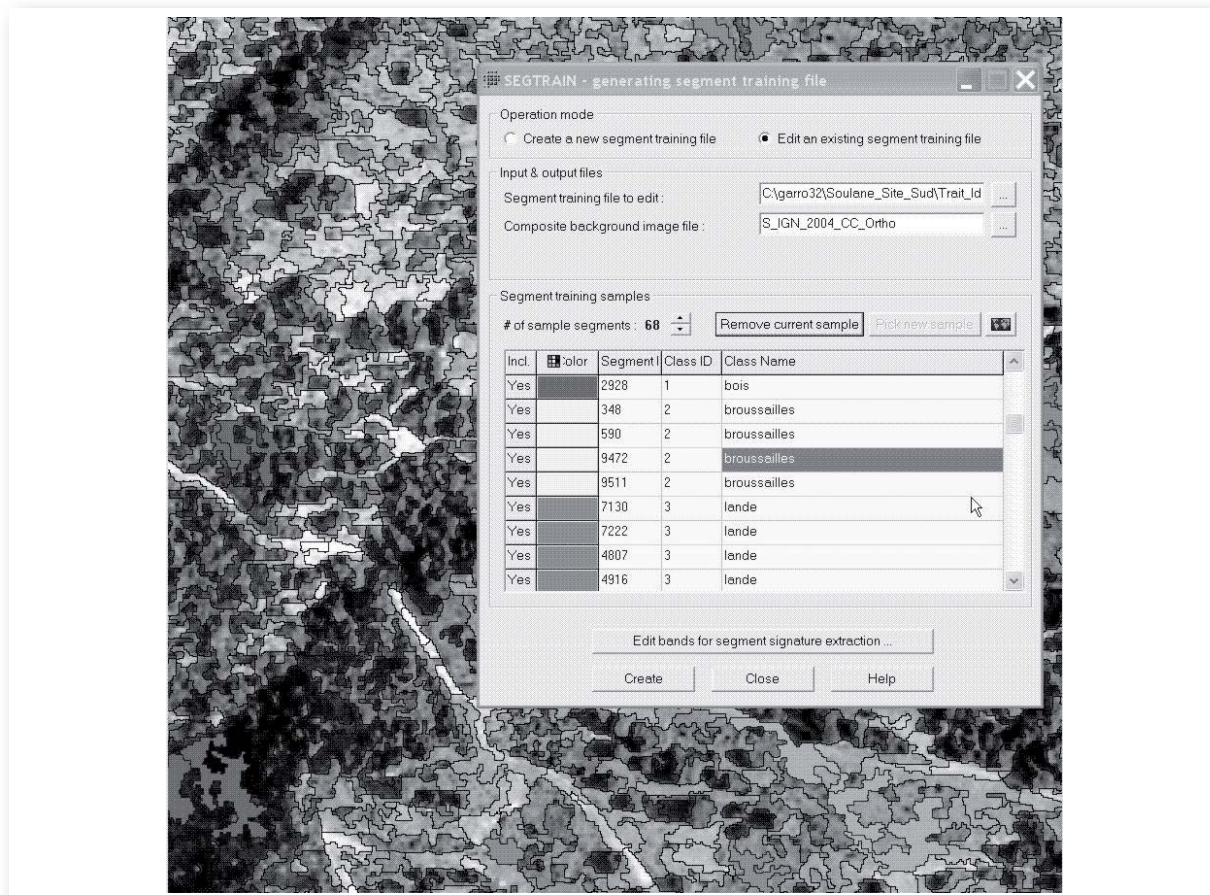


Figura 8.- Selección de las parcelas de entrenamiento con SEGTRAIN.

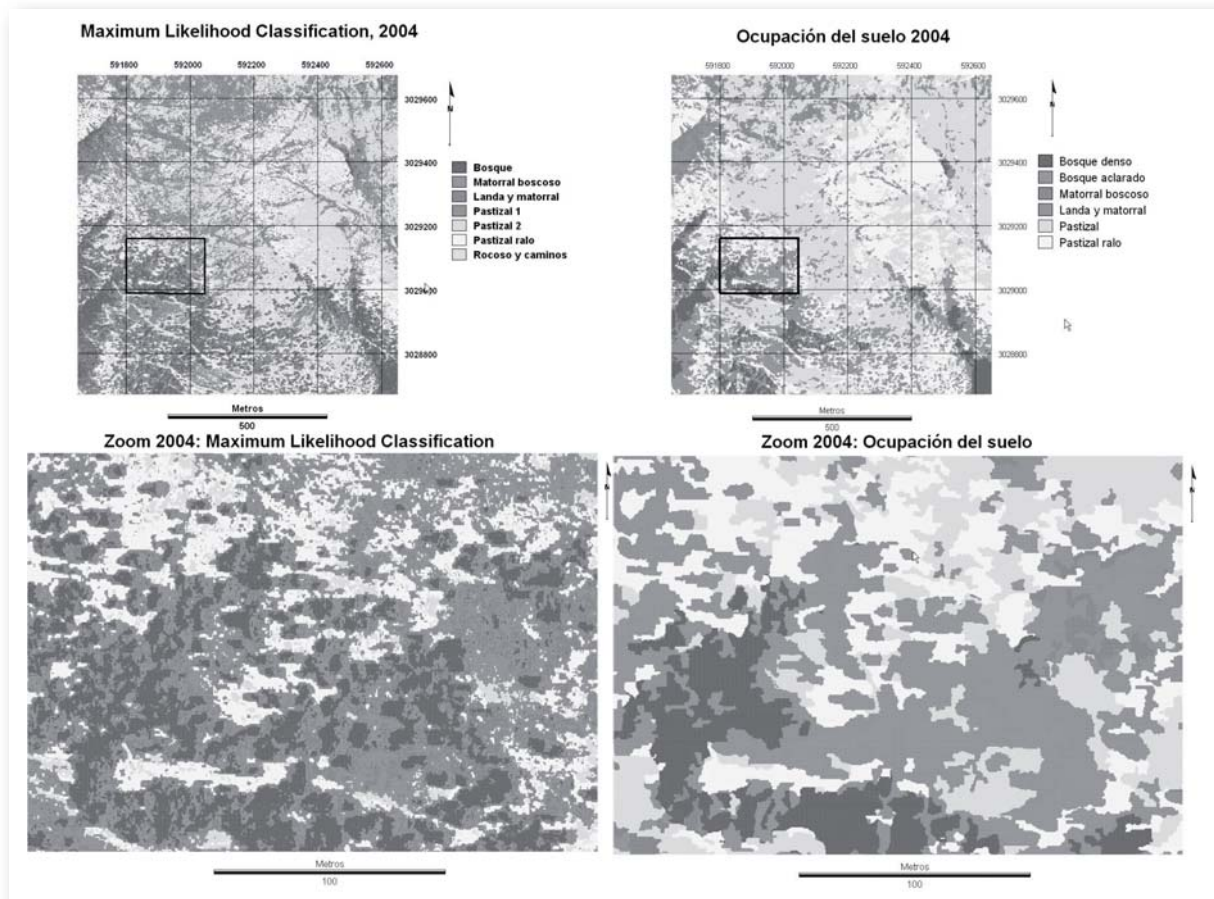


Figura 9.- Zona test en 2004. A la izquierda: clasificación por máxima verosimilitud. A la derecha: mapa de ocupación del suelo tras la asignación de la categoría dominante a los segmentos y corrección manual.

ellas, dos variantes: categoría en solana y en umbría.

El siguiente paso ha consistido en la clasificación supervisada a partir de los perfiles de las parcelas definidas, optando por la clasificación de máxima verosimilitud (fig. 9 izquierda, arriba). Ésta sirve para asignar a continuación la categoría dominante a cada segmento (SEGCLASS). El resultado (fig. 9 derecha, arriba) ha sido corregido, en primer lugar, por un tratamiento por zonas. Este procedimiento consiste en la digitalización de las zonas donde la presencia de una categoría es posible o no (por ejemplo, un límite de altitud) y permite corregir no solo un objeto (segmento) sino también un conjunto de objetos (fig. 10). Por otra parte, ha sido necesaria una reclasificación manual de ciertos segmentos (menos de 0.1 %). Estas correcciones de naturaleza diferente afectan, en nuestro ejemplo, a un 15% de los segmentos.

3.- RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Sobre la zona test de 1 km², el algoritmo ha detectado unos 10 000 segmentos que dan lugar a unas 1 500 entidades espaciales en el mapa de ocupación del suelo de 1980 y a 4 000 entidades en 2004. En la solana completa (fig. 2), el número de segmentos generados – con un índice de similitud reducido a 60 – es equivalente: aproximadamente 10 000 en ambas fechas. Los ensayos de fotointerpretación, por su parte, no superaban las 300 entidades espaciales, lo que nos lleva a una primera conclusión: la fotointerpretación clásica presenta muchas dificultades cuando se trabaja a alta resolución. De hecho, uno de los principales problemas de las imágenes de alta resolución espacial es la presencia del ruido (Schiewe *et al.*, 2001, citado por Chuvieco Salinero, 2008) ligado a condiciones de iluminación o exposición, entre otros, lo que dificulta la obtención de resultados fiables tanto si se aplica la fotointerpretación clásica como si se opta por la clasificación sobre píxeles (*per píxel classifiers*), y lo que convierte en más idónea para este tipo de imágenes la clasifi-

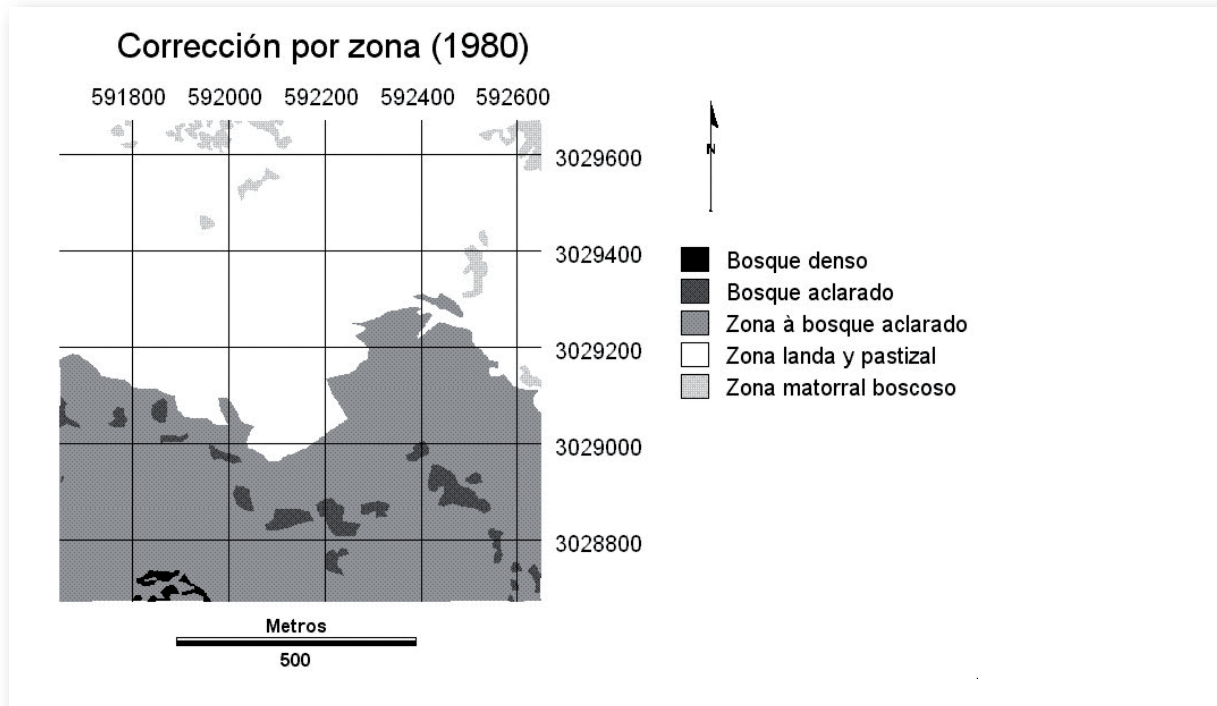


Figura 10.- Ejemplo de corrección por zona sobre la segmentación de 1980, con la presencia potencial de las diferentes categorías de ocupación del suelo (por ejemplo, en negro se delimitan las zonas donde la categoría de bosque denso es posible).

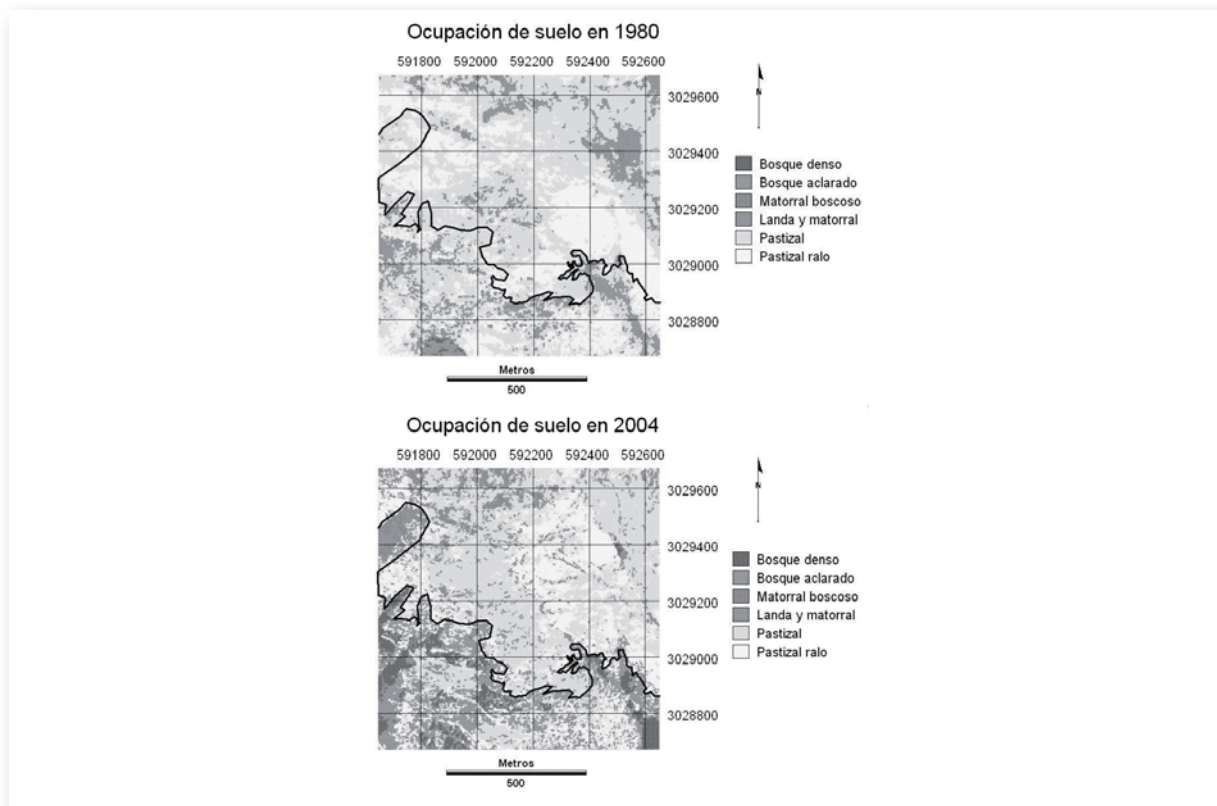


Figura 11.- Ocupación del suelo en 1980 y 2004. El límite en negro separa la zona afectada aún por el fuego dirigido (al norte) de la parte sur (no afectada desde 1980).

		1980						Total 2004	Ganancia
		Bosque denso	Bosque aclarado	Matorral boscoso	Landa y matorral	Pastizal	Pastizal ralo		
2004	Bosque denso	0.07	0.66	0.04	2.15	2.05	0.40	5.36	5.29
	Bosque aclarado	0.04	0.40	0.03	2.74	4.20	2.20	9.61	9.22
	Matorral boscoso	0.00	0.01	0.09	1.15	1.84	0.28	3.38	3.28
	Landa y matorral	0.06	0.18	0.11	2.92	7.98	3.52	14.77	11.86
	Pastizal	0.03	0.12	0.04	4.56	25.20	10.43	40.38	15.18
	Pastizal ralo	0.01	0.08	0.00	1.38	10.97	14.05	26.50	12.45
	Total 1980	0.21	1.45	0.32	14.90	52.25	30.88	100.00	
Pérdida	0.14	1.05	0.23	11.98	27.05	16.83			

Tabla 1.- Matriz de evolución 1980 - 2004 (cifras en % respecto al total). Ganancias y pérdidas de cada categoría desde 1980 a 2004 (cifras en %).

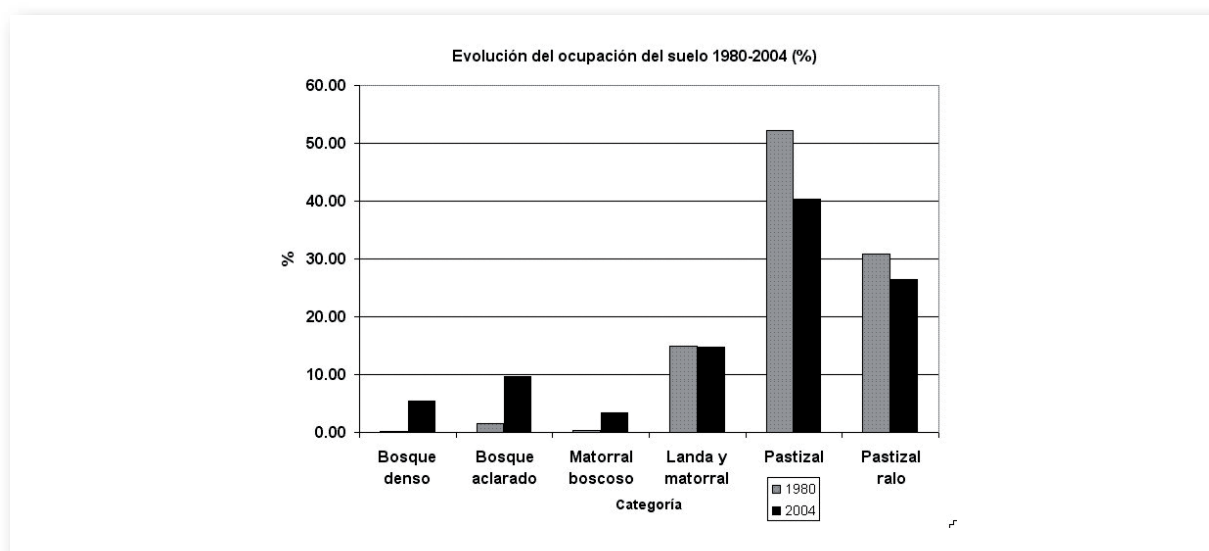


Figura 12.- Evolución (%) de la ocupación del suelo 1980-2004.

cación por segmentos. Sánchez Martín (2003) muestra de forma sintética los problemas de las imágenes de alta resolución para su clasificación y las ventajas de las técnicas mixtas de segmentación espectral y por texturas.

Los mapas de ocupación del suelo definitivos para 1980 y 2004 se muestran en la figura 11. La tabla 1 muestra la evolución (en %) entre 1980 y 2004, y en ella se indican además las ganancias y las pérdidas por categoría (en %) desde una fecha a otra. Se observa que los elementos arborescentes del paisaje (bosque denso y aclarado, pero también matorral boscoso) progresan claramente en superficie (fig. 12), mientras que la extensión de las dos categorías de pastizales disminuye. No obstante, estos resultados hay que interpretarlos con mucha pre-

caución. Un examen pormenorizado de la fig. 11 muestra dos tipos de evolución. En el área sur de la zona test asistimos a un evidente "cierre" del paisaje (las categorías arborescentes ganan terreno). En el área norte (a mayor altitud también), se constatan dinámicas contrastadas: ciertos pastizales se transforman en landas mientras que otras formaciones de landas vuelven a ser pastizales. Un examen de una serie diacrónica más detallada (1980 - 1989 - 1995 - 2000 - 2004) muestra los efectos de los fuegos dirigidos acaecidos de forma reiterada en este período. Esta práctica es ancestral en los Pirineos y sirve para limpiar las landas de tipo leñoso y favorecer así la regeneración de las gramíneas para alimento del ganado.

	%			
	1980 Sur	2004 Sur	1980 Norte	2004 Norte
Bosque denso	0.56	14.34	0.00	0.11
Bosque aclarado	3.93	23.16	0.00	1.69
Matorral boscoso	0.06	2.97	0.47	3.62
Landa y matorral	19.26	20.32	12.34	11.53
Pastizal	46.84	18.67	55.41	53.07
Pastizal ralo	29.35	20.54	31.77	29.98

Tabla 2.- Evolución (%) de la ocupación del suelo 1980-2004 en la parte sur (sin fuego dirigido) y norte (con fuego dirigido).

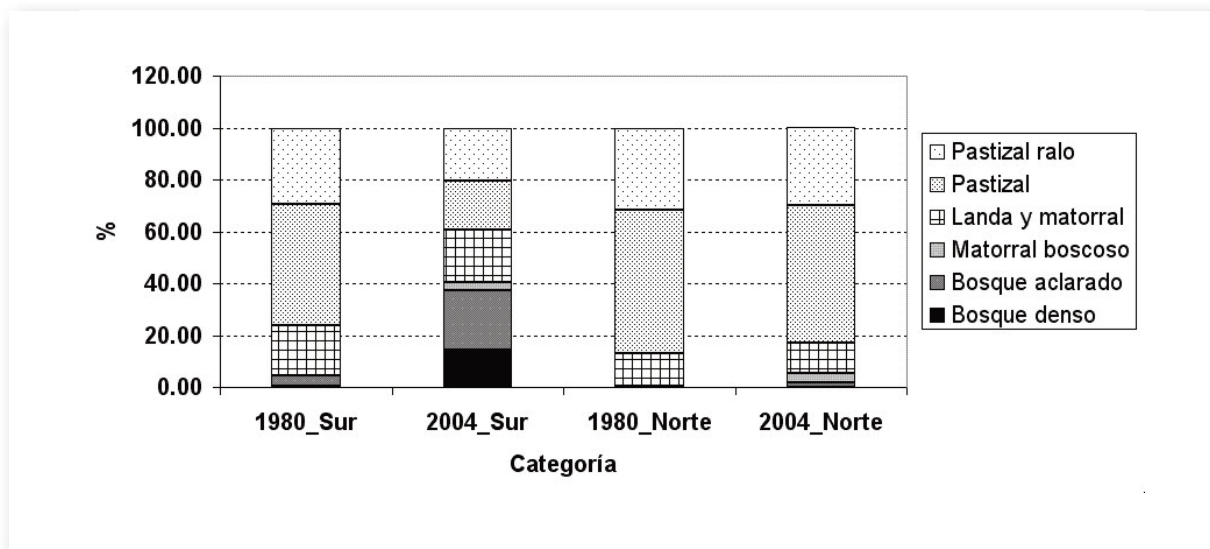


Figura 13.- Evolución (%) de la ocupación del suelo 1980-2004 en la parte sur (sin fuego dirigido) y norte (con fuego dirigido).

En consecuencia, podemos ajustar nuestras conclusiones sobre la evolución de la ocupación del suelo en esta parte de la solana tratando de forma independiente las zonas norte y sur (tabla 2 y figura 13). La parte sur muestra una evolución evidente que tiende al “cierre” del paisaje. Las tres primeras categorías (bosque denso, bosque aclarado y matorral boscoso) han aumentado alrededor de un 37 %, tanto como el espacio perdido por las formaciones herbáceas (landas y pastizales). La parte norte, a mayor altitud y afectada por los fuegos dirigidos, presenta una gran estabilidad (+ 3% para las formaciones arborescentes según la superficie ocupada). No obstante, este balance en la evolución oculta dinámicas cíclicas importantes: los pastizales se regeneran convirtiéndose en landas, a veces en parte ya reforestadas, mientras que en otros lugares los fuegos dirigidos convierten las landas en pastizales. En realidad, se trata de desplazamientos espaciales que varían muy

poco la superficie de las diferentes categorías a medio plazo (alrededor de 24 años – un periodo que corresponde a varios ciclos de fuegos).

4.- CONCLUSIONES

El método de la segmentación es vulnerable a las deformaciones espaciales de cada soporte (correctibles de manera intuitiva por fotointerpretación) y a las condiciones de exposición e iluminación. En el ejemplo presentado, la mayor parte de las correcciones realizadas están relacionadas con la asignación temática de los segmentos.

A pesar de ello, la automatización del método facilita enormemente la etapa de detección de unidades espaciales homogéneas y su asignación de atributos (que es la base de la fotointerpretación), y permite trabajar a muy alta resolución. Conside-

ramos muy favorable además el ahorro en tiempo y trabajo, lo que abre el camino para tratamientos a mayor resolución y facilita la rápida incorporación de nuevos datos que alimentan las bases de datos georreferenciadas y las series cronológicas esenciales para la modelización geomática espacio-temporal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los siguientes proyectos:

- *Simulaciones geomáticas para modelizar dinámicas ambientales. Avances metodológicos y temáticos.* Proyectos de I+D. MICIIN. Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Granada. Laboratorio GEODE CNRS, Universidad de Toulouse Le Mirail, Toulouse. Instituto de Geografía, UNAM, México. Duración 1-01-2009 hasta 31-12-2011. BIA2008-00681. Coordinadora: M.T. Camacho.
- *Modélisations prospectives de l'occupation du sol par approches géomatiques et statistique.* Projet ECOS (Evaluation-orientation de la Coopération Scientifique)-NORD MEXIQUÉ (n° M05A04) 01/09/2005 - 31/08/2009. Coordinadores: JF Mas (Mexico, UNAM), M. Paegelow (Francia).

BIBLIOGRAFÍA

Aguilera *et al.* (2008). Simulating greenhouse growth in urban zoning on the coast of Granada (Spain). *Modelling environmental dynamics. Advances in Geomatic simulations.* (M. Paegelow and M.T. Camacho Olmedo, Eds.). Series Environmental Science. Springer Verlag. Heidelberg: 269-297.

Camacho Olmedo, M.T.; Paegelow, M. y García Martínez, P. (2007). Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluation multicritères et multiobjectifs. *Cybergéo (European Journal of Geography)*. 09-03-2007. Systèmes, modélisation & géostatistiques, N° 365: 24 pp.

Coquillard P. y Hill DRC. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des Modèles déterministes aux simulations à événements discretes.* Paris, Masson.

Chuvieco Salinero E. (2008a). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio.* Barcelona, Ariel Ciencia.

Chuvieco Salinero E. (2008b). *Earth Observation of Global Change. The role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Eastman, J. R. (2009). *IDRISI Taiga, Guide to GIS and Image Processing.* Worcester, Clarklabs.

Ehlers, M.; Gähler, M. y Janowsky, R. (2003). Automated analysis of ultra high resolution remote sensing data for biotope type mapping: new possibilities and challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 57: 315-326.

Forumsig (2009). The First Global Land Cover Map and Data Set <http://www.forumsig.org/showthread.php?t=20882>

Gonçalves y Dentinho (2007). A spatial interaction model for agricultural uses. En *Modelling Land-Use Change. Progress and Applications* (Koomen *et al.* Eds.). The GeoJournal Library 90, Springer: 133-147.

Hersperger A.M. y Bürgi M. (2007). Driving forces of landscape change in the urbanizing Limmat Valley, Switzerland. En *Modelling Land-Use Change. Progress and Applications* (Koomen *et al.* Eds.): 45-61.

Ketting, R.L. y Landgrebe, D.A. (1975). Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects. *Symposium on Machine Classification of Remotely Sensed Data, West Lafayette: 1-11.*

Koomen E. *et al.* (2007). *Modelling Land-Use Change. Progress and Applications.* The GeoJournal Library 90, Springer.

Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M.T. (Eds.) (2008). *Modelling environmental dynamics. Advances in geomatic simulations.* Series Environmental Science. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M.T. (2008). Advances in geomatic simulations for environmental dynamics. En *Modelling environmental dynamics. Advances in Geomatic simulations.* (M. Paegelow and M.T. Camacho Olmedo, Eds.). Series Environmental Science. Springer Verlag. Heidelberg: 3-56.

Pontius RG. Jr. (2002). Statistical methods to partition effects of quantity and location during com-

parison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(10): 1041-1049.

Sánchez Martín, N. (2003). Panorama actual de las técnicas mixtas de clasificación de imágenes mediante segmentación espectral y por texturas. Aplicación a imágenes de alta resolución. *Mapping*, 88: 32-37.

Schiewe, J.; Tufte, L. y Ehlers, M. (2001). Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *GIS*, 06: 34-39.

Worboys MF y Duckham M. (2004). *GIS : A computing Perspective*. Taylor& Francis CRC Press.