

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

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

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

Resumen

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

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

Abstract

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

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

* Autor para la correspondencia: b62arcas@uco.es

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

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

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

Introducción

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Material y métodos

Área de estudio

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

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

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

Especie objeto de estudio

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

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

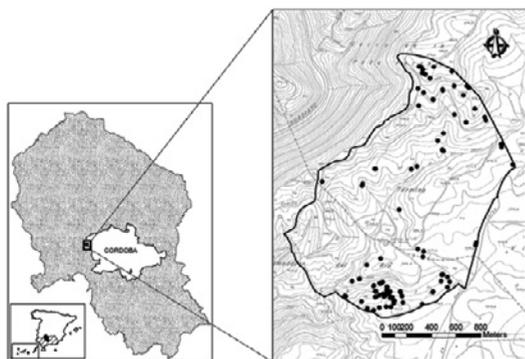


Figura 1. Localización de la zona de estudio.



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

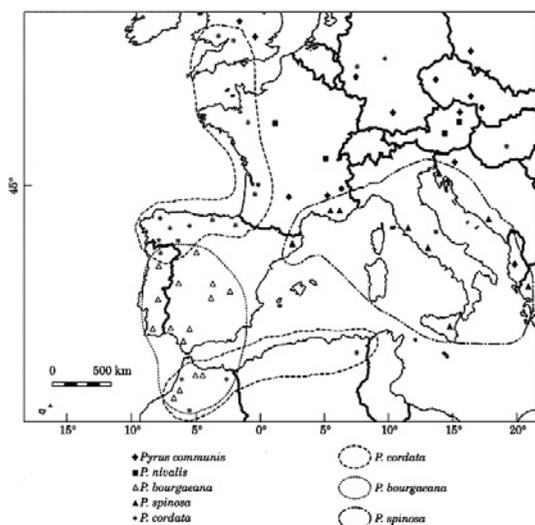


Figura 3. Área de distribución y localización de los representantes del género en Europa.

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

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

Muestreo y toma de datos

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

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

Imágenes Quickbird

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

Corrección atmosférica

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

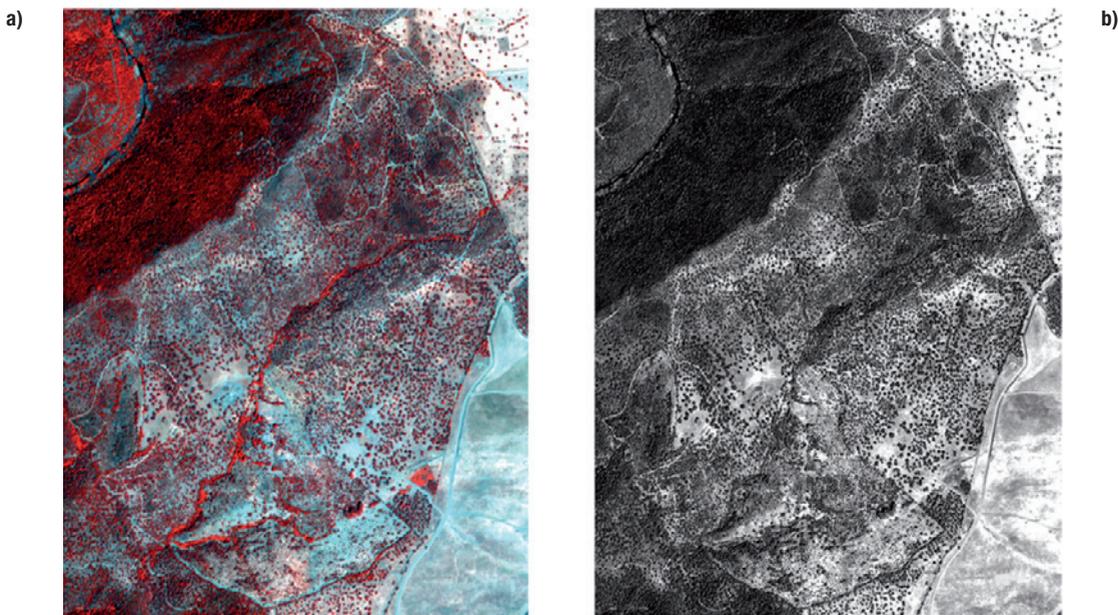


Figura 4. Composición en falso color infrarrojo (NIRGB) de (a) imagen multiespectral (MS) y (b) imagen pancromática (PAN).

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

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

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

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

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

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

Fusión de imágenes

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

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

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

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

Medidas de la calidad de las imágenes fusionadas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Regiones de interés (ROIs: entrenamiento y validación)

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

Proceso de clasificación digital mediante *Maximum Likelihood*

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

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

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

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

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

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

Resultados

Evaluación de los métodos de fusión de imágenes

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

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

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

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

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

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

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

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

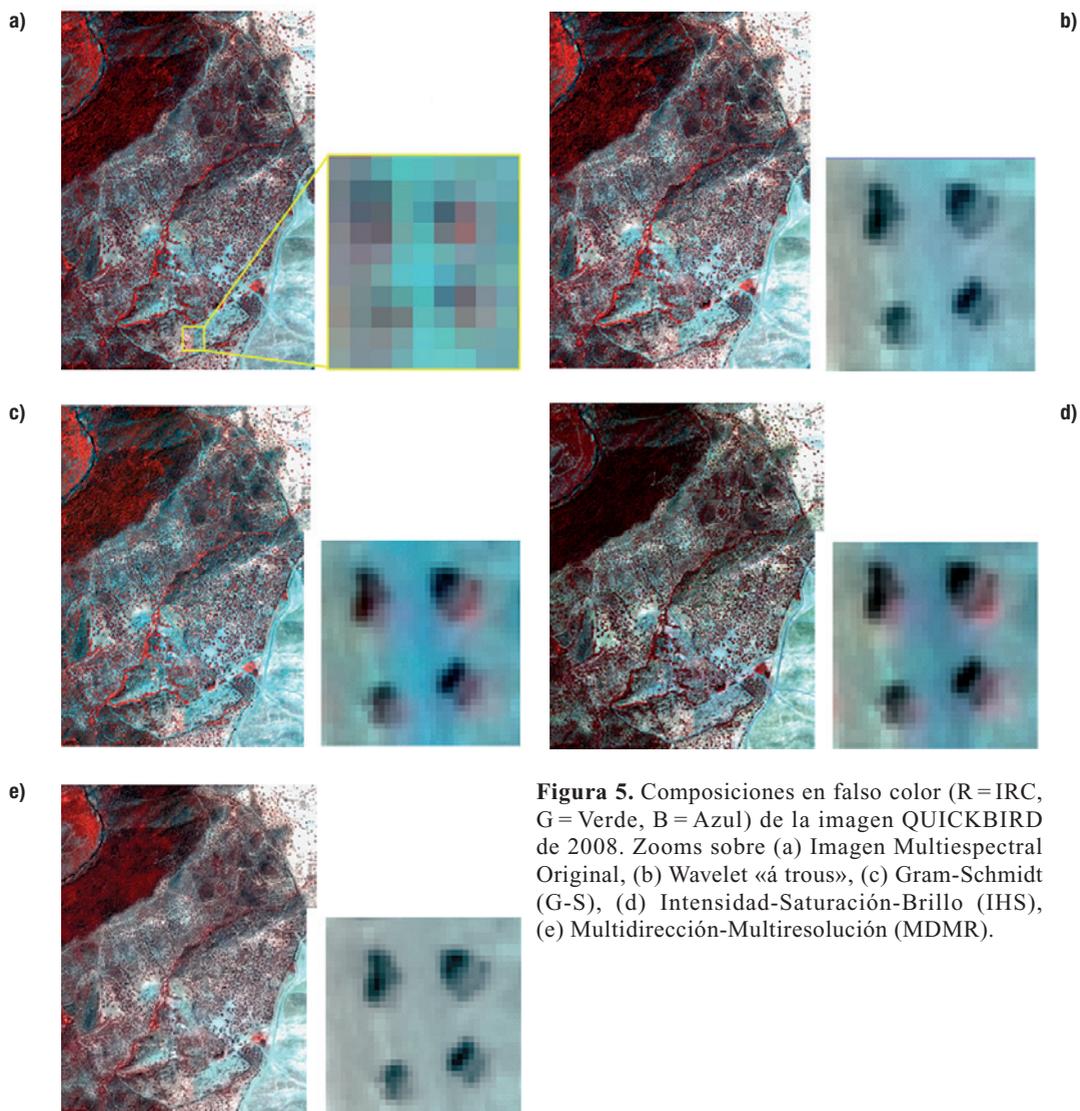


Figura 5. Composiciones en falso color (R=IRC, G=Verde, B=Azul) de la imagen QUICKBIRD de 2008. Zooms sobre (a) Imagen Multiespectral Original, (b) Wavelet «à trous», (c) Gram-Schmidt (G-S), (d) Intensidad-Saturación-Brillo (IHS), (e) Multidirección-Multiresolución (MDMR).

alidad de un método para sintetizar cada banda espectral individual.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabla 7. Comparación entre errores globales

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

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

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

Tabla 9. Comparación entre índices de calidad espectral y espacial

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

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

Proceso de clasificación digital mediante máxima probabilidad

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

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

Discusión y conclusiones

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Referencias

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

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

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