



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

## COMPARACIÓN DE DISTINTAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL PARA LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS CON IMÁGENES LANDSAT ETM+

AFRICA HEREDIA LACLAUSTRA<sup>1</sup>, SUSANA MARTÍNEZ SÁNCHEZ<sup>2</sup>,  
EMELY QUINTERO<sup>3</sup>, WILLIAM PIÑEROS<sup>4</sup> y EMILIO CHUVIECO<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Geografía. Universidad de Zaragoza. 50.009- Zaragoza. España

<sup>2</sup>Laboratorio de Botánica. Dpto. de Botánica. Escuela Politécnica Superior. 27002-Lugo. España

<sup>3</sup>Geógrafa. Universidad de los Andes. Venezuela

<sup>4</sup>Ingeniero Catastral y Geodesta, Corporación para la Cooperación al Desarrollo Regional. Colombia

<sup>5</sup>Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. 28801- Alcalá de Henares. España

<sup>1</sup>[africahl@posta.unizar.es](mailto:africahl@posta.unizar.es), <sup>2</sup>[susanams@lugo.usc.es](mailto:susanams@lugo.usc.es), <sup>3</sup>[emelycq@yahoo.com](mailto:emelycq@yahoo.com),

<sup>4</sup>[wpinero@tutopia.com](mailto:wpinero@tutopia.com), <sup>5</sup>[emilio.chuvieco@uah.es](mailto:emilio.chuvieco@uah.es)

### RESUMEN

La cartografía, seguimiento y evaluación de las áreas quemadas ha mejorado notablemente en los últimos años gracias al desarrollo de la teledetección desde satélite. En este trabajo, realizado sobre un sector al SO de Madrid (204 km<sup>2</sup>), se emplean dos imágenes LANDSAT ETM+, adquiridas antes y después de un importante incendio que afectó a esta zona en agosto de 2002. El principal objetivo del trabajo es evaluar la idoneidad de diferentes técnicas: índices espectrales (NDVI, IAQ, NBR) y análisis de componentes principales (ACP), para discriminar el área quemada. Entre las técnicas ensayadas, el índice NBR y el ACP multitemporal ofrecen los mejores resultados, si bien algunas parcelas débilmente quemadas en el interior del perímetro afectado no fueron bien discriminadas. La máscara obtenida a partir del análisis de umbrales del NBR y ACP, con un filtro espacial para reducir píxeles aislados en la imagen resultado, se comparó con la delimitación GPS realizada por los servicios forestales de la Comunidad de Madrid (CM), lográndose un buen ajuste en aquellos sectores donde el inventario GPS había sido más preciso. Una vez delimitada la zona quemada, puede evaluarse las coberturas del suelo afectadas; aspecto de espacial relevancia para conocer la dinámica espacial posterior al evento.

Palabras clave: cartografía de áreas quemadas, índices espectrales, teledetección de satélite, Madrid.

### ABSTRACT

Mapping, monitoring and assessment of burnt areas has considerably improved during the last years by using new remote sensing techniques. In this work, carried out in an area of 204 km<sup>2</sup> to the SW of Madrid, two Landsat ETM+ images were used to detect the area affected by a large



*Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", GeoFocus (Artículos), n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157*

forest fire occurring in August 2002. An assessment of the performance of different discrimination techniques has been carried out. Spectral indices (NDVI, BAI, NBR) and principal component analysis (PCA) have been tested. NBR and multitemporal PCA provided the best results, although some problems were detected in areas lightly burned within the burned perimeter. The final burned area was discriminated from multiple thresholds of post-fire NBR and multitemporal PCA 2. A sieve filter was applied to the result to avoid small polygons. The comparison with a GPS perimeter provided by the regional forest service was quite accurate, specially where the GPS survey was done with more spatial detail. Finally, the burned area was classified in the pre-fire image to obtain an inventory of land cover categories affected the fire. This information is critical to analyse the medium and long-term effects of fire on ecosystems.

Key-words: Burnt areas mapping, spectral indices, satellite remote sensing, Madrid.

## 1. Introducción

Como es bien sabido, el incendio forestal es un fenómeno ligado secularmente a los espacios mediterráneos, lo que implica que la vegetación se haya adaptado a los ciclos de recurrencia del fuego mediante diversos mecanismos ecológicos (Pausas y Vallejo, 1999). Las recientes transformaciones del espacio rural y los efectos de las distintas políticas de extinción de incendios han supuesto una modificación de los patrones históricos de recurrencia, acortando en muchos casos los ciclos, intensificando en otros las intensidades, y alterando, en definitiva, los efectos tradicionales del fuego.

La evaluación de estos efectos requiere una cartografía precisa de las áreas afectadas por los incendios. Pese a la buena calidad que las estadísticas de ocurrencia del fuego presentan en nuestro país (Vélez, 2000), la mayor parte de los incendios no se referencia geográficamente con gran precisión, puesto que la localización sólo se registra en el espacio cubierto por una cuadrícula de 10 x 10 km, o en el término municipal de origen. Esta falta de referenciación espacial detallada dificulta la evaluación ecológica de los efectos del fuego y la ayuda a la regeneración, así como la verificación de los sistemas vigentes de predicción del peligro. La aplicación de distintas leyes autonómicas, ha supuesto que se perimetren los incendios de mayor extensión (por encima de 50 has en algunos casos), utilizando técnicas GPS, pero esa información resulta de difícil acceso y no incluye series suficientemente homogéneas de todo el territorio nacional. Además, la digitización mediante GPS se restringe al perímetro quemado, sin incluir habitualmente las manchas interiores, y sin distinguir niveles de daño.

La teledetección desde satélite se plantea como una alternativa muy sólida para cartografiar áreas quemadas, ya que permite una observación sistemática de toda la superficie terrestre, en bandas del espectro sensibles a la discriminación de la señal quemada y en formato digital (Chuvieco, 2002). Estas propiedades explican el profuso uso de esta técnica en el ámbito de los incendios forestales que se viene desarrollando en los últimos años, tanto a escalas regionales y globales (Justice *et al.*, 2002), como a escalas locales (García-Haro *et al.*, 2001; Miller y Yool, 2002; Rogan y Franklin, 2001). Las primeras se han basado principalmente en imágenes del sensor NOAA-AVHRR (Chuvieco y Martín, 1994), aunque también se comienzan a utilizar otros sensores



*Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", GeoFocus (Artículos), n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157*

más recientes, como el SPOT-Vegetation (Stroppiana *et al.*, 2002) o el Terra-Modis (Roy *et al.*, 2002). Por su parte, en escalas locales, el sensor Landsat-TM (o más recientemente el ETM+) ha sido sin duda el más utilizado (Koutsias *et al.*, 1999; Rogan y Yool, 2001) También hay algunos ejemplos de sensores de escala regional, como el IRS-WIFS (Vázquez *et al.*, 2001) o el SAC-C/MMRS (García y Chuvieco, 2003).

## 2. Objetivos

En este trabajo se presenta la metodología para evaluar el área quemada a partir de imágenes Landsat-ETM+. Se pretende verificar la aplicación de distintas técnicas que permitan delimitar con precisión el área quemada y las especies afectadas por el incendio. El caso de estudio seleccionado corresponde a un sector del Suroeste de la Comunidad de Madrid y Norte de Toledo, situado entre los municipios de Cadalso de los Vidrios y Almorox ([figura 1](#)). Este área de estudio comprende una extensión de 204 km<sup>2</sup>, y fue afectada por un importante incendio en los primeros días de agosto de 2002. Se trata de una zona de montaña media mediterránea cuyas alturas oscilan entre los 420 y los 1215 m sobre el nivel del mar. La vegetación predominante está asociada a las quercíneas y matorral silicícola, cuya disposición sobre el terreno permite distinguir un paisaje de dehesa en el que se intercalan bosquetes de pinos, jarales, retamares, enebrales y cultivos de secano. Nos encontramos ante un área rural modificada paisajísticamente y en sus formas de vida por la proximidad a la ciudad de Madrid, cuya influencia se expande más allá de las propias delimitaciones administrativas de la región.

## 3. Métodos

### 3.1. Tratamientos previos de las imágenes

Para la realización de este trabajo se dispuso de cartografía digital 1:50.000, Modelo digital de elevaciones con un paso de malla de 50 m correspondiente a la Comunidad de Madrid y alrededores, dos imágenes Landsat-ETM+, adquiridas un año antes del incendio (10 de Septiembre de 2001), y pocos días después del evento (12 de Agosto de 2002). La [figura 2](#) incluye la composición coloreada de las bandas 4/5/3 (en rojo, verde, azul, respectivamente) de ambas fechas.

Para realizar una comparación multitemporal en teledetección es necesario eliminar previamente, en la medida de lo posible, cualquier cambio en los niveles digitales de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta. Esto implica asegurar que estemos situados en la misma zona para ambas fechas, y que la variable que estamos comparando se refiera a la misma escala de medida (Chuvieco, 2002). Una inadecuada superposición entre imágenes podría llevar a conclusiones erróneas, puesto que pondrían en evidencia cambios entre fechas que serían debidos, no tanto a modificaciones reales en el terreno como a estar analizando píxeles correspondientes a áreas distintas. Resulta necesario eliminar asimismo, las distorsiones provocadas por la interferencia de la atmósfera en la radiación reflejada por la superficie: para ello se llevan a cabo las oportunas correcciones radiométricas que tratan de acercar los niveles digitales originales a los que habría en caso de una recepción ideal. Este tipo de correcciones son especialmente necesarias cuando se



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

realizan estudios multitemporales, puesto que los factores que afectan a una imagen no suelen ser comparables a los que experimenta otra en fecha distinta (Martín y Chuvieco, 1998).

En este caso, el ajuste geométrico entre imágenes se basó en la localización de puntos de control comunes al mapa topográfico y las imágenes, aprovechando cruces de carreteras, caminos, etc. Se tomaron quince puntos de control y cinco de verificación para cada imagen. El remuestreo se realizó mediante el método del vecino más próximo, con un polinomio de transformación de primer grado. El error medio cuadrático obtenido no superó, en ninguno de los dos casos, 1 píxel. Una vez obtenido un buen ajuste geométrico entre imágenes, se re proyectaron a UTM 30T, con un ajuste del tamaño de píxel de 25 x 25 m.

Para llevar a cabo la homogeneización radiométrica entre las dos imágenes, se convirtieron a valores de reflectividad, empleando el modelo simplificado propuesto por Chávez (1996).

$$\rho_{i,k} = \frac{D\pi((L_{sen,k} - L_{a,k})/\tau_{k,a})}{E_{o,k} \cos\theta_i \tau_{k,d} + E_{di,k}}$$

donde  $\rho_{i,k}$  es la reflectividad del píxel  $i$  para la banda  $k$ ;  $D$  es un factor que tiene en cuenta la variación de la distancia Tierra-Sol, y se calcula a partir del día juliano ( $J$ ) siguiendo la siguiente fórmula:  $D = (1 + 0,0167 (\sin(2\pi(J - 93,5) / 365)))^2$ ;  $L_{sen}$  es la radiancia en el sensor para esa banda;  $L_{a,k}$  la radiancia atmosférica para esa banda;  $\tau_{k,a}$  de transmisividad ascendente;  $E_{o,i}$  es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera;  $\theta_i$  el ángulo cenital solar;  $\tau_{k,d}$  la transmisividad para el flujo descendente, y  $E_{di,k}$  la irradiancia difusa. En el método propuesto por Chávez, algunos términos se simplifican, en concreto  $L_{a,k}$  se obtiene a partir del valor mínimo del histograma,  $\tau_{k,o}$  se calcula a partir del  $\cos \theta_i$  (1, para observaciones verticales);  $\tau_{k,i}$  se estima a partir de unos valores promedio para cada banda (0.70, 0.78, 0.85, 0.91, 1, 1 para las bandas 1, 2 3,4,5,7 del Landsat-ETM+, respectivamente) y  $E_{d,k} = 0$  (ignora irradiancia difusa)

Posteriormente, se aplicó la corrección del efecto de sombreado, utilizando el MDT, y teniendo en cuenta los ángulos de elevación y acimutal solares. Incluye dos fases. En la primera se calcula el ángulo de iluminación de cada píxel (considerando la posición solar y topográfica) y en la segunda se corrige la reflectividad de entrada de acuerdo con el valor de ese ángulo. La iluminación se calcula a partir de los ángulos cenital solar, acimutal solar, la orientación y de pendiente de acuerdo a:

$$II_i = \cos\theta_c \cos\theta_n + \sin\theta_c \sin\theta_n \cos(\phi_c - \phi_n)$$

donde  $II_i$  corresponde al coseno del ángulo de iluminación,  $\phi_c$  indica el ángulo cenital solar,  $\phi_n$  la pendiente del terreno,  $\phi_c$  el ángulo acimutal solar y  $\phi_n$  el ángulo de orientación de la vertiente. Los ángulos solares se pueden obtener de la fecha y hora de adquisición de la imagen, aunque suelen aparecer en la cabecera de la imagen. Mientras tanto la pendiente y la orientación se pueden obtener a partir del MDT. Una vez calculada la imagen con el ángulo de iluminación (que equivale a un sombreado del terreno), puede aplicarse alguna de las fórmulas para la corrección de iluminación topográfica sugeridas en la literatura. Una sencilla es la propuesta por Civco (1989):



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

$$\rho_{h,i} = \rho_i + \rho_i \frac{(\Pi_m - \Pi_i)}{(\Pi_m)}$$

donde  $\Pi_m$  indica la media de la imagen de iluminación para toda la imagen, y  $\Pi_i$  el valor de iluminación para el píxel a corregir.

### 3.2. Índices espectrales de área quemada

En los últimos años se han propuesto una amplia variedad de técnicas para discriminar áreas quemadas en imágenes de satélite. Podríamos agruparlas en dos apartados: por un lado la selección de los índices espectrales más idóneos para esta tarea, y por otra las técnicas de discriminación propiamente dichas. En la primera línea se ha trabajado bastante en los últimos años, ofreciéndose distintas alternativas según los sensores que se tenían disponibles (Chuvieco *et al.*, 2002; Trigg y Flasse, 2001). Estos autores han mostrado que el tradicional índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) no resulta un buen discriminador del área quemada en imágenes posteriores al incendio, aunque sí facilita buenos resultados en comparaciones temporales. El NDVI se define como:

$$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}}$$

donde  $\rho_{i,IRC}$  y  $\rho_{i,R}$  indican las reflectividades del píxel  $i$  en la banda del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente. Como índices alternativos para áreas quemadas se han propuesto el IAQ (Índice de Área Quemada), basado en distancias a un centro de convergencia que espectralmente acoge la señal del carbón (Martín y Chuvieco, 1998). Este índice se define como:

$$IAQ_i = 1 / ((\rho_{c,r} - \rho_{i,r})^2 + (\rho_{c,irc} - \rho_{i,irc})^2)$$

donde  $\rho_{c,r}$  y  $\rho_{c,irc}$  son las reflectividades del centro de convergencia para áreas quemadas en el rojo e infrarrojo cercano, respectivamente (con valores de 0.1 y 0.06, respectivamente en la propuesta de Martín, 1998).

También se ha utilizado en los últimos años el cociente normalizado del área quemada: NBR (*Normalized Burnt Ratio*) (Miller y Yool, 2002; Patterson y Yool, 1998), que se define como:





Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

$$NBR_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,SWIR}}$$

donde  $\rho_{i,SWIR}$  indica la reflectividad del píxel  $i$  en la banda del infrarrojo medio de onda corta (SWIR, entre 1 y 2,5 micras).

Por último, se han planteado como técnicas viables para discriminar áreas quemadas el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Martín y Chuvieco, 1995, Siljeström y Moreno, 1995) y el de mezclas espectrales (Caetano *et al.*, 1994).

### 3.3. Discriminación de incendios

En cuanto a las técnicas de discriminación, podemos agruparlas entre las que emplean una sola fecha, posterior al incendio, y las que comparan imágenes anteriores y posteriores al fuego. En el primer caso, lo más habitual es utilizar una segmentación de umbrales, ya sean simples (sobre una sola banda) o múltiples, aunque también se han empleado técnicas de regresión y redes neuronales (Koutsias *et al.*, 1999). En cuanto a técnicas multitemporales, lo más habitual es trabajar con segmentación de umbrales, pero también se han empleado composiciones en color, vectores multitemporales y análisis de componentes principales (Martín *et al.*, 1994). Para este trabajo se utilizaron segmentaciones post-incendio y multitemporales.

El último paso en la evaluación de áreas quemadas consiste en inventariar las especies que han sido afectadas por el fuego, lo que resulta de gran interés para entender mejor los efectos del incendio y facilitar su regeneración. Para ello, puede utilizarse información geográfica disponible sobre la cubierta vegetal antes del incendio, como puede ser la derivada del mapa CORINE *Land cover* (European Commission, 1993), o del Inventario Forestal Nacional. Una alternativa sería clasificar la imagen previa al incendio, extrayendo las clases de cubierta más representativas. En nuestro caso, realizamos una clasificación supervisada de máxima probabilidad (Chuvieco, 2002), utilizando como entrada todas las bandas de la imagen previa al incendio (excepto la térmica), el NDVI, las pendientes del terreno obtenido a partir del MDT y dos mapas de texturas (homogeneidad y contraste) calculados a partir de la matriz de concurrencia de la banda espectral roja, que suele ser la más común para analizar las variaciones espaciales de la imagen.



*Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", GeoFocus (Artículos), n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157*

### 3.4. Verificación

La validación de los resultados alcanzados con las distintas técnicas, requiere el contraste de los mismos frente a la verdad terreno o a un documento que se considere suficientemente fiable. En nuestro caso, hemos comparado los resultados con la interpretación visual de la imagen, apoyada en el trabajo de campo, y con un perímetro obtenido mediante técnicas GPS desde helicóptero que nos fue facilitado por la Dirección General de Medio Natural de la CM. Conviene tener en cuenta que este perímetro representa el borde exterior del área quemada, sin considerar zonas interiores que no fueron afectadas por el fuego. En el caso del incendio considerado, estas superficies son bastante importantes, tal y como tuvimos ocasión de comprobar en el trabajo de campo. En este aspecto, también se demostró una notable inconsistencia entre las estadísticas del Ministerio de Medioambiente para este incendio (775 has) y las que facilitaba el perímetro GPS (1984 has). En consecuencia, el perímetro no se pudo utilizar como una validación propiamente dicha, ya que realiza una valoración excesiva de la superficie quemada, pero al menos se utilizó para validar los errores de comisión (píxeles fuera del área quemada) de nuestros resultados, como veremos más adelante.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Evaluación de la imagen post-incendio

Tras la corrección geométrica y radiométrica de las imágenes, se calcularon los índices espectrales antes comentados. La [figura 3](#) recoge los resultados correspondientes al NDVI, NBR e IAQ para la imagen posterior al incendio. Visualmente se observa que la imagen de NDVI no muestra un contraste nítido entre las áreas quemadas y otras cubiertas con baja proporción de cubierta vegetal, como puede ser la cantera de Cadalso de los Vidrios, situada en el vértice NE de la imagen, o los bloques graníticos de la Peña de Cenicientos, en el Oeste del área afectada por el fuego. Con claridad, el NBR y el IAQ ofrecen una discriminación más nítida del incendio, mostrando un claro contraste con otras cubiertas. No obstante, visualmente se evidencian algunas confusiones, como las producidas con pequeñas láminas de agua o zonas en sombra, en el caso del IAQ, o con áreas de roquedo descubierto también para el NBR.

La segmentación simple de las imágenes correspondientes a estos índices espectrales confirma los comentarios precedentes, ya que el NDVI resulta un pobre discriminador de las zonas afectadas por el incendio, mostrando notable confusión con el roquedo descubierto (cantera), áreas urbanas o suelos descubiertos. Por su parte, tanto el IAQ como el NBR muestran un comportamiento mucho más atinado, con una buena discriminación de la zona quemada, identificando además los parches interiores que no se vieron afectados por el fuego, tal y como comprobamos en la salida de campo. El NBR muestra menor confusión con categorías de bajas reflectividades, como las áreas de granito descubierto o espacios en sombra, pero omite la identificación de manchas interiores quemadas. Por su parte, el IAQ ofrece mejor discriminación interna, pero mayores errores de sobre-estimación en coberturas próximas (ver [figura 4](#)).



*Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", GeoFocus (Artículos), n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157*

#### 4.2. Comparación multitemporal

La comparación de imágenes anteriores y posteriores al incendio se ha basado, por un lado, en los índices espectrales antes revisados, así como en el análisis de componentes principales. La diferencia multitemporal en el NDVI (ver [figura 5](#)) muestra un mejor contraste que el que ofrecía la imagen post-incendio, si bien sigue presentándose cierta confusión con algunas superficies de roquedo descubierto, tal vez influido por el efecto de sombras, ya que las imágenes se tomaron con un mes de diferencia solar (12 de agosto y 10 de septiembre), lo que hace que estos efectos entre imágenes no sean totalmente compatibles. Aunque este efecto debería haberse solventado en la corrección topográfica, parece que todavía pueden persistir algunos problemas.

En cuanto al NBR sigue comportándose bastante bien, ofreciendo una delimitación bastante nítida del incendio, así como de los parches interiores no afectados o débilmente quemados. Finalmente, el IAQ muestra una sensibilidad bastante adecuada, si bien en este caso las diferencias son positivas (aquí tras el incendio lo lógico es que aumente el índice). Algunas manchas interiores, no obstante, no quedan bien diferenciadas, y se observan pequeñas parcelas externas catalogadas como incendio, que probablemente obedezcan a quemas agrícolas.

En lo que se refiere al análisis de componentes principales, se ha utilizado en este trabajo para evaluar los contrastes entre la imagen posterior y anterior al fuego, de cara a determinar el área quemada. Por esa razón, se han incluido como canales de entrada las bandas de reflectividad de las dos fechas. La [tabla 1](#) muestra la matriz de autovectores para los cuatro primeros componentes, que acumulan más del 97.23% de la varianza original. Si bien la interpretación de este tipo de matrices en teledetección resulta siempre compleja, todavía lo es más cuando nos referimos a análisis multitemporal, ya que es preciso analizar no sólo el contraste espectral que muestra la matriz, sino también las transiciones entre fechas.

Para este caso concreto, el primer componente muestra con cierta claridad un comportamiento estable, ya que los pesos entre fechas no difieren. Al tratarse, además, de pesos similares entre bandas, nos da idea del componente brillo, que resulta una suma ponderada de todas las bandas. Por tanto se trata del brillo o intensidad estable entre fechas. En este componente se almacena el 86.34% de la varianza original. Por su parte, el segundo componente ofrece un nítido contraste entre bandas y entre fechas. El primero hace referencia a la divergencia en la imagen posterior al fuego entre las bandas visibles y SWIR, frente al infrarrojo cercano, lo que da una clara idea de que está refiriéndose a un componente vegetal post-incendio. Para la imagen anterior al fuego, ese contraste espectral no es tan nítido, pero podría también relacionarse con vegetación, al presentar valores negativos en el SWIR y muy bajos en el visible. En consecuencia, podemos denominar a ese componente como ganancia de verdor. En un componente así denominado, las áreas quemadas ofrecerían una tonalidad oscura (los valores más bajos de ganancia), pues son las que mayor pérdida de verdor han experimentado, mientras otras zonas que hubieran experimentado una mejora en su cubierta vegetal, ofrecerían aquí los valores más altos. En cuanto a los componentes 3 y 4 no ofrecen tan clara interpretación, y cuentan con una varianza bastante residual (4.9% entre ambos). La representación visual de los dos primeros componentes ([figura 6](#)) parece confirmar nuestro análisis, ya que mientras el primer componente no ofrece apenas contraste en el área quemada, ofreciendo una valoración del brillo estable entre las dos imágenes, el segundo sí





*Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", GeoFocus (Artículos), n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157*

ofrece con nitidez el área afectada por el fuego, con valores más altos, como indicaban los autovectores.

Las imágenes generadas a partir de estas técnicas multitemporales pueden segmentarse de igual forma a lo expuesto con los índices post-incendio. Los umbrales, lógicamente, deben adaptarse a la variación temporal experimentada, y dependen en gran medida del tiempo transcurrido entre las dos fechas de referencia, sobre todo cuando puede haber cambios de cubierta no relacionados con el incendio (por variaciones estacionales, por ejemplo). En la [figura 7](#) se presentan algunos de estos umbrales. El más atinado, en este caso, es el obtenido a partir del segundo componente principal multitemporal, que no muestra apenas confusión con cubiertas no afectadas por el incendio, con una buena discriminación del área quemada. Como antes, es el NDVI el que ofrece un mayor grado de confusión, aunque más adecuado que el obtenido para la imagen post-incendio.

#### 4.3. Delimitación definitiva del área quemada

A la vista de los comentarios previos, la solución final que proponemos para cartografiar el área quemada se ha basado en la combinación de varias técnicas, de cara a solventar los problemas que plantea cada una de ellas por separado. En función de las ventajas e inconvenientes, hemos seleccionado la imagen del NBR post-incendio y el componente principal-multitemporal 2. A partir de esas imágenes se han obtenido máscaras binarias considerando la distribución estadística de valores dentro de parcelas de control de área quemada que recogimos en campo. La intersección entre los dos criterios dio como resultado una imagen de síntesis, que en esencia permitía una buena discriminación del área quemada, si bien se observaron algunos polígonos de escaso tamaño fuera de la mancha principal. Teniendo en cuenta que pueden presentarse algunos factores que expliquen ese ruido espacial, decidimos, siguiendo una práctica bastante común en la interpretación digital de imágenes, eliminar los polígonos de pequeño tamaño, asociándolos a la categoría del polígono circundante. El límite para esta eliminación fue de 10 píxeles (0.62 has). La imagen resultado aparece en la [figura 8](#).

#### 4.4. Validación de resultados

Tal y como se comentó previamente, la información disponible para la validación resultaba poco apropiada, ya que el perímetro GPS del helicóptero no incluía ninguna de las islas interiores no afectadas por el fuego, que habíamos comprobado como no quemadas en el trabajo de campo. Las diferencias en cuanto a superficie afectada por el fuego son bastante notables entre las distintas fuentes: 785 para la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (DGCONA), 1983.38 para el perímetro GPS y 1226.13 de acuerdo a nuestra delimitación con la imagen ETM+. El trabajo de campo nos permitió confirmar que la superficie quemada total se aproxima más a este último dato, al precisar mucho mejor las áreas no quemadas en el interior del perímetro del incendio. La notable divergencia con las estadísticas de la DGCONA puede deberse a que se trata de un incendio que afectó a dos provincias, situadas en dos comunidades autónomas distintas, lo que puede haber introducido errores en la compilación de estadísticas.



*Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", GeoFocus (Artículos), n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157*

La [figura 9](#) incluye la comparación entre las áreas delimitadas como incendio en la imagen y en el perímetro GPS, mostrándose la buena precisión en la delimitación global de los límites, con la salvedad de los parches interiores, previamente comentados. En la imagen se delimitan como quemado también algunas pequeñas parcelas en el exterior del perímetro, que pueden corresponder a incendios agrícolas, aunque no pudo comprobarse en campo. Como vemos en la [tabla 2](#), hay un gran porcentaje de acuerdo entre las dos fuentes, si bien el perímetro GPS considera como quemadas 757 has que no se han identificado como tales en la imagen, las cuales se deben poner en relación con el efecto de los parches interiores, incluidos como incendio en el vuelo GPS aunque en realidad no fueran afectados por el fuego.

Para la parte quemada correspondiente a la comunidad de Madrid, disponíamos de un perímetro de mayor detalle, realizado mediante GPS sobre el terreno. Como vemos en la [figura 9](#) el ajuste al área determinada como incendio en la imagen es mucho más adecuado que el obtenido a partir del GPS montado en helicóptero, ajustándose mucho mejor el trazado a las áreas observables como quemadas en la imagen. El ajuste es especialmente nítido en lo que se refiere a las islas interiores, que es un factor crítico en la valoración global del área quemada. Teniendo en cuenta en alto coste de realizar el inventario GPS de campo, se confirma la oportunidad de utilizar imágenes de satélite en este tipo de aplicaciones.

#### 4.5. Evaluación de cubiertas afectadas: Clasificación de la imagen pre-incendio

Para el área quemada, la [figura 10](#) incluye los resultados de la clasificación supervisada realizada con la imagen previa al incendio. Se han discriminado las siguientes categorías: encinares, coníferas, cuerpos de agua, matorral, pastos, suelo desnudo y caducifolias. El resultado se verificó a partir de matrices de confusión obtenidas cruzando los resultados con puntos de muestreo extraídos de la interpretación visual de la imagen en color compuesto, obteniéndose una fiabilidad superior al 85%. Como puede observarse, el área afectada está compuesta principalmente por vegetación arbórea, pinares y encinares en su mayor parte, con algunos pasillos de caducifolias en las vaguadas. Es asimismo relevante la presencia de áreas de cultivo, destacando en la parte superior del área de estudio, en donde se encuentran imbricados viñedos, pequeños huertos y manchas arboladas. Dicha disposición motiva que en este sector el incendio muestre un comportamiento aparentemente caótico, con múltiples espacios interiores poco o nada afectados. La situación es similar en el sector meridional de la zona de estudio, próxima a Escalona.

## 5. Conclusiones

Este trabajo pretendía plantear algunos métodos sencillos para cartografiar áreas quemadas a partir de imágenes Landsat-ETM+. En función de los resultados obtenidos, podemos concluir que los índices espectrales más idóneos para delimitar área quemada sobre imágenes post-incendio son el NBR y el IAQ, entre los ensayados, con una buena relación entre los errores de omisión y comisión. El análisis multitemporal permite solventar algunos problemas que plantean estos índices, especialmente con láminas de agua y espacios en sombra. El análisis de componentes principales



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

multitemporal también se ha revelado de gran interés para esta temática, especialmente cuando el incendio ocupa un amplio sector de la imagen, como era nuestro caso.

En cuanto a las técnicas aplicadas, los umbrales simples en la imagen post-incendio resultan una buena estrategia para discriminar el sector más nítido de área quemada; posteriormente, pueden aplicarse algunas técnicas de contexto para refinar esa primera delimitación. En cuanto a los posibles errores con cubiertas vecinas de baja reflectividad, la combinación del criterio mono y multi-temporal puede solventar esos problemas, especialmente con láminas de agua y zonas en sombra, siempre que las imágenes sean de fechas solares similares, o haya disponible un buen modelo digital del terreno para la corrección topográfica. Finalmente, puede ser conveniente aplicar algún filtro de contexto para eliminar pequeños grupos de píxeles aislados, que posiblemente sean consecuencia de ruidos aleatorios debidos al ajuste multitemporal entre imágenes.

### Agradecimientos

Este trabajo se elaboró inicialmente como proyecto fin de máster en el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, a cuyo personal y medios agradecen sinceramente los autores de este trabajo. El trabajo se ha realizado con el programa Geomatica, siguiendo el acuerdo institucional entre el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá y la empresa canadiense PCI Geomatics.

### Referencias bibliográficas

- Caetano, M. S., Mertes, L. A. K. y Pereira, J. M. C. (1994): "Using spectral mixture analysis for fire severity mapping", *2<sup>nd</sup> Int. Conf. Forest Fire Research*. Coimbra, pp. 667-677.
- Chavez, P. S. (1996): "Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 9, pp. 1025-1036.
- Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona, Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E. y Martín, M. P. (1994): "Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 5, pp.563-570.
- Chuvieco, E., Martín, M. P. y Palacios, A. (2002): "Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination", *International Journal of Remote Sensing*, 23, 23, pp. 5103-5110.
- Civco, D. L. (1989): "Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, 9, pp. 1303-1309.
- European Commission. (1993): *Corine land cover: Guide technique*. Luxemburgo, Office for official publications of the European Union.
- García, M. y Chuvieco, E. (2003): "Assessment of the potential of the SAC-C/Multispectral medium resolution scanner (MMRS) imagery for mapping burned areas", en Chuvieco, E., Martín M. P., y Justice, C. (Ed): *Proceedings of the 4th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Innovative concepts and methods in fire danger estimation*. Ghent University – EARSel, pp. 159-164.



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

- García-Haro, F. J., Gilabert, M. A. y Meliá, J. (2001), "Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data", *International Journal of Remote Sensing*, 22, 4, pp. 533-549.
- Justice, C. O., Giglio, L., et al. (2002): "The Modis fire products", *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 244-262.
- Koutsias, N., Karteris, M., Fernández, A., Navarro, C., Jurado, J., Navarro, R. y Lobo, A. (1999): "Burnt land mapping at local scale", en Chuvieco, E. (Ed): *Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean basin*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 123-138.
- Martín, M. P. (1998): *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá.
- Martín, M. P. y Chuvieco, E. (1995): "Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios forestales a partir de imágenes de satélite", *Ecología*, 9, pp. 9-21.
- Martín, M. P. y Chuvieco, E. (1998): "Cartografía de grandes incendios forestales en la península ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR", *Serie geográfica*, 7, pp. 109-128.
- Martín, M. P., Viedma, O. y Chuvieco, E. (1994): "High versus low resolution satellite images to estimate burned areas in large forest fires", *2nd International Conference on forest fire research*, Coimbra, pp. 653-666.
- Miller, H. J. y Yool, S. R. (2002): "Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal landsat TM and ETM data", *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 481-496.
- Patterson, M. W. y Yool, S. R. (1998): "Mapping fire-induced vegetation mortality using landsat thematic mapper data: a comparison of linear transformation techniques", *Remote Sensing of Environment*, 65, pp. 132-142.
- Pausas, J. G. y Vallejo, V. R. (1999): "The role of fire in european mediterranean ecosystem", en Chuvieco, E. (Ed.): *Remote sensing of large wildfires in the european mediterranean basin*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 3-16.
- Rogan, J. y Franklin, J. (2001): "Mapping wildfire burn severity in southern California forests and shrublands using enhanced thematic mapper imagery", *Geocarto International*, 16, 4, pp. 89-99.
- Rogan, J. y Yool, S. R. (2001): "Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo mountains, Arizona and New Mexico", *International Journal of Remote Sensing*, 22, 16, pp.3101-3121.
- Roy, D., Lewis, P. E. y Justice, C. O. (2002): "Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data-a bi-directional reflectance model-based expectation approach", *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 263-286.
- Siljeström, P. y Moreno, A. (1995): "Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data", *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1577-1587.
- Stroppiana, D., Pinnock, S., Pereira, J. M. C. y Grégorie, J. M. (2002): "Radiometric analysis of SPOT-vegetation images for burnt area detection in northern Australia", *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 21-37.
- Trigg, S. y Flasse, S. (2001): "An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah", *International Journal of Remote Sensing*, 22, 13, pp. 2641-2647.
- Vázquez, A., Cuevas, J. M. y González-Alonso, F. (2001): "Comparison of the use of wifs and liss images to estimate the area burned in a large forest fire", *International Journal of Remote Sensing*, 22, 5, pp. 901-907.
- Vélez, R. (2000): *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. Madrid, McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U.



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

**TABLAS**

**Tabla 1: Matriz de autovectores para el análisis multitemporal con componentes principales**

	Bandas Imagen 2002						Bandas Imagen 2001					
	1	2	3	4	5	7	1	2	3	4	5	7
<b>CP 1</b>	0.115	0.159	0.232	0.154	0.331	0.265	0.142	0.205	0.310	0.144	0.553	0.468
<b>CP 2</b>	0.100	0.195	0.224	0.774	0.142	-0.085	0.016	0.048	0.016	0.316	-0.317	-0.269
<b>CP 3</b>	0.209	0.222	0.277	-0.228	0.410	0.510	0.037	-0.018	-0.028	-0.416	-0.376	-0.181
<b>CP 4</b>	-0.161	-0.135	-0.086	0.267	0.429	0.016	-0.324	-0.426	-0.502	-0.198	0.339	0.005

**Tabla 2. Tabulación cruzada entre la superficie quemada obtenida a partir de la imagen ETM+ y la obtenida por técnicas GPS (en hectáreas)**

Perímetro GPS		Imagen ETM+		
		No Incendio	Incendio	Total
	No Incendio	18384.56	32.06	18416.63
	Incendio	757.25	1226.13	1983.38
	Total	19141.81	1258.19	20400.00



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

## FIGURAS

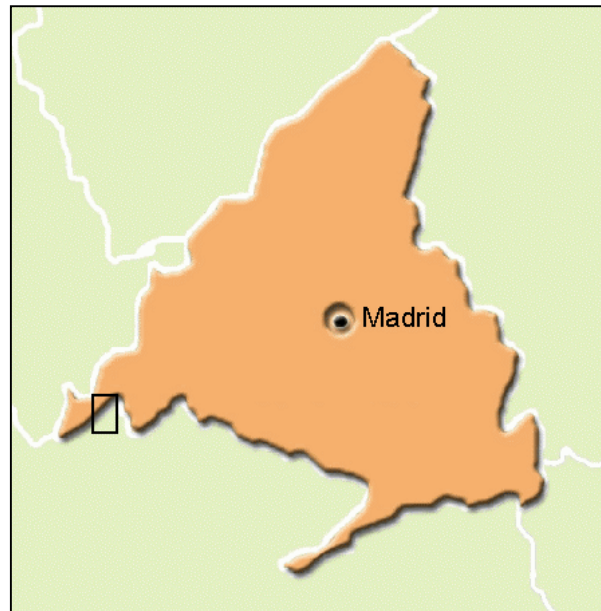


Figura 1. Área de estudio

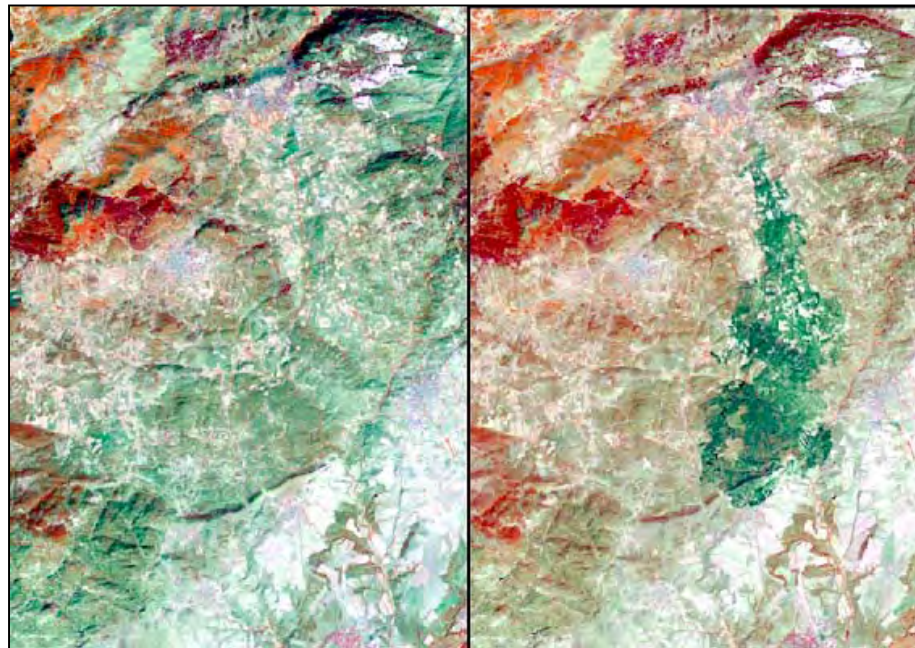
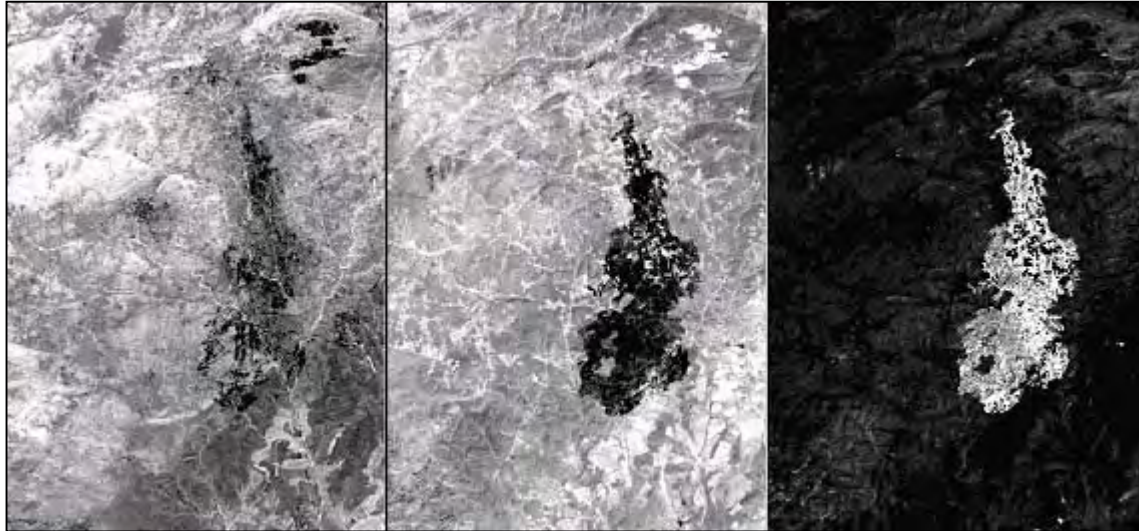
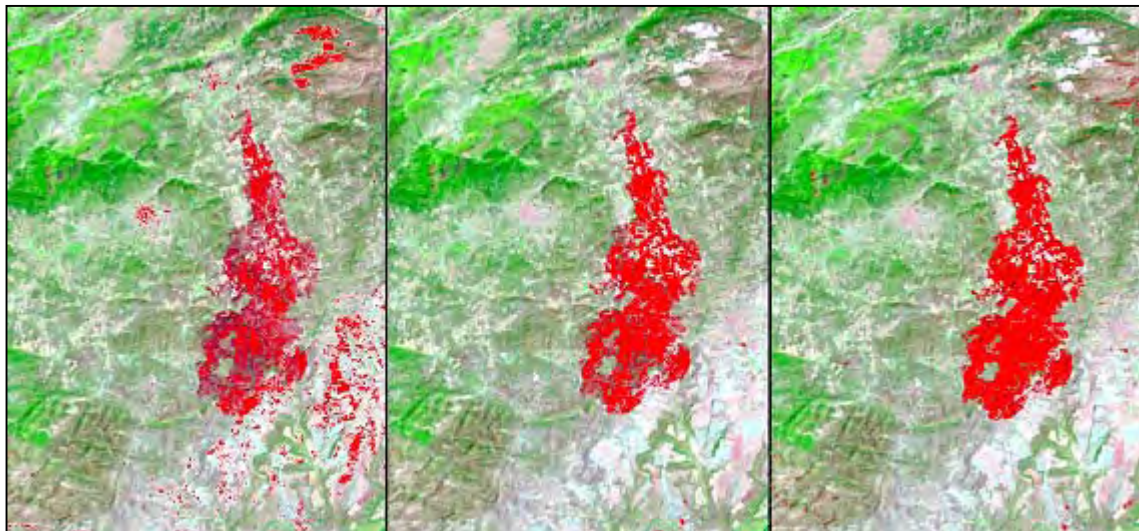


Figura 2. Composición en color de las bandas 4/5/3 de la imagen anterior (izda.) y posterior (dcha.) al incendio

Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157



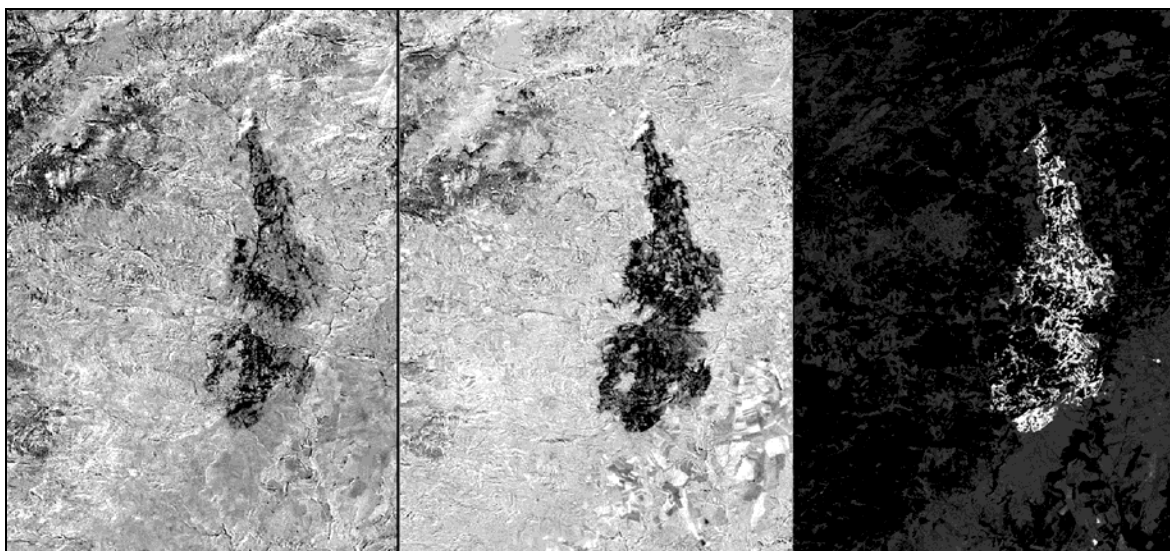
**Figura 3. Índices espectrales calculados para la imagen post-incendio. De izquierda a derecha, el NDVI, NBR e IAQ.**



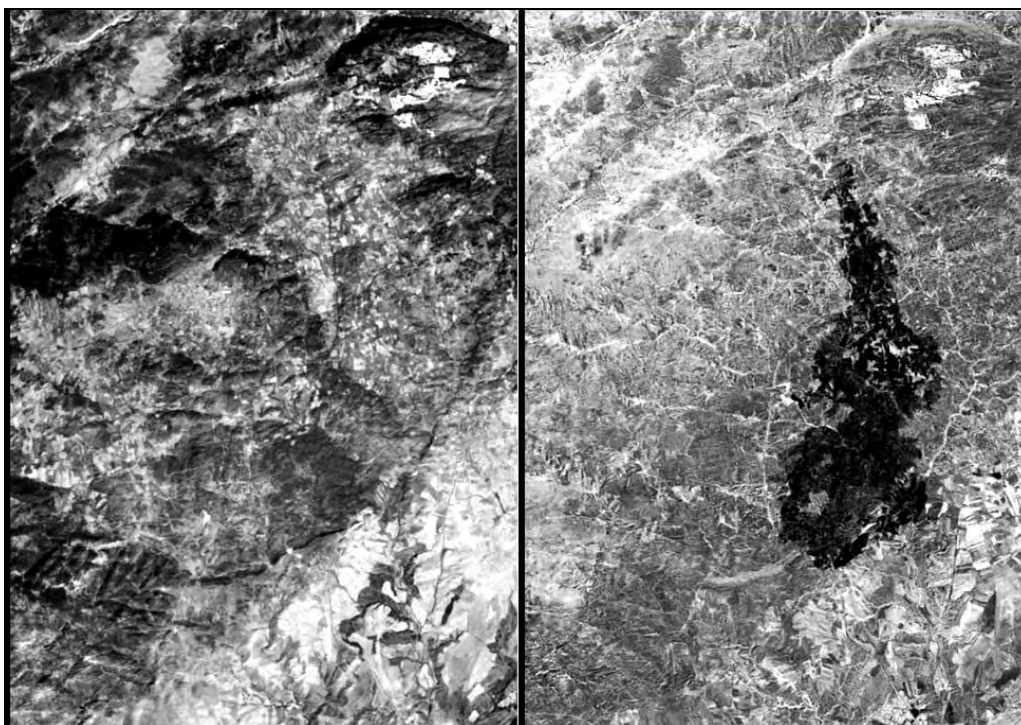
**Figura 4. Identificación del área quemada, en color rojo, a partir de umbrales simples en la imagen post-incendio. De izquierda a derecha, NDVI, NBR e IAQ. Se ha incluido una composición multibanda 7/4/3 para facilitar la interpretación.**



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157



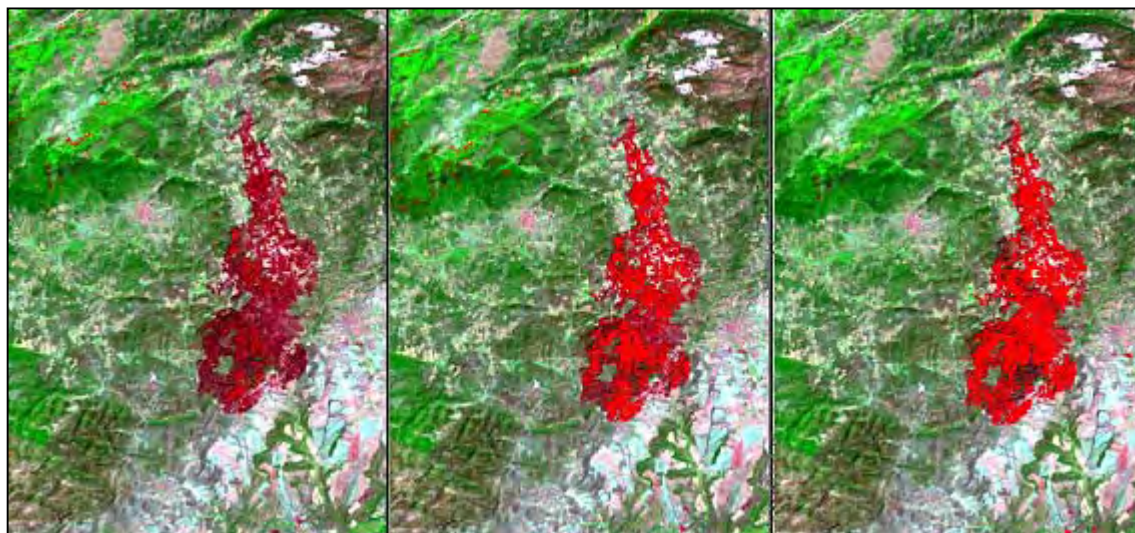
**Figura 5. Diferencia multitemporal entre índices espectrales.** De izquierda a derecha, NDVI, NBR e IAQ.



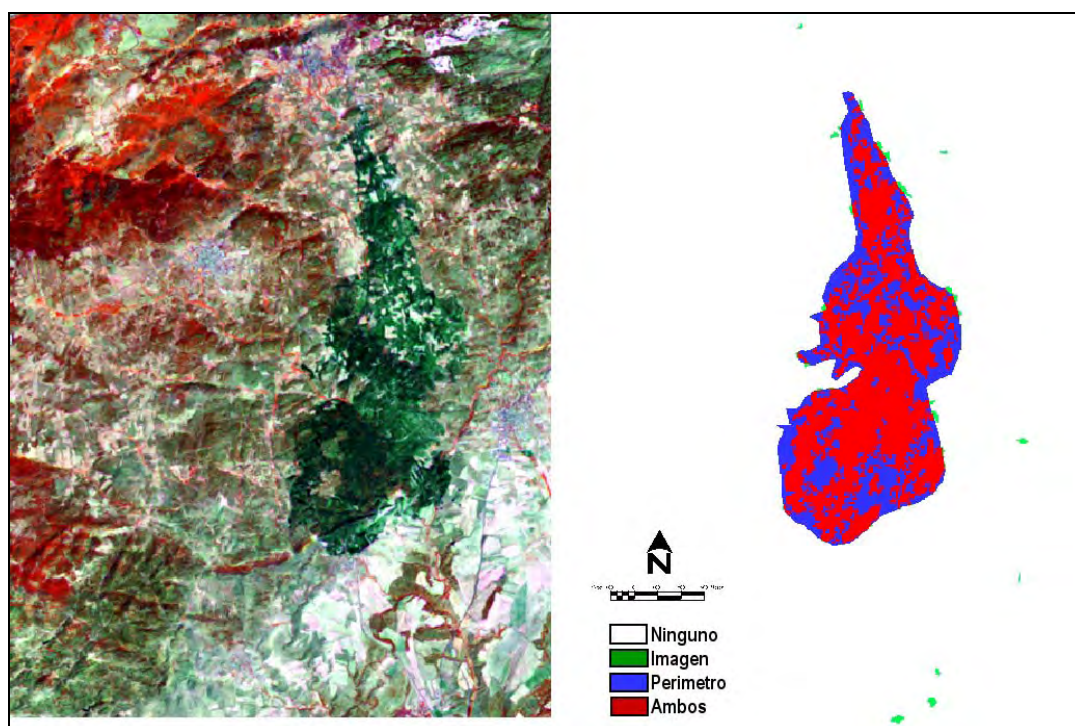
**Figura 6. Primer y segundo componente principal para el archivo multitemporal**



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157

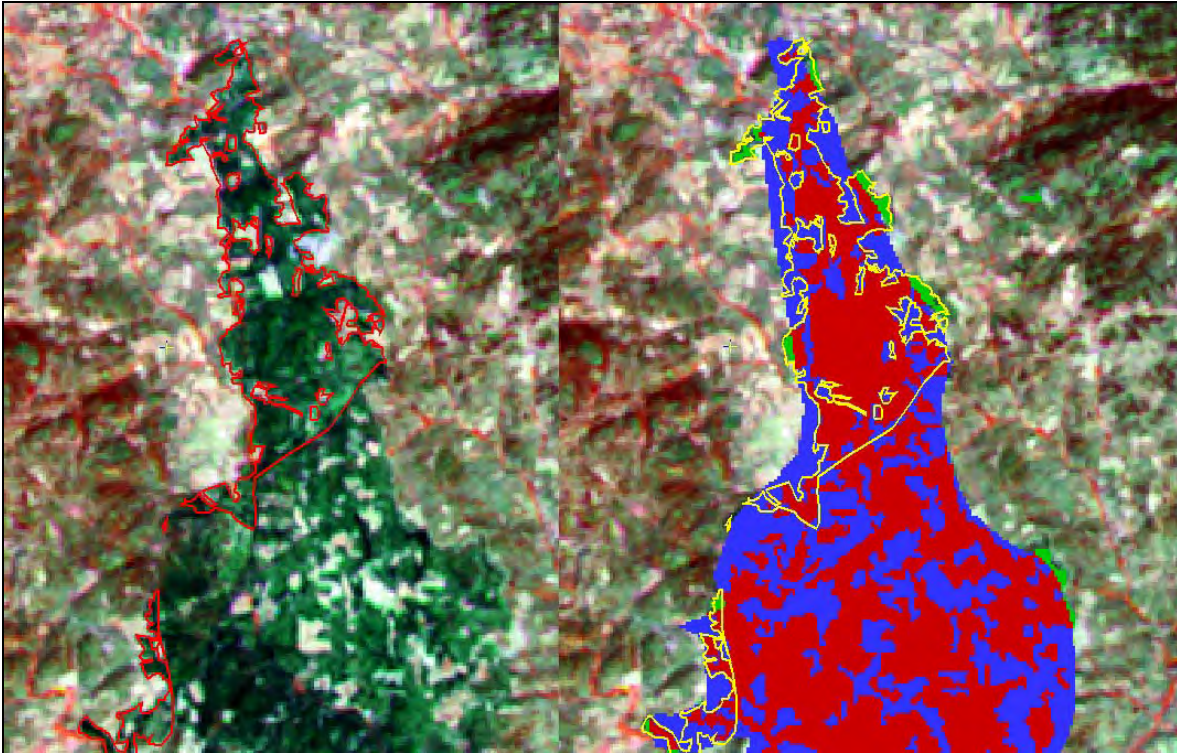


**Figura 7. Identificación del área quemada, en color rojo, a partir de umbrales simples en la diferencia multitemporal.** De izquierda a derecha, NDVI, NBR y segundo componente principal. Se ha incluido una composición multibanda 7/4/3 para facilitar la interpretación.



**Figura 8. Imagen post-incendio en falso color y resultados de los umbrales múltiples.** Se comparan estos resultados con el perímetro GPS facilitado por la Dirección General del Medio Natural de la Comunidad de Madrid.

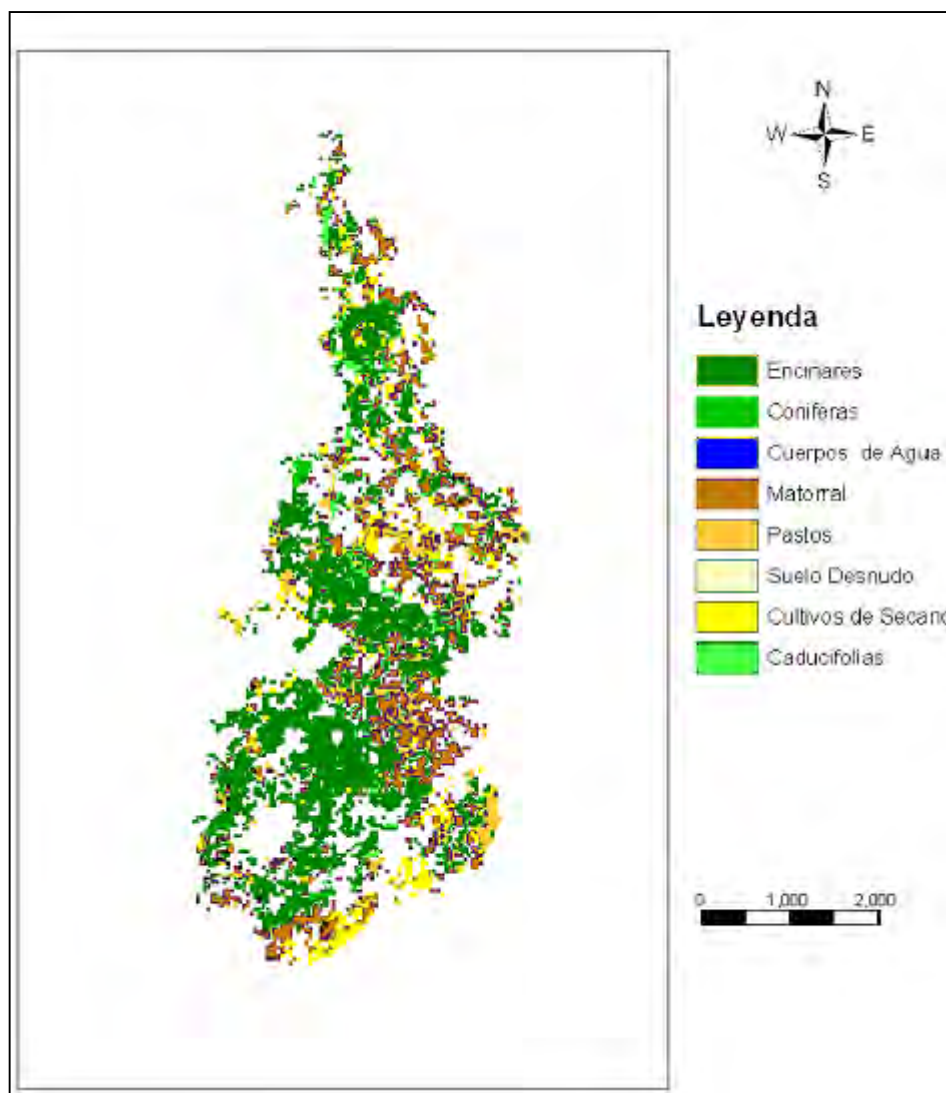
Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157



**Figura 9. Comparación entre el perímetro GPS generado sobre el terreno con la delimitación realizada sobre la imagen.** A la izquierda se sitúa el perímetro (en línea roja) sobre la imagen post-incendio en falso color. A la derecha en amarillo sobre la delimitación realizada a partir de la imagen (en rojo) y sobre el perímetro GPS de helicóptero (azul).



Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W. y Chuvieco, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 216-234. ISSN: 1578-5157



**Figura 10. Coberturas del suelo afectadas por el incendio.**