

Sinergias Entre el Modelo de Mezclas Espectrales y el Análisis de Imágenes Basado en Objetos en el Estudio de Incendios Forestales

Synergies Between Linear Spectral Mixture Analysis and Object-Based Image Analysis to Study Forest Fires

Carmen Quintano ¹

Óscar Fernández-Manso ²

Alfonso Fernández-Manso ³

Joaquín Ramírez ⁴

Resumen

Las metodologías unitemporales habitualmente utilizadas para cartografiar el área afectada por un incendio forestal se basan en la clasificación de una imagen NDVI post-incendio; sin embargo, presentan algunas limitaciones. Este trabajo propone una metodología basada en el empleo conjunto del Modelo de Mezclas Espectrales (*Spectral Mixture Analysis - SMA*) y el análisis de imágenes basado en objetos (*Object-Based Image Analysis - OBIA*), con la finalidad de minimizar estos problemas. Por una parte, SMA, que trabaja a nivel subpíxel, posibilita minimizar las confusiones originadas por la influencia del suelo; y, por otra, OBIA, trabajando a nivel suprapíxel, permite considerar características no espectrales tales como la forma y la textura. La imagen fracción vegetación quemada, obtenida al descomponer espectralmente una imagen *Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+*, posterior al incendio considerado, fue la entrada de un clasificador orientado a objetos que empleó dos niveles de segmentación. La precisión de los resultados obtenidos utilizando esta metodología en el incendio ocurrido

¹ Universidad de Valladolid, Departamento de Tecnología Electrónica, Escuela Universitaria Politécnica, C/ Francisco Mendizábal, 1, 47014-Valladolid. España. E-mail: menchu@tele.uva.es

² Agencia de Protección Civil e Interior. Consejería de Presidencia y Administración Territorial. Junta de Castilla y León, C/García Morato, 24, 47071-Valladolid. España. E-mail: ofernandez@cyll112.com

³ Universidad de León, Grupo de investigación IPR-Ingeniería y Planificación Rural, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. A/ Astorga, s/n, 24400-Ponferrada. España. E-mail: alfonso@unileon.es

⁴ Tecnosylva, SL. CEEI (Centro Europeo de Empresas e Innovación). Polg. Onzonilla, 24231-León. España. E-mail: joaquin@tecnosylva.com

entre los días 13 y 17 de septiembre de 1998 en Tabuyo del Monte – León-España (3.309 ha), es muy prometedora, indicando sinergias entre ambos métodos, y con un gran potencial para la cartografía de áreas quemadas y estimación de niveles de severidad.

Palabras clave: teledetección; incendios forestales; *unmixing*; clasificación orientada a objetos.

Abstract

Unitemporal methodologies used to mapping burned area are usually based on post fire NDVI image classification; nevertheless they present several limitations. In order to minimize these deficiencies, this work shows a methodology based on Spectral Mixture Analysis (SMA) and Object-Based Image Analysis (OBIA). On the one hand, SMA, working at subpixel level, permits minimise the errors due to soil influence. On the other hand, OBIA, working at suprapixel scale, allows to consider not only spectral characteristics but also form and texture. The burned vegetation fraction image, obtained by unmixing a Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) post fire image, was the input to a two segmentation levels OBIA. The results accuracy obtained applying this methodology on the study of the forest fire occurred between 13th-17th September 1998 in Tabuyo del Monte (León-Spain) (3,309 ha) was very promising, showing synergies between SMA and OBIA and a great potential to burned area mapping and severity estimation.

Key words: remote sensing; burned areas; unmixing; object-oriented classification.

Introducción

La teledetección representa un papel importante en el sistema de gestión de incendios ya que permite obtener, de forma sencilla y rápida, la información que necesita el sistema (KLAVER y SINGH, 1998). Las imágenes de satélite, junto con los programas que las analizan, están sustituyendo el trabajo de campo necesario para conseguir los datos requeridos principalmente por dos razones: 1.- la rapidez de adquisición permite implementar sistemas de vigilancia que trabajan en tiempo real, o *cuasi* real, 2.- la adquisición de información resulta sensiblemente más económica siendo su nivel de fiabilidad equivalente. Una vez que el incendio ha sido extinguido, para analizar la extensión de la superficie afectada y la intensidad con que lo ha sido, puede utilizarse una combinación de

imágenes de baja y alta resolución espacial. De esta forma, podrá realizarse una estimación de los daños producidos tanto directos como indirectos (desaparición de bosques, disminución de turismo,...). Asimismo, es posible realizar un seguimiento de la regeneración de las masas forestales, que, entre otras cosas, servirá para actualizar los mapas de cubiertas de vegetación a partir de los cuales se definen los índices de peligro y riesgo, cerrándose así el ciclo del fuego.

Atendiendo a la metodología empleada para cartografiar el área dañada por un incendio forestal así como los niveles de daño ocasionados, existen dos grandes alternativas: el enfoque unitemporal y el multitemporal. El primero utiliza una única imagen posterior al fuego, y mediante diferentes transformaciones y clasificaciones de la imagen original obtiene una estimación del área afectada. La segunda alternativa se basa en comparar dos imágenes de satélite, una anterior al fuego y otra posterior, mediante técnicas de detección de cambios, para obtener dicha estimación. En este trabajo se utilizará un enfoque unitemporal.

Las metodologías unitemporales habitualmente utilizadas para cartografiar el área afectada por un incendio forestal se basan en la clasificación de una imagen índice de vegetación de diferencia normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*) post-incendio. Sin embargo, dichas metodologías presentan una serie de limitaciones, ya que la imagen NDVI se ve influenciada en gran medida por el suelo, lo que puede ocasionar confusiones entre zonas quemadas y otras cubiertas (PEREIRA, 1999; ELMORE et al., 2000). El empleo del *Spectral Mixture Analysis - SMA* puede reducir estas confusiones. Existen diversos trabajos en los que se utilizan las imágenes fracción como entrada a diferentes algoritmos de clasificación con el objetivo de cartografiar el área afectada por un incendio forestal (COCHRANE y SOUZA, 1998; SÁ et al., 2003; QUINTANO et al., 2005a). En ellos, de forma general, los resultados obtenidos aplicando *unmixing* como etapa previa a la clasificación han sido aceptables y motivadores, superando en muchos casos los obtenidos utilizando imágenes NDVI. Sin embargo, respecto a la cartografía de los niveles de severidad, existe un menor número de trabajos, en parte debido a la dificultad de obtener datos fiables sobre el terreno y en parte debido a la necesidad de trabajar con imágenes de cierta resolución espacial. Respecto a la etapa de clasificación, la clasificación orientada a objetos permite mejorar los resultados del método convencional ya que utiliza información espacial además de la espectral. Existen algunos trabajos (Mitri y Gitas, 2002; Quintano et al., 2006) que muestran que la segmentación como etapa previa a la clasificación mejora los resultados obtenidos al cartografiar áreas incendiadas.

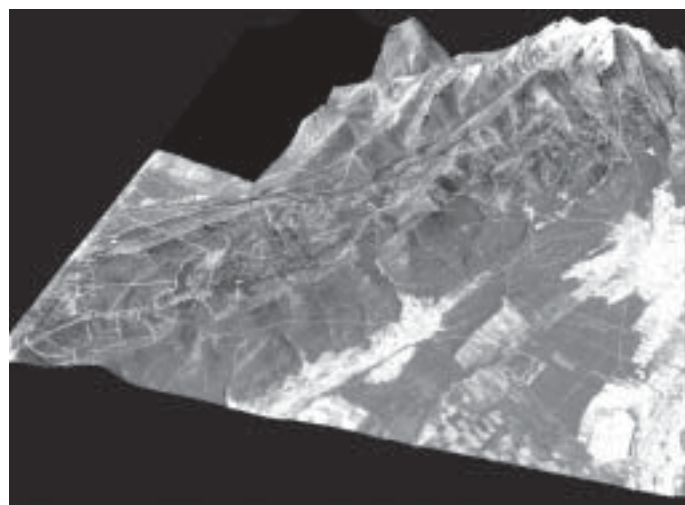
En este trabajo se presenta una metodología basada en el empleo conjunto de SMA y *Object-Based Image Analysis - OBIA*. De esta forma, SMA, que trabaja a nivel subpíxel, permitirá minimizar las confusiones originadas por la influencia del suelo; y

OBIA, trabajando a nivel suprapíxel, permitirá considerar características no espectrales tales como la forma y la textura, mejorando los resultados de la clasificación convencional. La zona de estudio elegida ha sido el gran incendio forestal de Tabuyo del Monte (León-España) (figura 1), siendo el principal objetivo validar la metodología propuesta para cartografiar el área afectada por dicho incendio y definir los niveles de afectación a partir de imágenes *Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)*.

Figura 1. Mapa de situación (a) y Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio (b)



a) mapa de situación



b) modelo 3D de la zona

Material y Metodo

Zona de Estudio

El estudio se ha realizado en el gran incendio forestal ocurrido en Tabuyo del Monte (León, España) que tuvo lugar entre las días 13 y 17 de septiembre de 1998 y que afectó a 3.309 ha (según la estimación oficial realizada mediante *GPS* y helicóptero).

Tabuyo del Monte está situado en la Sierra del Teleno, que es una pequeña cadena montañosa en el sureste de la provincial de León (España). Su orientación es sureste, la altitud está comprendida entre 850 a 2.188 m, y la mayor pendiente es del 11%. El nivel de precipitaciones anual se sitúa entre 650 a 900 mm con una temperatura media de 15 °C. La vegetación existente es bosque de *Pinus pinaster* Ait., con una extensión de aproximadamente 11.500 ha, con algunos ejemplares aislados de *Quercus pyrenaica* Willd. y *Pinus sylvestris* L.

Material

Se ha utilizado una imagen *Landsat ETM+* post incendio, adquirida el 16 de septiembre de 1999 que cubre el área de trabajo (órbita 203/punto 31. Asimismo se cuenta con el perímetro del incendio digitalizado mediante *GPS* y con los límites de los distintos niveles de severidad con que la zona fue afectada, y con una ortofoto tomada el día 18 de septiembre de 1998 (un día después de que el incendio fuera extinguido).

Metodo

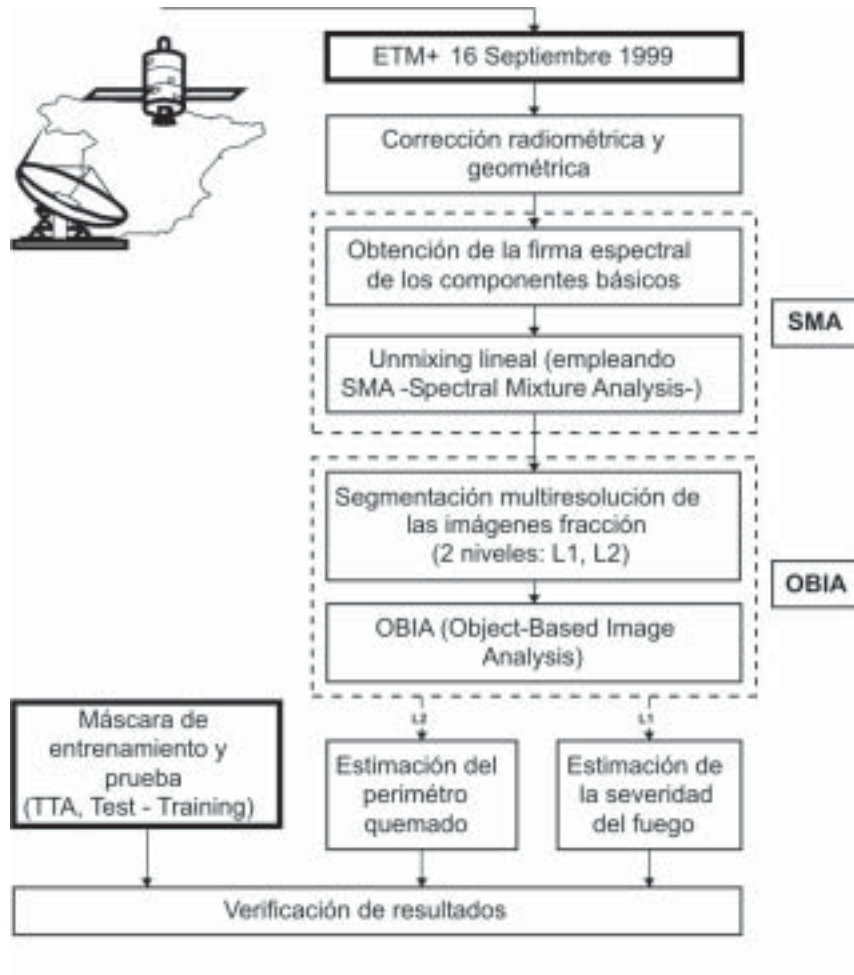
La metodología propuesta se basa en el empleo conjunto de *SMA* y *OBIA*. En la mayor parte de las aplicaciones relacionadas con incendios forestales se emplean las imágenes *NDVI* como sinónimo de nivel/estado de la vegetación, sin embargo, estas imágenes no siempre proporcionan la precisión requerida, ya que se ven influenciadas en gran forma por el suelo y la sombra existentes. Por este motivo, este trabajo busca en la aplicación del Modelo de Mezclas Espectrales a las imágenes originales una alternativa al empleo de imágenes *NDVI*, basándose en la existencia de algunos trabajos previos relacionados con el estudio de la vegetación y el empleo del modelo de mezclas espectrales (NOVO y SHIMABUKURO, 1997; DÍAZ-DELGADO y PONS, 1999; RODRIGUEZ-YI et al., 2000).

Por otra parte, y a diferencia de las técnicas clásicas de procesado de imágenes de satélite, la unidad básica de procesado en *OBIA* son los objetos (o segmentos) de la imagen y no los píxeles individuales, ya que el algoritmo de clasificación actúa sobre objetos,

permitiendo la identificación de objetos reales, correctamente definidos tanto en forma como en clase temática. Estos resultados no pueden ser obtenidos mediante un clasificador tradicional orientado a píxel (BAATZ y SCHÄPE, 1999).

Este trabajo trata de mostrar la sinergia entre las dos técnicas antes mencionadas: SMA y OBIA, demostrando que el resultado de la aplicación conjunta de ambas, es superior a la aplicación de una de ellas, y mostrando que el empleo de imágenes fracción como entrada del algoritmo OBIA permite mejorar los resultados finales. Considerando estas ideas, la metodología propuesta puede concretarse en la figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Etapa 1. Preprocesado

Se realizó una corrección radiométrica y geométrica de la imagen original, no siendo necesario convertir los valores digitales a reflectividad, porque SMA puede aplicarse directamente sobre los números digitales (ND) originales.

Etapa 2. Análisis de mezclas espectrales

SMA es un método ampliamente utilizado para estimar las proporciones subpíxel de cada componente básico (*endmember*) considerado. En este trabajo, se considerará el proceso lineal, que para cada píxel de la imagen puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$DN_{\text{píxel}} = \sum (f_i DN_i) + e_{\text{píxel}}$$

Donde ‘ $DN_{\text{píxel}}$ ’ es el DN del píxel de la imagen que se está descomponiendo espectralmente, ‘ $e_{\text{píxel}}$ ’ es la diferencia entre el valor DN del píxel considerado y el modelado, ‘ f_i ’ son los coeficientes que minimizan el error y representan la proporción de píxel ocupada por el componente básico considerado, y ‘ DN_i ’ son los DN de cada componente básico considerado.

Antes de descomponer espectralmente los datos originales, es necesario definir las firmas espectrales de los componentes básicos. Estos espectros pueden ser considerados como puntos en un diagrama de dispersión n-dimensional, donde ‘n’ es el número de bandas (BOARDMAN et al., 1995), siendo sus coordenadas los valores de radiancia o reflectancia. La distribución de estos puntos en el n-espacio se utiliza para estimar el número de componentes básicos y su firma. Para poder visualizar los píxeles más puros sobre un diagrama de dispersión y obtener los componentes básicos, en este trabajo se aplicó el *Pixel-Purity-Index*TM (*PPI*TM), sobre la transformada *Minimum Noise Fraction* (*MNF*) de la imagen original. La transformación *MNF* permite eliminar el ruido de la imagen, determinando así la dimensión real de la misma, y reduciendo los requerimientos computacionales (BOARDMAN y KRUSE, 1994). Por su parte, *PPI*TM es un medio de localizar los píxeles más puros en imágenes multiespectrales o hiperspectrales. Tras identificar estos píxeles más puros, se aplicó la transformada inversa *MNF* a dichos píxeles y se verificó visualmente su respuesta espectral. Estos píxeles más puros correspondieron a los componentes básicos de la imagen.

Tanto la definición de los componentes básicos de la forma descrita, como la resolución del sistema de ecuaciones, se repitieron hasta que el error cuadrático medio (*Root Mean Square - RMS*) fue inferior a 1. Las imágenes fracción obtenidas de este modo fueron la entrada del siguiente paso de la metodología.

Etapas 3. Clasificación basada en objetos

El desarrollo de un modelo orientado a objetos implica dos etapas: segmentación y clasificación (MITRI y GITAS, 2002). Mediante el proceso de segmentación multinivel, todos los objetos de la imagen crean una red jerárquica, donde cada objeto conoce a sus súper-objetos y a sus sub-objetos (conservando así información contextual para análisis posteriores). Seguidamente se lleva a cabo una etapa de clasificación a nivel objeto.

En este trabajo, la estrategia para definir el área quemada y los niveles de severidad fue realizar una segmentación a dos escalas, para lo cual se creó una red jerárquica de objetos de dos niveles. En el nivel 2 (segmentación gruesa), los grandes objetos fueron clasificados como no quemados y posiblemente quemados sin clases relacionadas. Este nivel proporcionó el contexto para detectar las áreas quemadas en la imagen fracción y fue utilizado como información de súper-objetos para el nivel 1. En el nivel 1 (segmentación fina) los pequeños objetos se clasificaron en tres niveles de severidad (totalmente afectados, muy afectados, y afectados). A este nivel, la clasificación con clases relacionadas fue realizada utilizando la información del nivel 2. En ambas clasificaciones se emplearon funciones de pertenencia y reglas borrosas.

Etapas 4. Verificación de resultados

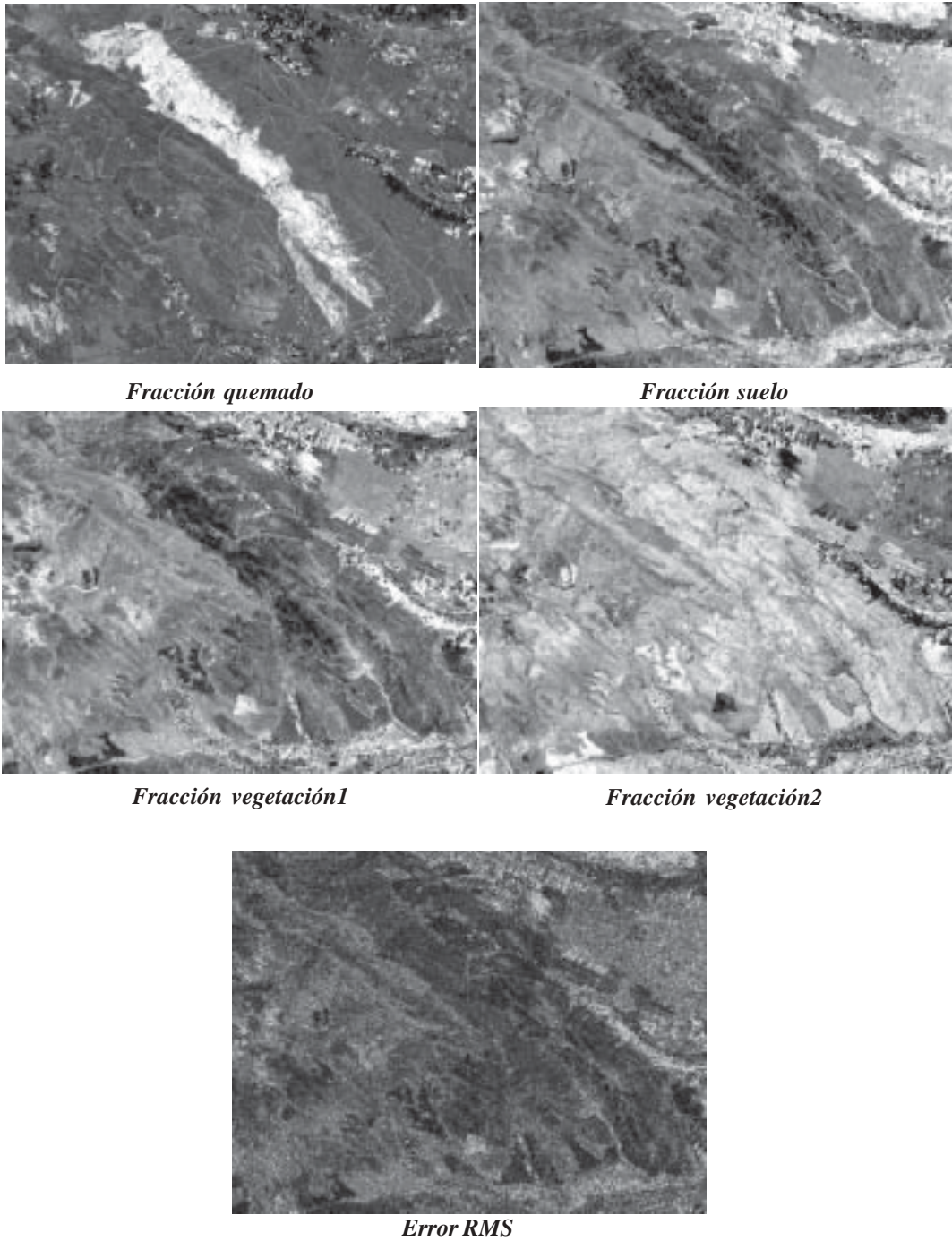
Es necesario conocer la estabilidad de la clasificación así como la capacidad de las clases definidas para extraer la información de la imagen. Para ello, además de los métodos clásicos de evaluación de resultados, se han utilizado técnicas específicas basadas en conceptos borrosos. En este trabajo, la precisión de la imagen clasificada fue verificada mediante datos de campo recogidos en la ortofoto y el perímetro oficial calculado mediante *GPS*. De esta forma, se calcularán la precisión de usuario, de productor, así como el estadístico Kappa (CONGALTON y GREEN, 1999).

Por otra parte, se compararon los resultados obtenidos aplicando conjuntamente *SMA* y *OBIA* con aquellos obtenidos aplicando únicamente *SMA* u *OBIA*. Para ello, se utilizaron clasificadores convencionales con las imágenes fracción, así como *OBIA* con la imagen *NDVI*.

Resultados y Discusion

En este trabajo finalmente fueron considerados cuatro componentes básicos: quemado, dos tipos de vegetación sana y suelo. El componente sombra no se incluyó de forma explícita, pero sí de forma implícita ya que al resolver el sistema de ecuaciones la condición de suma unidad no fue incluida. Las imágenes fracción obtenidas se muestran en la figura 3.

Figura 3. Imágenes fracción



Por su parte, la imagen resultante de la clasificación orientada a objetos aparece en la figura 4. De acuerdo con la clasificación, la clase de severidad que ocupa mayor extensión es la de ‘totalmente afectada’ con 2.505 ha. La detección de la superficie total quemada mediante el modelo propuesto ha proporcionado muy buenos resultados (3.320 ha detectadas frente a 3.309 ha medidas mediante *GPS*).

Figura 4. Imagen clasificada y perímetro oficial



Respecto a la precisión de la clasificación orientada a objeto, la figura 5 muestra las matrices de confusión para ambos niveles. La precisión de la clasificación se estimó en 97,91 % para el nivel 1 y 98,90 % para el 2, y el estadístico Kappa en 95,29 % (nivel 1) y 93,38 % (nivel 2).

Figura 5. Matriz de confusión para los niveles 1 y 2

User \ Reference Class	full affectation	very high affectation	high affectation	Sum
Confusion Matrix				
full affectation	1877	29	7	1913
very high affectation	0	380	19	399
high affectation	0	0	324	324
unclassified	0	0	0	0
Sum	1877	409	350	
Accuracy				
Producer	1	0.929	0.9257	
User	0.9812	0.9524	1	
Heiden	0.9905	0.9406	0.9614	
Short	0.9812	0.8879	0.9257	
KIA Per Class	1	0.9164	0.9153	
Totals				
Overall Accuracy	0.9791			
KIA	0.9529			

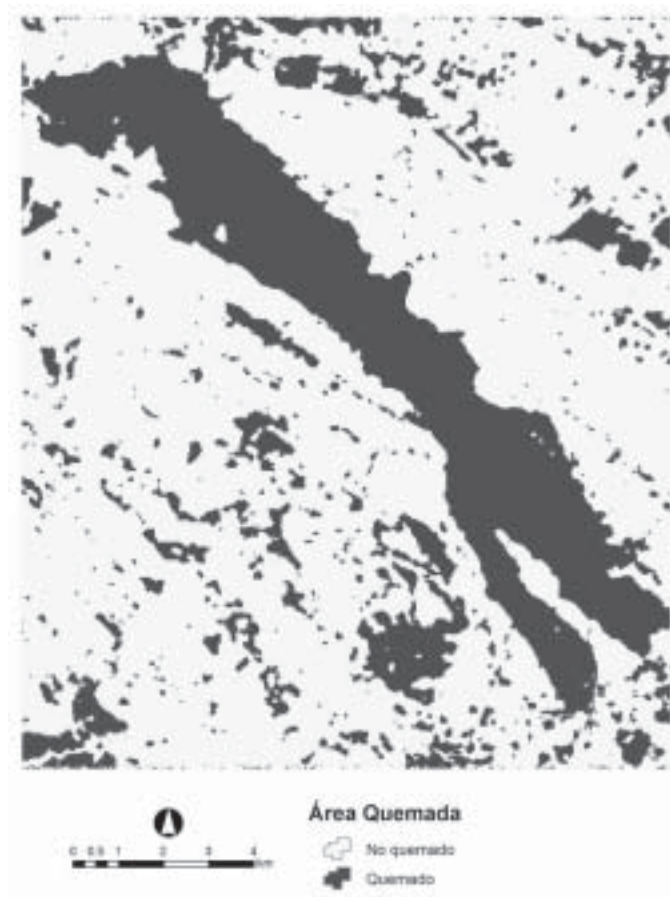
User \ Reference Class	not burned (2)	possibly burned	Sum
Confusion Matrix			
not burned (2)	366081	2575	368656
possibly burned	1902	34971	36873
unclassified	0	0	0
Sum	367983	37546	
Accuracy			
Producer	0.9948	0.9314	
User	0.993	0.9484	
Heiden	0.9939	0.9398	
Short	0.9879	0.8865	
KIA Per Class	0.9432	0.9246	
Totals			
Overall Accuracy	0.9890		
KIA	0.9338		

A la vista de los resultados obtenidos (desde un punto de vista absoluto), es posible afirmar que la metodología propuesta ha cartografiado tanto el perímetro del área afectada como los niveles de severidad con unos muy buenos niveles de precisión. Por otra parte, si se analizan desde un punto de vista relativo, comparando estos resultados con los obtenidos aplicando otras metodologías, es posible afirmar lo siguiente.

Este mismo incendio ha sido estudiado en otras ocasiones. Quintano et al. (2005b) cartografiaron el perímetro trabajando con imágenes fracción del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)* desde una perspectiva multitemporal. En aquel caso, se obtuvo un índice Kappa de 80% y el área afectada se estimó en 2.556 ha. Comparando ambos trabajos, es posible deducir que el empleo de imágenes *ETM+* ha permitido mejorar la precisión de la estimación del área quemada así como definir diferentes niveles de severidad. Por otra parte, el empleo de técnicas unitemporales ha evitado la necesidad de disponer y preprocesar dos imágenes.

Si consideramos los resultados obtenidos al realizar una clasificación convencional no supervisada de las imágenes fracción utilizando SMA pero no OBIA, es interesante observar que, debido a la aplicación de OBIA, la precisión de la clasificación ha aumentado considerablemente, posibilitando asimismo la identificación de los diferentes niveles de severidad. La figura 6 muestra gráficamente los resultados obtenidos al aplicar un clasificador K-means sobre la imagen fracción vegetación quemada. Los resultados obtenidos al aplicar otros clasificadores no supervisados, como ISODATA, fueron muy similares. También se hicieron pruebas variando el tipo de imagen fracción utilizada como imagen de entrada al clasificador, obteniendo siempre resultados semejantes (índice Kappa inferior al 75%).

Figura 6. Imagen clasificada utilizando SMA y K-means



Conclusion

La metodología propuesta, basada en el empleo conjunto de *SMA* y *OBIA* sobre datos *ETM+*, ha permitido cartografiar 3.320 ha como área incendiada frente a las 3.309 ha medidas mediante *GPS*. Además si se tiene en cuenta la identificación de los niveles de severidad con que dicha área fue afectada por el fuego, los estadísticos Kappa obtenidos fueron superiores a 93%. Aunque el trabajo está aún en sus etapas iniciales, estos resultados hacen posible afirmar que dicha metodología es válida y que tiene un gran potencial para extraer información de imágenes de satélite de resolución media.

Referencias

- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OPERATIONALIZATION OF REMOTE SENSING. 16-20th August, 1999. Enschede, Holland. *Proceedings of 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing*, Enschede, Ed. ITC, NL, 1999. (CD-ROM)
- BOARDMAN J.W.; KRUSE, F.A. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 9-12 mayo, 1994. Ann Arbor, Michigan. *Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, p. I-407 - I-418, 1994
- BOARDMAN, J.W. et al. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: Jplairborne Earth Science Workshop Summaries, 23-26 enero, 1995, Pasadena (CA-USA). *Proceedings of Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publication 95-1, v. 1, p. 23-26. 1995
- COCHRANE, M.A.; SOUZA, C.M. Linear mixture model classification of burned forest in the Eastern Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, p. 3433–3440, 1998.
- CONGALTON, R.G.; GREEN, J. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practice*. NY: Lewis publishers. 1999
- DÍAZ-DELGADO, R.; X. PONS. Empleo de imágenes de teledetección para el análisis de los niveles de severidad causados por el fuego. *Revista de Teledetección* (España), v. 12, p. 63-68, 1999
- ELMORE, A.J. et al. Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, v. 73, p. 87–102, 2000.

KLAVER, R.W.; SINGH, A. Global forest fire watch: wildfire potential, detection, monitoring and assessment. In: International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, 1-3 June, 1998. Orlando, Florida, USA. *Proceedings of the First International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*, Orlando, v. I, p. 230-237.

MITRI, G.H.; GITAS, I.Z. The development of an object-oriented classification model for operational burned area mapping on the Mediterranean island of Thasos using Landsat TM images. In: *Viegas. Forest Fire & Wildland Fire Safety*. Ed. Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0. 2002. p. 79 (abstract), paper en CD-ROM.

NOVO, E.; SHIMABUKURO, Y.E. Identification and Mapping of the Amazon Habitats Using a Mixing Model. *International Journal of Remote Sensing*. v.18, p. 663-670, 1997.

PEREIRA, J. A comparative evaluation of NOAA-AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.37, p. 217-226, 1999.

QUINTANO, C., et al. A spectral unmixing approach for mapping burned areas in Mediterranean countries. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, p. 1493-1498, 2005a.

QUINTANO, C., et al. La Teledetección aplicada al incendio de Tabuyo. El modelo de Mezclas Espectrales. En: *Restauración de áreas afectadas por grandes incendios. El caso particular del Teleno*. Ed. Centro para la defensa del fuego. Junta de Castilla y León. ISBN 84-9718-332-0. p. 91-104, 2005b.

QUINTANO, C., et al. Mapping burned areas in Mediterranean countries using spectral mixture analysis from a uni-temporal perspective. *Internacional Journal of Remote Sensing*, v. 27, p. 645-662, 2006.

RODRIGUEZ-YI, et al. Image segmentation for classification of vegetation using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, p. 167-172, 2000.

SÁ, A.C.L. et al. Assessing the feasibility of sub-pixel burned area mapping in miombo woodlands of northern Mozambique using MODIS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, p. 1783-1796, 2003.