

APOYO DE LOS SENSORES ÓPTICOS Y DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA A LA INFORMACIÓN FORESTAL

A. Lobo Areu¹ y S. Saura Martínez de Toda²

¹ Institut de Ciències de la Terra “Jaime Almera” (CSIC). c/Lluís Solé Sabarís s/n. 08028-BARCELONA (España). Correo electrónico: Agustín.Lobo@ija.csic.es

² ETS d'Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida. Av. Rovira Roure 191. 25198-LLEIDA (España).

Resumen

Aunque la teledetección, en su forma pionera de las fotografías aéreas, ha sido siempre utilizada como apoyo en los inventarios forestales, existe un cierto distanciamiento del uso intensivo de las imágenes de satélite, al menos en los países europeos de larga tradición en estos inventarios. En nuestra contribución, enunciamos vías de superación de estos problemas a partir de la presentación de (i) un análisis integrado detallado de datos de inventarios e imágenes de sensores ópticos en un parque natural mediterráneo (Sant Llorenç de Munt i L'Obac, Barcelona), y (ii) nuestro trabajo, en curso, sobre el análisis de las estimaciones realizadas a partir del radar de apertura sintética polarimétrico e interferométrico en la montaña del Corredor (Barcelona).

Palabras clave: *Teledetección, Clasificación, Variables forestales, SAR, Estratificación*

INTRODUCCIÓN

Además del estudio de la distribución geográfica de la vegetación en relación con variables ambientales y del apoyo a la estratificación del plan de muestro de los inventarios, la integración de imágenes de sensores remotos y datos de inventarios tiene, desde nuestro punto de vista, una aplicación fundamental: el paso de distribuciones de parcelas muestreadas (puntos en la superficie geográfica) a campos geográficamente continuos de variables cuantitativas y semicuantitativas. Los párrafos que aquí siguen son una reflexión basada en nuestra experiencia y con esta aplicación como preocupación fundamental. Para ello, nos centramos especialmente en los estudios que llevamos a cabo en el Parque Natural de Sant Llorenç de Munt i L'Obac (LOBO Y PINEDA, 2001)

con imágenes procedentes de sensores ópticos, y en el Parque Natural del Montnegre-Corredor, con imágenes de radar aerotransportado.

IMÁGENES DE SENSORES ÓPTICOS: METODOLOGÍA

En aplicaciones forestales es necesario utilizar imágenes multiespectrales con resoluciones entre 30 y 10 m, dada la extrema fragmentación de nuestros paisajes. Si es posible, es mejor contar, además, con ortofotografía aérea digital.

La calidad de la corrección geométrica es muy importante. Puesto que en la mayor parte de los casos el terreno es muy montañoso, es mejor utilizar procedimientos de ortorectificación o, en todo caso, procedimientos basados en

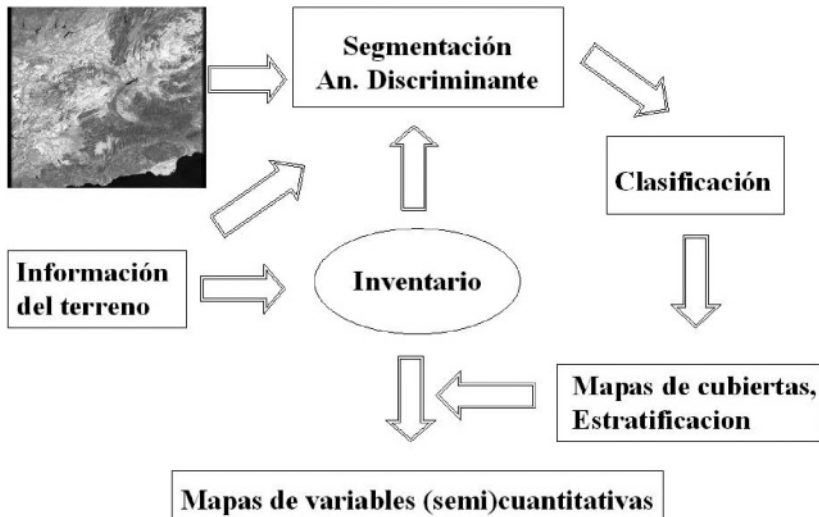


Figura 1. Esquema de la aplicación de imágenes de teledetección de sensores ópticos para la generalización espacial de los datos de inventarios forestales

ajustes empíricos que tengan en cuenta el modelo digital de elevaciones.

Una vez llevadas a cabo estas transformaciones, el procedimiento general está indicado en la figura 1. Este procedimiento consiste en generar un mapa de cubiertas de suelo y, a partir de él, proceder a una estratificación para extender la información de los inventarios. El mapa de cubiertas de suelo debe ser generado teniendo en cuenta la información del terreno, de forma que la información radiométrica de la imagen sea previamente transformada para optimizar su capacidad discriminante en términos de las unidades de vegetación definidas. Del procedimiento general destacamos los siguientes pasos:

Segmentación

Tiene como finalidad incorporar al análisis el concepto de mancha de vegetación, de forma que los individuos del análisis no sean los píxeles sino unidades superiores que conforman zonas homogéneas. Se trata de un proceso paralelo a la “teselación” a menudo efectuada manualmente por los forestales sobre fotografías aéreas. La segmentación reduce la varianza total para la generación del mapa de cubiertas. Ello aumenta significativamente la calidad de la transformación del análisis discriminante, ya que se reduce mucho la varianza “intra-clases”.

Además, al reducir el número total de individuos (hay muchos menos segmentos que píxeles), es posible utilizar métodos más complejos. La figura 2 muestra un detalle de una segmentación. En nuestro caso, hemos utilizado el algoritmo IMORM (LOBO, 1997). Puesto que la segmentación implica definir un área mínima detectable, es mejor llevarla a cabo en imágenes de resolución mayor a las multispectrales.

Análisis discriminante

Este análisis genera una transformación lineal del espacio multi-espectral original en ejes discriminantes, de forma que se optimiza la relación entre la varianza interior a las clases y la varianza entre clases distintas (RICHARDS & JIA, 1999). Para ello es necesario un trabajo interactivo en el cual se delimitan zonas de entrenamiento en la imagen que son (o han sido) inventariadas en el terreno. Cada lugar visitado debe ser atribuido a un tipo de cubierta según la información del inventario y de acuerdo a una tipología. Esta tipología puede existir ya de forma previa para la zona o bien ser inferida a partir de un análisis de correspondencias, como se hizo en el caso del parque natural de Sant Llorenç de Munt i L’Obac (Barcelona). Es un paso importante, puesto que es necesario asegurar que la clasificación resultante deja en clases diferentes aque-

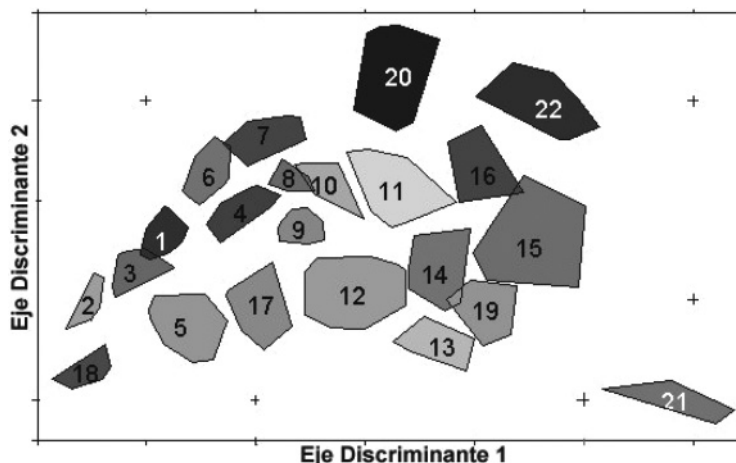


Figura 3. Disposición de las envolturas convexas (“convex hulls”) de las áreas de entrenamiento de una clasificación forestal en el plano de los dos primeros ejes discriminantes

llas unidades que, de acuerdo con su inventario, también son diferentes. Una vez obtenido un conjunto de zonas tipo para cada clase, se extraen de la imagen los valores multi-espectrales correspondientes y se ordenan en una tabla multivariante. La tabla multivariante incorpora, para cada lugar estudiado en el campo, su código, el código de la clase a la que ha sido atribuido según su inventario, y los valores radiométricos que le corresponden en la imagen. A partir de esta tabla multivariante se genera la transformación y se representan las zonas visitadas en el plano de los dos primeros ejes discriminantes. La inspección de este gráfico suele indicar una ordenación general interpretable ecológicamente pero en la que se observan contradicciones que es necesario explicar y, en su caso, eliminar del conjunto para generar una nueva transformación. En otras ocasiones el gráfico sugiere la necesidad de realizar nuevos muestreos. Por tanto, suele ser necesario llevar a cabo varias iteraciones, puesto que al modificar el conjunto de zonas tipo se modifican los ejes discriminantes.

Clasificación

En este paso se procede a atribuir cada segmento o tesela a una de las clases previamente definidas, en función de las características espectrales aplicando la transformación discriminante. Es conveniente utilizar un método estadístico que respete la geometría de las clases en el espa-

cio definido por los ejes discriminantes, lo que no ocurre en los métodos más tradicionales: si se utiliza como regla la distancia euclídea al centroide más próximo, se supone implícitamente que las clases son esferas de igual radio. En el otro extremo, es posible utilizar un método totalmente no paramétrico definiendo las envolturas convexas (“convex hulls”) de las proyecciones de los modelos en espacio discriminante y atribuyendo a una clase determinada todos aquellos segmentos de la imagen cuyos valores en los ejes discriminantes se ubican en el interior de la envoltura convexa correspondiente (Figura 3).

La atribución del interior de cada envoltura convexa es muy restrictiva y un notable porcentaje del área total puede quedar sin atribuir a ninguna clase. La inspección del gráfico y de la imagen clasificada así como subsiguientes visitas al terreno pueden sugerir la definición de alguna nueva clase no considerada inicialmente, lo que implica volver a la etapa del análisis discriminante. Sin embargo, con frecuencia no es éste el problema principal, sino el que una gran parte del paisaje no se corresponde exclusivamente con ninguno de los modelos definidos por las envolturas convexas sino que son situaciones intermedias. Para atribuir estos casos, es necesario adoptar una aproximación probabilística y analizar la frecuencia de la distancia en el espacio discriminante de un segmento de la imagen al centroide de su clase más próxima. En todos los

casos del ejemplo, se produce una fuerte inflexión entorno al 90%. Por ello, es posible determinar la distancia que corresponde al percentil 90 en cada clase como un umbral específico y utilizar la regla general de asignar un segmento a la clase cuyo centroide es más próximo siempre y cuando la distancia sea inferior al umbral de la clase. Los casos en que la distancia al centroide excede el umbral quedan como inclasificables dado el conjunto de modelos establecido.

Generalización espacial de los inventarios

Una vez obtenido el mapa de cubiertas mediante un método que asegura la correspondencia entre la clasificación y la información de los inventarios, es posible utilizar este mapa como una estratificación y proceder a calcular los valores medios de las variables seleccionadas de los inventarios. En la Figura 4 mostramos algunos resultados en términos de composición específica de árboles en el área mencionada.

Un segundo método, que aplicamos en estos momentos, es interpolar cada variable seleccionada por medio de una ponderación a los k-vecinos más próximos en el espacio discriminante previamente definido. Hasta ahora, en cambio,

no hemos obtenido buenos resultados con los métodos basados en análisis factorial, en los que se intenta generar relaciones predictivas entre las variables de los inventarios y la información radiométrica de las imágenes. Ello es probablemente debido a que la fragmentación de nuestros paisajes implica un gran número de discontinuidades y no-linearidades entre ambos conjuntos de datos. Es posible, por tanto, que los métodos multivariantes capaces de tratar con respuestas no-lineales sean también un camino adecuado (MOISEN, EDWARDS & VAN HOOSER, 1998). Para los métodos basados en kriging referimos al lector a los capítulos especialmente dedicados en este mismo volumen.

IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

La teledetección convencional basada en sensores ópticos proporciona una gran cantidad de información sobre la superficie de la biosfera, pero muy poca sobre su estructura vertical. Por tanto, las propiedades esencialmente relacionadas con la superficie pueden ser razonable-

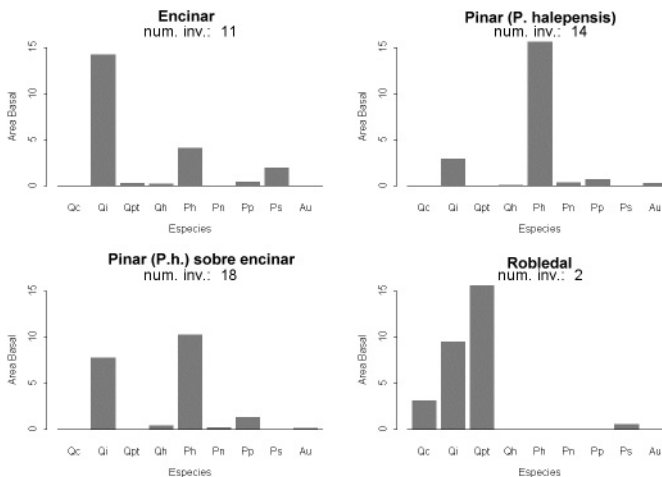


Figura 4. Diagramas de barras (área basal total) de la composición específica de cada una de las clases según los datos de los inventarios forestales que quedan incluidos en ellas. Qc, *Quercus cerritoides*; Qi, *Q. ilex*; Qpt, *Q. petraea*; Qh, *Q. humilis*; Ph, *Pinus halepensis*; Pn, *P. nigra*; Pp, *P. pinea*; Ps, *P. sylvestris*; Au, *Arbutus unedo*

mente estimadas a partir de imágenes captadas por sensores ópticos. Entre estas propiedades destacan, con las limitaciones impuestas por las características espectrales y espaciales del sensor, la identificación del tipo de cubierta, la capacidad de intercepción de la luz para la fotosíntesis y, si se dispone de un sensor hiperespectral de alta resolución, ciertas características relacionadas con el estado fisiológico de las hojas. Sin embargo, las imágenes captadas por sensores ópticos, no contienen información suficiente como para estimar, de forma general, aquellas variables que como la altura del dosel o la biomasa dependen de la estructura vertical.

En líneas generales, la penetración de la radiación aumenta con la longitud de onda y cuando se llega a las microondas L (20 – 76.9 cm) la señal llega hasta el suelo del bosque. La banda C (entorno a los 6 cm) penetra en la copa mientras que la X (entorno a los 3 cm) es retrodispersada por las hojas superiores del dosel. Esta característica hace que las imágenes de radar sean muy interesantes para estudiar propiedades relacionadas con la estructura vertical del bosque. Otra característica positiva del radar es su relativa independencia de la situación meteorológica y, que, al ser un sistema activo que emite su propia señal, aporta un conjunto de datos más controlado. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que la señal requiere un procesado más complejo que la de los sistemas ópticos puesto que están más influidas por la topografía y la humedad del suelo, sin olvidar que se trata de un tipo de información muy distinta a la que los humanos utilizamos, lo que hace su interpretación más compleja.

Radar de Apertura Sintética Interferométrico y Polarimétrico

Mientras que en el radar convencional la resolución espectral es función del tamaño de la antena, lo que impedía el desarrollo de sistemas realmente operacionales, el SAR permite alta resolución con tamaños de antena moderados. Las primeras aplicaciones de las imágenes SAR utilizaron métodos empíricos para relacionar propiedades de superficie con la señal una vez procesada para compensar las distorsiones topográficas. Estos métodos utilizan no sólo los valores medios de la retrodispersión sino tam-

bién variables relacionadas con la estadística espacial local y, con frecuencia, el análisis integrado con imágenes de sensores ópticos.

El SAR interferométrico, que utiliza no sólo el módulo sino también las diferencias de fase entre la señal de dos imágenes captadas con ángulos distintos, constituyó un avance muy importante ya que supuso derivar directamente de la señal una variable cuantitativa de la escena: la altura. Con esta técnica se han desarrollado numerosos modelos de elevación del terreno (RABUS *et al.*, 2003).

El SAR interferométrico y polarimétrico (PolInSAR) utiliza, además, la información proveniente del hecho de que la retrodispersión es una onda electromagnética que tiene un ángulo preferente de polarización dependiendo de las características de la superficie. Utilizando filtros de polarización tanto en la emisión como en la recepción de la señal, es posible estudiar ésta en cuatro configuraciones angulares para cada punto de la superficie: HH, VV, HV y VH. El PolInSAR utiliza, pues, una información muy rica, pues para cada punto de la superficie dispone de información no sólo del módulo de la retrodispersión, sino también de su fase y de sus características angulares. Con esta información es posible basar el procesado en modelos físicos que predicen la retrodispersión en función de una serie de parámetros de la superficie que pueden ser medidos en el terreno. Algunos modelos relativamente simples pueden ser invertidos, lo que permite estimar los parámetros de la superficie a partir de las medidas del radar.

Utilizando uno de estos modelos, la agencia aeroespacial de Alemania (DLR) obtiene buenos resultados para estimar la altura del dosel arbolado tanto en bosques de coníferas como en planifolios (PAPATHANASSIOU *et al.*, 2001.2002). Mediante ecuaciones alométricas, es posible inferir la biomasa. En colaboración con el mencionado DLR, evaluamos en estos momentos la adecuación de esta aproximación en el bosque mediterráneo del Corredor (Barcelona).

CONCLUSIÓN: ALGUNAS RECOMENDACIONES

Para que las imágenes de los sensores remotos y los inventarios forestales y de vegetación

se integren eficientemente para producir un sistema de información, proponemos tener en cuenta las siguientes recomendaciones tanto desde el punto de vista de las imágenes como de la información del terreno:

- Las características geométricas de las imágenes deben estar en consonancia con la extrema fragmentación y heterogeneidad de nuestros paisajes. Ello implica:
- Integrar imágenes multiespectrales con un tamaño de pixel entorno a los 20 m y ortofotografías digitales.
- Procesado geométrico cuidadoso, teniendo en cuenta el relieve.
- Precisión en la ubicación en el terreno de las parcelas a inventariar, tratando de evitar parcelas en zonas muy heterogéneas.
- Es necesario utilizar imágenes multiespectrales con una banda en el infrarrojo medio.
- Evitar en lo posible parcelas que incluyan elementos rocosos o de suelo desnudo que distorsionen la reflectancia del pixel correspondiente. En todo caso, si tales parcelas deben ser incluidas en el inventario por otras razones, el inventario debe informar de la presencia, tipo y extensión de estos elementos.
- Desarrollar un método que identifique y etiquete como "no utilizables" aquellos píxeles con elementos excepcionales que distorsionen la reflectancia de la vegetación (afloramientos rocosos, caminos, suelos desnudos...).
- Puesto que el matorral es casi siempre substancial al paisaje ibérico y las imágenes responden al conjunto de la superficie, los inventarios deben incluir información no sólo de los árboles sino del conjunto de la vegetación.
- Utilizar métodos de segmentación, si es posible sobre imágenes de mayor resolución que las que después definirán espectralmente los segmentos.
- Aplicar transformaciones al espacio multiespectral dictadas por la información del terreno y utilizar métodos de clasificación que tengan en cuenta la geometría de las clases en el espacio discriminante.
- Aplicar métodos de generalización espacial subordinados a la clasificación generada.

Agradecimientos

Los estudios a los que hemos referencia han sido subvencionados en parte por el Servei de Parcs Naturals de la Diputació de Barcelona. Agradecemos en particular la ayuda de Daniel Guinart. La campaña de radar aerotransportado en el Corredor ha sido subvencionada por el DLR, el Departament d'Universitats, Recerca i Societat de l'Informació de la Generalitat de Catalunya y la Dirección General de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- LOBO, A.; 1997. Image segmentation and discriminant analysis for the identification of land cover units in Ecology. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 35(5): 1-11.
- LOBO, A. & PINEDA, N.; 2001. La informació de les imatges de sensors remots en l'estudi del medi natural: experiències al Parc Natural de Sant Llorenç del Munt o L'Obac. *Monografies de la Diputació de Barcelona* 35: 69-74.
- MOISEN, G.G., EDWARDS, T.C., & VAN HOOSER, D.; 1998. Merging regional forest inventory data with satellite-based information through nonlinear regression methods. *In: Proceedings of Fusion of Earth Data*. Sophia Antipolis. France.
- PAPATHANASSIOU K.P. & CLOUDE, S.R.; 2001. Single Baseline Polarimetric SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* GRS-39/11: 2352-2363.
- PAPATHANASSIOU, K.P., HAJNSEK, I., METTE, T. & CLOUD, S.R.; 2002. Model based forest height estimation for forest biomass estimation *En: J. Sobrino (ed.) Proceedings of Recent advances in quantitative remote sensing*. Universitat de Valencia. Valencia.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A., & BAMLER, R.; 2003. The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, *Photogrammetry Rem. Sens.* 241-262.
- RICHARDS, J.A. & JIA, X.; 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin.

APOYO DE LOS SENSORES ÓPTICOS Y DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA A LA INFORMACIÓN FORESTAL

A. Lobo Areu y S. Saura Martínez de Toda

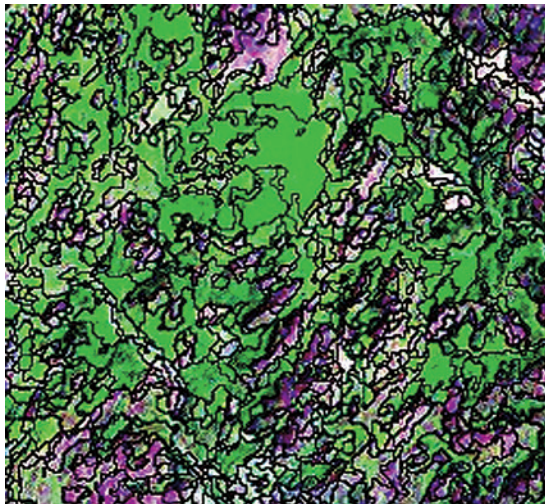


Figura 2. Ejemplo de imagen segmentada mediante IMORM