

UNA REVISION SOBRE LAS APLICACIONES FORESTALES DE LAS IMAGENES DE RADAR Y SU INTEGRACION CON IMAGENES EN EL DOMINIO VISIBLE-INFRARROJO

J. L. SALETA BORDERAS

J. M. CUEVAS GOZALO

F. GONZALEZ ALONSO

Sección de Teledetección Agraria. INIA

Apto. 8111, 28080 Madrid (España)

RESUMEN

Se presentan y discuten las aplicaciones forestales de las imágenes de radar, haciendo una revisión de las investigaciones realizadas hasta el presente. Se presta especial atención al uso combinado de las imágenes de radar y de las imágenes captadas en el dominio visible-infrarrojo que ha demostrado el carácter complementario de ambos tipos de información.

PALABRAS CLAVE: Imágenes de radar
Imágenes en el dominio infrarrojo-visible
Aplicaciones forestales

INTRODUCCION

El reciente lanzamiento del satélite europeo ERS-1, y en un futuro próximo de otros satélites con sensores de radar de apertura sintética, va a proporcionar de forma regular imágenes que pueden ser utilizadas conjuntamente con otras imágenes captadas en los espectros visible e infrarrojo y que ya están disponibles desde hace tiempo, tales como Landsat MSS, Landsat TM o SPOT. La diferencia en el tipo de información recogida en unas y otras imágenes sugiere que pueda obtenerse provecho de su combinación.

El mundo forestal puede hacer uso de ese sinergismo de distintas formas. Paris, Kwong (1988) obtuvieron estimaciones cuantitativas de la fracción de cubierta cubierta, el índice de área foliar y la biomasa de madera por unidad de superficie a partir de imágenes Landsat TM y SIR-B. Leckie (1990) utilizó las bandas X y C del radar con polarizaciones horizontal y vertical combinadas con ocho bandas obtenidas por un sensor MSS aereotransportado para discriminar tipos de bosque. Ulaby *et al.*, (1982) concluyeron que el radar, usado junto con sensores ópticos puede mejorar los índices de clasificación de cosechas, por responder a propiedades geométricas y dieléctricas de la vegetación de forma diferente a los sensores

Recibido: 28-1-93

Aceptado para su publicación: 30-11-93

ópticos, pudiendo servir incluso como sustituto de éstos en condiciones de nubosidad persistente, dada su capacidad para obtener imágenes en cualquier condición atmosférica.

Para sacar el máximo partido a esta integración, es importante conocer qué imágenes están disponibles y elegir aquéllas que puedan proporcionar la información deseada. Una vez elegidas, como paso previo a la fusión de las imágenes es necesario registrarlas entre ellas.

IMAGENES EN EL DOMINIO VISIBLE-INFRRARROJO

En las dos últimas décadas se han utilizado las imágenes en el espectro visible e infrarrojo para proporcionar información sobre el tipo de cubierta así como índices de biomasa y productividad. Se han definido diversos índices de vegetación a partir del análisis de imágenes Landsat MSS y TM para predecir características de la cubierta arbórea tales como biomasa, productividad, área foliar y fracción de cabida cubierta (Jensen, 1986).

El índice de área foliar (LAI) ha sido mencionado por Botkin *et al.*, (1984) como fundamental en el estudio de la biomasa y productividad vegetal a partir de imágenes de satélite. Las principales limitaciones en la utilización del índice de área foliar son la obtención de suficientes datos de campo para verificar la relación entre el área foliar de la cubierta y las imágenes, y la extensión en la aplicación de técnicas de teledetección a valores del índice de área foliar superiores a siete.

Ahern *et al.*, (1991) han encontrado una relación significativa entre el volumen total medio y la variación neta anual de volumen de madera en rodales de *Picea* y abeto y la reflectancia en imágenes de infrarrojo medio y cercano, siendo ésta un mejor indicador del volumen de madera viva que solamente la edad, si bien ambos datos juntos podían mejorar la estimación.

Varios estudios han demostrado la excepcional fidelidad geométrica de las imágenes Landsat TM, (Welch *et al.*, 1985, 1988; Borgeson *et al.*, 1985), precisando de una rectificación muy pequeña y, por tanto, suministrando una excelente base con la que combinar otras fuentes de información. Las imágenes SPOT-1 también pueden ser de gran utilidad en estudios de menor escala, dada su alta resolución espacial y buena integridad geométrica (Welch *et al.*, 1987).

IMAGENES DE RADAR

Las campañas Seasat, SIR-A y SIR-B, así como un gran número de imágenes tomadas por sistemas de radar aereotransportados, han demostrado que los sensores de radar de apertura sintética pueden generar imágenes útiles de zonas muy extensas e inaccesibles (Welch *et al.*, 1988), pero también tienen algunas limitaciones, como las distorsiones geométricas, el ruido en la señal, y el reducido número de niveles de gris efectivos disponible. La primera limitación restringe las áreas de estudio a las zonas de terreno llano, y reduce la corrección geométrica de la imagen. El ruido en la señal depende del sistema, y hace necesario el filtrado de la imagen. Estas variaciones, producidas por el propio funcionamiento del sistema, y no por el auténtico coeficiente de retrodispersión, se pueden evitar en parte si se

utilizan valores medios de áreas homogéneas, en vez de los valores de píxeles individuales (Ulaby *et al.*, 1982). El uso de filtros de mediana es el método más corriente de reducir el efecto de moteado (Leckie, 1990), aunque se debe buscar una solución de compromiso entre reducción del moteado y retención del nivel de detalle.

Se han utilizado sistemas de radar con distintas bandas y polarizaciones. La forma de la copa, tamaño de las hojas, masa foliar por unidad de volumen y clase de edad han sido relacionadas con variaciones en la retrodispersión de la banda X, con transmisión y recepción horizontal (HH) (Hoekman, 1985), mientras la radiación en la banda L con polarización HH se ha relacionado con la retrodispersión proveniente de ramas, pues las microondas de esa banda son capaces de penetrar a través de las hojas. Paris (1985), a partir de experimentos con escaterómetro de banda C, observó una respuesta dominante de la polarización VV (emisión y recepción vertical) de las zonas de la cubierta próximas a la copa, y mayor respuesta de polarización HH junto a la base. Los valores altos de la radiación con polarizaciones cruzadas, HV o VH (emisión horizontal y recepción vertical, o viceversa), provenientes de la cubierta arbórea, se relacionan con la retrodispersión procedente de un volumen, y con la reflexión múltiple de estructuras orientadas aleatoriamente, tales como hojas, ramillas, ramas y tallos.

REGISTRO Y CORRECCION DE IMAGENES

El primer paso necesario para la integración de varias imágenes es su registro y corrección. El procedimiento general para registrar geométricamente varias series de imágenes, descrito por Welch *et al.*, (1987), consiste en:

1. Localizar una serie de puntos de control identificables en todas las imágenes, y sus coordenadas en cada imagen.
2. Cálculo, por el método de mínimos cuadrados, de los coeficientes de las ecuaciones necesarias para registrar todas las imágenes a aquélla que va a servir de referencia (la que tenga mejor resolución y menor deformación). Generalmente la ecuación es polinómica de primer grado.
3. Remuestreo de las imágenes al tamaño del píxel de la imagen usada como referencia. Entonces ya se puede evaluar la exactitud del registro en puntos elegidos al azar y calcular el error. Chavez (1986) recomienda el uso de filtros en las imágenes remuestreadas si el tamaño del píxel ha variado mucho para evitar el aspecto de bloques en las imágenes registradas. Welch *et al.*, (1991) utilizaron un sistema de posicionamiento global (GPS) para localizar los puntos de control en una zona pantanosa, con escasas referencias.

Puede ser necesaria una corrección de la iluminación en la imagen de radar cuando se advierte que el gradiente de tonos de gris en la imagen no procesada no se relaciona con las características de retrodispersión del terreno observado (Sader, 1987). En las imágenes ópticas también pueden suceder anomalías debido a las variaciones atmosféricas que afectan a la radiación, al atenuamiento de la atmósfera y a la reflectancia bidireccional que varía con los ángulos de iluminación y del sensor. En estos casos también habrá que llevar a cabo una corrección (Leckie, 1990).

Kwok *et al.*, (1987) han descrito un algoritmo para transformar imágenes SAR no procesadas de modo que puedan ser registradas directamente a una base cartográfica o a otras imágenes en el mismo sistema de coordenadas. Para ello son necesarios un mapa topográfico digital (DEM) y dos, o tres, puntos de referencia.

TECNICAS DE INTEGRACION DE IMAGENES

Existen dos tipos fundamentales de transformaciones para combinar imágenes digitales: transformaciones estadísticas y aritméticas, y transformaciones de representación visual. Las transformaciones estadísticas y aritméticas, tales como componentes principales, operadores aritméticos, canónicos o factoriales, se usan para combinar datos multivariantes, pero los productos finales son con frecuencia difíciles de interpretar cuantitativa y cualitativamente, y las formas en la imagen resultante son difíciles de relacionar consistentemente con formas del terreno. Además, si el coeficiente de correlación entre las imágenes es pequeño (como suele suceder entre imágenes Landsat y de radar, por ejemplo), el análisis de componentes principales no da un buen resultado, y un análisis de componentes principales selectivos puede ser más conveniente (Chavez *et al.*, 1982, 1984, 1986).

Sin embargo, Paris *et al.*, (1988) obtuvieron tres medidas de la condición biofísica, que estaban relacionadas con la fracción de cabida cubierta, el índice de área foliar y la biomasa de madera por unidad de superficie con un sencillo método de transformación progresiva utilizando imágenes Landsat TM y SIR-B. Este método permite la separación de la biomasa entre sus componentes herbáceo y de madera.

Las transformaciones de representación visual, en cambio, dan una representación de los datos más fácil de interpretar, tanto cuantitativa como cualitativamente. Una de esas transformaciones, la de Intensidad-Color-Saturación (IHS), ha sido utilizada con éxito para integrar datos de radar con otro tipo de imágenes, tales como Landsat TM (Harris, Murray, 1990). Welch, Ehlers (1988) también han obtenido buenos resultados utilizando la transformación IHS en cuanto a definición de la imagen resultante, cuando se emplearon imágenes SAR o de infrarrojo térmico con baja resolución o mucho ruido y se unieron con otras de mejor resolución como Landsat TM.

Otro método a utilizar es el de sustitución de imágenes, en el que se puede crear por ejemplo una imagen en color por composición de dos bandas Landsat TM, incorporando como tercer color básico la otra imagen a unir. Sin embargo, para obtener buenos resultados por este método, la resolución espacial y la longitud de onda de las imágenes a unir no pueden ser muy diferentes (Chavez, 1986).

Se han conseguido buenos resultados con todas las técnicas de integración de imágenes aquí revisadas. Welch, Ehlers (1988) obtuvieron una mejora de la precisión entre el 10 y el 25 p. 100 al integrar imágenes Landsat TM y SIR-B para extracción de elementos cartográficos. En un experimento de clasificación de cultivos utilizando imágenes de radar aerotransportado e imágenes Landsat, Ulaby *et al.*, (1982) incrementaron la exactitud de la clasificación, tomando el campo de cultivo como unidad a clasificar, en aproximadamente un 10 p. 100, respecto a la conseguida empleando sólo imágenes Landsat TM, aparte de la ventaja de estar utilizando imágenes de radar cuando las imágenes TM no son válidas debido a estar el área en estudio cubierta por nubes.

Green (1986) encontró que con la combinación de imágenes SIR-A y Landsat TM era posible la separación de la cubierta herbácea de la vegetación leñosa en Australia, lo cual no era posible con ninguno de los tipos de datos por separado. Tanto Paris, Kwong (1988) como Sader (1987) encontraron que la relación entre la retrodispersión y la biomasa de madera en pie era lineal para valores bajos de la biomasa. Paris, Kwong sugirieron que este problema de saturación podría resolverse utilizando longitudes de onda mayores (banda P). Como probaron Paris, Kwong, la capacidad para separar los componentes herbáceos y leñosos de la biomasa puede tener muchas aplicaciones, tales como identificación del tipo de vegetación o cálculo de la producción primaria neta.

Stone, Woodwell (1988) y Stone *et al.*, (1989) estudiaron la deforestación tropical en Brasil, encontrando que mientras las imágenes Landsat TM eran adecuadas para el inventario de áreas forestales, las imágenes de radar ofrecían la posibilidad de determinar la biomasa y estudiar el tipo de bosque.

En un experimento de discriminación del tipo de bosque, Leckie (1990) obtuvo una exactitud en la clasificación de rodales de siete especies forestales del 74 p. 100, utilizando bandas de radar, infrarrojo y visible. Utilizando sólo infrarrojo y visible, la exactitud bajó al 62 p. 100, y cuando se utilizó sólo radar fue del 49 p. 100. Las bandas de radar dieron mejores resultados para discriminar especies de madera blanda, mientras que las de infrarrojo cercano y medio sirvieron para discriminar especies de madera blanda de aquellas de madera dura, y las bandas del infrarrojo medio y visible fueron las mejores para distinguir los claros y las distintas densidades de las diferentes zonas boscosas. Por tanto, el sinergismo de la utilización de todo tipo de imágenes fue claro.

Miranda *et al.*, (1992), utilizando datos SIR-B cubriendo una parte de la isla de Borneo cubierta por bosques húmedos, realizaron una clasificación utilizando información radiométrica y textural, obteniendo unos resultados preliminares que se asemejan notablemente a los obtenidos anteriormente por Ford, Casey (1988) mediante interpretación visual del mismo conjunto de datos. González-Alonso *et al.*, (1992), usando una imagen Landsat MSS y una imagen SIR-A cubriendo ambas una zona situada al Suroeste de la Comunidad Autónoma de Madrid, encontraron que el uso conjunto de ambas imágenes mejoraba notablemente el reconocimiento de los usos del suelo, especialmente de los encinares, respecto a los resultados obtenidos en el caso de utilizar exclusivamente la imagen Landsat MSS. Horgan *et al.*, (1992) trabajando sobre el mismo área y con las mismas imágenes, pero utilizando una metodología de clasificación muy diferente, encontraron que el uso combinado de ambos tipos de información mejoraba los resultados de clasificación de los pinares y de los encinares, en tanto que se empeoraba ligeramente la clasificación correcta de los matorrales.

Lozano-García, Hoffer (1993) estudiaron un área forestal de Florida utilizando datos Landsat TM y SIR-B, llegando como principal conclusión a que el uso combinado de ambos tipos de información producía mejores resultados de clasificación que el uso por separado de ellas y que la mejor combinación de imágenes incluía bandas comprendidas en el dominio visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y microondas.

CONCLUSIONES

En los próximos años serán varios los satélites provistos de sensores activos que serán puestos en órbita (ERS-2, RADARSAT, etc.) y en consecuencia las

imágenes de radar están llamadas a desempeñar un papel importante en la discriminación de tipos de bosque y estimación de la biomasa. Sin embargo, se debe hacer una selección cuidadosa ante la diversidad de imágenes disponibles y usar sólo aquéllas que sean complementarias y contengan información relacionada con el tema que se está estudiando.

Entre los métodos descritos para integrar distintas imágenes, los resultados obtenidos con la transformación IHS (Intensidad-Color-Saturación) son muy prometedores, aunque algunas de las transformaciones estadísticas mencionadas también han dado buenos resultados.

La integración de imágenes digitales es una poderosa herramienta para múltiples fines forestales, pero aún es preciso realizar una investigación más profunda para optimizar los resultados.

SUMMARY

A review of the use of radar imagery and its integration with optical images

The forest applications of the radar images are presented and discussed, doing a detailed revision of the most modern researchs. Special attention is paid to the combination of radar images and images in the visible-infrared domain.

KEY WORDS: Radar images
Infrared/visible images
Forest applications

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AHERN F. J., ERDLÉ T., MACLEAN D. A., 1991. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper. Mapper reflectance measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (3), 387-400.
- BORGESON W. T., BATSON R. M., KIEFFER H. H., 1985. Geometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51 (12), 1.893-1.898.
- BOTKIN D. B., ESTES J. E., MACDONALD R. M., WILSON, M. V., 1984. Studying the earth's vegetation from space. *BioScience*, 34 (8), 508-514.
- CHAVEZ P. S. Jr., 1986. Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24.000 scale image mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 (10), 1.637-1.646.
- CHAVEZ P. S. Jr., BERLÍN G. L., 1984. Digital processing of SPOT Simulator and Landsat TM data for the South Mountain Region, Arizona. *Proceedings of SPOT Simulator Symposium*, Scottsdale, Arizona, 56-66.
- CHAVEZ P. S. Jr., BERLÍN G. L., SOWERS L. B., 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Applied Photogrammetric Engineering*, 8 (1), 23-30.
- DAILY M. I., FARR T., ELACHI C., SCHABER G., 1979. Geologic interpretation from composited radar and Landsat imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (8), 1.109-1.116.
- FORD J. P., CASEY D. J., 1988. Shuttle radar mapping with diverse incidence angles in the rainforests of Borneo. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 927-943.
- GONZALEZ-ALONSO F., CUEVAS J. M., SALETA J. L., 1992. Clasificación de la cubierta vegetal del centro de España mediante una imagen digitalizada del radar SIR-A y una imagen Landsat MSS. *Invest. Agr.: Prod. Prot. veg.* 7 (3), 355-365.
- GREEN G. M., 1986. Use of SIR-A and Landsat MSS imagery on mapping shrub and intershrub vegetation in Koonamore, South Australia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 (5), 659-670.

- HARRIS J. R., MURRAY R., 1990. IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (12), 1.631-1.641.
- HOEKMAN D. H., 1985. Radar backscattering of forest stands. *International Journal of Remote Sensing*, 6 (2), 325-343.
- HORGAN G. W., GLASBEY C. A., LOPEZ-SORIA S., CUEVAS J. M., GONZALEZ-ALONSO F., 1992. Land-use classification in central Spain using SIR-A and MSS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (15), 2.839-2.848.
- JENSEN J. R., 1986. *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, 379 pp.
- KWOK R., CURLANDER J. C., PANG S. S., 1987. Rectification of terrain induced distortions in radar imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (5), 507-513.
- LECKIE D. G., 1990. Synergism of synthetic aperture radar and visible/infrared data for forest type discrimination. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (9), 1.237-1.246.
- LOZANO-GARCIA D. F., HOFFER R. M., 1993. Synergistic effect of combined Landsat-TM and SIR-B data for forest resources assesment. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (14), 2.677-2.694.
- MIRANDA F. P., MACDONALD J. A., CARR J. R., 1992. Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of Borneo. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (12), 2.349-2.354.
- PARIS, J. F., 1985. Active microwave properties of vegetation canopies. *Fundamental Remote Sensing Science Research Programm. 1985 Summary Report of the Scene Radiation and Atmospheric Effects Characterization Project*, D. W. Deering, 1985. NASA Tech. Memo. 86234, 148-154.
- PARIS J. F., KWONG H. H., 1988. Characterization of vegetation with combined Thematic Mapper (TM) and Shuttle Imaging Radar (SIR-B) image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (8), 1.187-1.193.
- SADER S. A., 1987. Forest biomass, canopy structure, and species composition relationships with multipolarization L-band synthetic aperture radar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (2), 193-202.
- STONE T. A., WOODWELL G. M., HOUGHTON W. R. A., 1989. Tropical deforestation in Pará, Brazil: analysis with Landsat and Shuttle Imaging Radar - A. *Proc. IGARSS'89*, 192-196.
- STONE T. A., WOODWELL G. M., 1988. Shuttle Imaging Radar - A analysis of land use in Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 95-105.
- ULABY F. T., LI R. Y., SHANMUGAN K. S., 1982. Crop classification using airborne radar and Landsat data. *IEEE Transations on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-20m, n.º 1, 42-51.
- WELCH R., JORDAN T. R., EHLERS M., 1985. Comparative evaluations of the geodetic accuracy and cartographic potential of Landsat 4/5 TM image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1.249-1.262.
- WELCH R., ELHERS M., 1987. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (3), 301-303.
- WELCH R., ELHERS M., 1988. Cartographic feature extraction with integrated SIR-B and Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (5), 873-889.
- WELCH R., REMILLARD M., ALBERTS J., 1991. Integrated resources databases for coastal management. *GIS World*, 86-89.