

Estudio Comparativo de Índices Espectrales para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes MODIS

Comparative Analysis of Spectral Indices for Burned Land Mapping Using MODIS Images

I. Gómez Nieto, y M. Martín Isabel,
israel@ieg.csic.es

Instituto de Economía, Geografía y Demografía. Centro de Ciencias Humanas y Sociales, CSIC,
C/Albasanz 26-28, 28037, Madrid.

Recibido el 20 de noviembre de 2007, aceptado el 14 de mayo de 2008

RESUMEN

El objetivo de la presente comunicación es mostrar los resultados de un análisis comparativo de algunos de los índices espectrales propuestos en la literatura para la cartografía de áreas quemadas. Se trata de comprobar su consistencia operativa en imágenes MODIS a través de dos test. Los índices analizados han sido el BAI, BAIM, NBR y MIRBI. El primer test ha estado enfocado a establecer la capacidad de cada índice para discriminar espectralmente las zonas recientemente quemadas respecto a otras cubiertas de una misma imagen post-incendio. El segundo test, evalúa la capacidad de cada índice para identificar las áreas quemadas desde una perspectiva multi-temporal, es decir, comparando los valores espectrales previos y posteriores al incendio. Los resultados obtenidos muestran que el BAIM es el índice espectral que cumple mejor con el objetivo de discriminación, especialmente para análisis basados en imágenes post-incendio. El MIRBI, en cambio, resultaría más adecuado para los estudios multi-temporales

Palabras Clave: Cartografía área quemada, índices espectrales, MODIS

ABSTRACT

The aim of this paper is to show the results of a comparative analysis of some of the most commonly used spectral indices in burnt land mapping applications. The objective is to verify its operative consistency with MODIS data, throughout two successive tests. The analyzed indices were the BAI, BAIM, NBR and MIRBI.

The first test has been focused on establishing the discrimination ability of each index between the recently burned zones and other land covers using a post-fire image. The second test analyzes also the ability of each index to discriminate fires but from a multi-temporal analysis, that is to say, comparing the pre and post fire spectral information. Results show BAIM as the index with the best discrimination ability, especially in post-fire analysis. On the other hand, MIRBI would be more adequate in multi-temporal approaches.

Key Words: Burnt land mapping, spectral indices, MODIS

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Teledetección se ha convertido en una herramienta frecuente en el análisis de los incendios forestales y, en concreto, en la cartografía de áreas quemadas. La posibilidad que brinda de obtener

imágenes de diferentes resoluciones (temporal, espacial y espectral) la hace adecuada para este tipo de estudios. Las aportaciones realizadas hasta el momento por diversos autores demuestran la capacidad de los sensores comerciales actualmente operativos para localizar y delimitar las zonas afectadas por in-

cendios forestales (Roy *et al.*, 2002 y 2005; Grégoire *et al.*, 2003; Hudak y Brockett, 2004). La precisión de estas estimaciones dependerá, fundamentalmente, del tipo de imagen pero también del método utilizado. Una buena parte de las propuestas metodológicas que se pueden encontrar en la literatura, plantean la necesidad de llevar a cabo determinadas transformaciones de los datos espectrales originales para mejorar la capacidad de discriminación de las áreas quemadas. Las transformaciones más frecuentemente utilizadas son los índices espectrales (Malingreau *et al.*, 1985; Kasischke *et al.*, 1993; Kasischke y French, 1995; Martín y Chuvieco, 1998; Pereira, 1999; Trigg y Flasse, 2001; Barbosa *et al.*, 2002; Martín *et al.*, 2005). El objetivo de estos índices es realzar las diferencias espectrales de las zonas quemadas respecto a otras cubiertas, ya sea la vegetación previa al incendio, cuando la cartografía de áreas quemadas se basa en un análisis multitemporal (Kasischke *et al.*, 1993; Kasischke y French 1995; Martín y Chuvieco, 1993; Eva *et al.*, 1995; Barbosa *et al.*, 2002; García-Haro *et al.*, 2001) u otras cubiertas de la imagen cuando el análisis se realiza sobre imágenes post-incendio (Martín, 1998; Martín *et al.*, 2005). En este último caso interesa especialmente aumentar el contraste respecto a aquellas cubiertas que tienen un comportamiento espectral más similar al de las áreas quemadas y, por tanto, pueden provocar mayores confusiones, como las láminas de agua o las áreas en sombra (Chuvieco y Congalton, 1988; Koutsias *et al.*, 1999).

Algunos trabajos previos han abordado la comparación de diversos índices para demostrar su capacidad para discriminar áreas quemadas (Barbosa *et al.*, 2002; Martín *et al.*, 2005; Bastarrica y Chuvieco, 2006; Lasaponara, 2006). La mayor parte de estos trabajos utilizan alguna medida estadística como la distancia normalizada para cuantificar la separabilidad espectral entre zonas quemadas y no quemadas y establecen la idoneidad de los índices en función de dicha separabilidad. En esta línea, el presente trabajo pretende evaluar la idoneidad de alguno de los índices espectrales más frecuentemente utilizados en la cartografía de áreas quemadas. La principal novedad de este trabajo radica en que, en este caso, los índices serán evaluados tanto desde una perspectiva uni-temporal (eficacia en la discriminación entre categorías utilizando imágenes post-incendio) como multi-temporal (comparación de imágenes pre y post-incendio), evaluando su capacidad para discriminar una zona quemada respecto a la vegetación

previa al incendio. Se compararán cuatro índices espectrales utilizando como referencia imágenes de baja resolución espacial obtenidas por el sensor Terra-MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Los índices analizados son los siguientes:

1. *Burned Area Index* (BAI) (Martín, 1998). Específicamente diseñado para la cartografía de áreas quemadas a partir de datos del sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), basándose en los rasgos espectrales de los materiales carbonizados y de las cenizas producidos tras un incendio. El BAI se basa en el concepto de distancia euclidiana de cada píxel de la imagen a un punto de convergencia definido en un espacio bidimensional (cuyos ejes son la banda roja e infrarroja) que representa las características espectrales de las áreas recientemente quemadas. Por su definición como inversa de la distancia, el BAI tenderá a presentar valores altos en las zonas quemadas.

$$BAI = \frac{1}{(pc_{IRC} - \rho_{IRC})^2 + (pc_R - \rho_R)^2}$$

Donde, ρ_{IRC} y ρ_R son los valores de reflectividad en el infrarrojo cercano y en el rojo, respectivamente; pc_{IRC} y pc_R son los valores de convergencia para el infrarrojo cercano y el rojo, respectivamente; siendo $pc_{IRC} = 0,06$ y $pc_R = 0,1$.

2. *Burnt Area Index for MODIS* (BAIM) (Martín *et al.*, 2005). Es una adaptación del BAI a las características del sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). El BAIM se define igualmente como la inversa de la distancia euclidiana entre el valor de reflectividad de cada píxel de la imagen y el valor del punto de convergencia en un espacio espectral adecuado a las posibilidades ofrecidas por el sensor MODIS. En este sentido, se sustituye en la formulación del índice la reflectividad de la banda roja por la del infrarrojo de onda corta (SWIR), que en principio resulta más apropiada para la discriminación de áreas quemadas respecto a otras cubiertas (Trigg y Flasse, 2001; Martín *et al.*, 2005). Al igual que el BAI tiende a ofrecer los valores más altos en las zonas quemadas.

$$BAIM = \frac{1}{(pc_{ICR} - \rho_{IRC})^2 + (pc_{SWIR} - \rho_{SWIR})^2}$$

Donde, ρ_{IRC} y ρ_{SWIR} son los valores de reflectividad en el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta (bandas 2 y 7 en el caso de imágenes MODIS); ρ_{cIRC} y ρ_{cSWIR} son los valores de convergencia para el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, respectivamente; siendo $\rho_{cIRC} = 0,04$ y $\rho_{cSWIR} = 0,2$.

3. *Mid-Infrared Burnt Index* (MIRBI) (Trigg y Flasse, 2001). Diseñado para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes procedentes del sensor MODIS. Sus autores definen un índice cuyas isolíneas (líneas que unen los puntos con igual valor del índice) se orientan perpendicularmente al cambio espectral debido a la ocurrencia del incendio y paralelamente a otro tipo de cambios/factores que no interesa estimar. Tras un estudio de las bandas del sensor MODIS que ofrecen mayor separabilidad entre las cubiertas quemadas y no quemadas definen un índice basado en la recta de regresión sobre dichas bandas, en el que las zonas quemadas presentan los valores más altos del índice. Su formulación es la siguiente:

$$\text{MIRBI} = 10\text{LMIR} - 9,8\text{SMIR} + 2$$

Donde, SMIR es la banda 6 del producto diario de reflectividades del sensor MODIS (1.628-1.653 nm) y LMIR es la banda 7 (2.105-2.155 nm).

4. *Normalized Burnt Ratio* (NBR) (Key y Benson, 2005). Su expresión matemática es similar a la del cociente de vegetación normalizado (NDVI), pero sustituye la banda del rojo por la del SWIR. La diferencia entre ambas bandas ofrece el mayor contraste entre imágenes pre y post-incendio, especialmente en espacios con cubierta forestal. La banda correspondiente al IRC es muy sensible al contenido de clorofila lo que está en relación directa con la vitalidad de la planta; mientras que la región del SWIR comprendida entre los 2.080 y 2.350 nm es sensible a los cambios del contenido de agua (dicho rango coincide con la banda 7 del sensor Landsat para el que se diseñó, y es similar a la de la banda 7 del sensor MODIS, entre 2.105 y 2.155 nm, sobre la que se utilizará en este trabajo). Al contrario que el resto de índices, el NBR tenderá a ofrecer valores bajos en las zonas quemadas ya que, tras un incendio, se produce un descenso de la reflectividad en el infrarrojo cercano (Tanaka *et al.*, 1983; Ponzoni *et al.*, 1986; Frede-

ricksen *et al.*, 1990; López y Caselles, 1991; Pereira y Setzer, 1993) y un aumento en el SWIR (Trigg y Flasse, 2000 y 2001).

$$\text{NBR} = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}}$$

Donde, ρ_{IRC} es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano, y ρ_{SWIR} es la reflectividad en la banda del infrarrojo medio de onda corta.

MÉTODO

Para demostrar la eficacia de los índices espectrales antes mencionados en la cartografía de áreas quemadas a escala regional, resulta necesario establecer un criterio objetivo que estime su capacidad para discriminar este tipo de superficies. Para ello se definió un método integrado por dos pruebas o *test*:

- 1º Estimación de la capacidad de discriminación sobre una muestra extraída de una imagen MODIS post-incendio. Este test se centra en la perspectiva que denominamos *espectro-espacial*, es decir, evalúa la capacidad del índice para discriminar entre *quemado y no quemado* dentro de una misma imagen que recoge datos posteriores al incendio.
- 2º Comprobación de la consistencia teórica multi-temporal del diseño del índice. Con esta segunda prueba se valora la eficacia de los índices analizados desde la perspectiva que llamaremos *espectro-temporal*, esto es, el potencial que tienen para detectar las áreas quemadas a partir de los datos de dos imágenes, una anterior y otra posterior al incendio.

Ambas pruebas se efectuaron sobre datos del sensor Terra-MODIS, que ofrece información multispectral en 36 bandas discretas que van desde la región del visible hasta el infrarrojo térmico (405-14.385 nm) y una resolución espacial entre los 250 y 1.000 m. Estas características, unidas a la disponibilidad de datos diarios, hacen que sea adecuado para los estudios de carácter regional para los que está pensada la aplicación que se plantea en este estudio.

ANÁLISIS ESPECTRO-ESPACIAL

Este primer *test* estuvo enfocado a comprobar la sensibilidad del índice sobre una muestra de puntos

extraídos de una imagen MODIS y correspondientes a diferentes tipos de cubiertas del suelo, incluidas las áreas afectadas por incendios. Se trató, por tanto, de establecer la capacidad de cada índice para separar las zonas quemadas de otras cubiertas de una misma imagen posterior al incendio. Se utilizó como referencia un compuesto multitemporal de imágenes MODIS adquiridas sobre la Península Ibérica los días 15, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27 y 31 de agosto del año 2003, con una resolución espacial nominal de 500 m. El criterio usado para la selección de los píxeles que formaban el compuesto fue el de máxima temperatura de superficie diurna a partir del producto de reflectividades diario *MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 500m SIN Grid V004* y el de temperaturas *MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global 1Km SIN Grid V004* (<http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp>)¹. Sobre esta imagen se extrajeron los valores de reflectividad de las bandas 1 a 7 para una muestra formada por 4.500 píxeles correspondientes a nueve cubiertas diferentes. Si bien los índices analizados pretenden discriminar entre *quemado* y *no quemado*, dada la gran variedad de cubiertas “no quemadas” y su diverso comportamiento espectral se decidió realizar un análisis que diferenciara distintos tipos de cubiertas no quemadas, lo que, a su vez, permitiría identificar los posibles problemas de separabilidad que plantean los índices para cada una de ellas. Se consideraron las cubiertas del suelo más representativas del área de estudio tomando como referencia el mapa CORINE Land Cover 2000. Las categorías definidas fueron las siguientes: cultivos agrícolas (incluyendo tierras de secano, de regadío y cultivos leñosos), bosque de frondosas (perennifolias, caducifolias y marcescentes, frondosas de plantación, bosques de ribera, y sectores de mezcla), bosque de coníferas (tanto las de hoja de tipo acicular como de tipo cupresáceo), bosque mixto (mezcla de coníferas y frondosas), pastizales naturales, matorrales (incluyendo landas y matorrales mesófilos, vegetación esclerófila y matorral boscoso de transición), espacios abiertos con escasa o sin vegetación y láminas de agua. Para asegurar la calidad y representatividad de los datos se obtuvo una muestra aleatoria de 500 puntos por categoría. Esta muestra se obtuvo para un nivel de confianza de 0,95 y un error de muestreo

de 0,1, después de comprobar estadísticamente que se trataba de una distribución no normal de los datos.

La selección de los puntos de muestreo sobre espacios no quemados se realizó tomando como referencia los polígonos correspondientes a cada una de las categorías antes mencionadas de acuerdo al mapa CORINE-Land Cover del año 2000 (http://reports.eea.eu.int/COR0-part1/en/land_cover-Part1.pdf). De estos polígonos se eliminaron previamente las zonas quemadas desde el 1 de enero hasta el 31 de agosto de 2003 para evitar la selección fortuita en alguna de las categorías “no quemado” de píxeles que sí se vieron afectados por incendios en fechas próximas a la adquisición de las imágenes. Para minimizar, en la medida de lo posible, los efectos de borde (sectores de contacto entre categorías), se aplicó un buffer interior de 1 km a los polígonos del CORINE que servían de referencia para las extracciones.

La muestra de píxeles correspondientes a la categoría *quemado* se extrajo igualmente sobre el compuesto multi-temporal MODIS de agosto de 2003 a partir de los perímetros de incendios ocurridos a lo largo del mes de agosto en Cataluña y Andalucía, que nos fueron facilitados por los responsables autonómicos, y de Portugal, proporcionados por la *Direção Geral dos Recursos Florestais*. Esta selección garantizaba el análisis de áreas recientemente quemadas. Los perímetros utilizados como referencia para la localización de la muestra “quemado” fueron obtenidos mediante GPS (*Global Positioning System*), en el caso de España, e interpretación visual de imágenes Landsat TM, en el caso de Portugal. Al igual que con el resto de categorías se aplicó un *buffer* interior de 1 km a los polígonos con los incendios. La utilización del *buffer* minimiza los efectos de borde que pudiesen derivarse de posibles desplazamientos así como imprecisiones en la localización de los perímetros respecto a la imagen MODIS y, por tanto, garantiza que los píxeles seleccionados corresponden a zonas quemadas. La aleatoriedad de la muestra permite, al mismo tiempo, asegurar la representatividad de la misma respecto a la variabilidad espectral que habitualmente se observa en áreas afectadas por incendios y que es debida a diversos factores como el tipo de vegetación afectada, la severidad del incendio, etc.

En los estudios de escala regional y global se valoran mucho los resultados conservadores, es decir, aquellos que minimizan los errores de comisión o falsas detecciones (Brivio *et al.*, 2003). Por este mo-

¹ Para más información sobre el criterio de composición utilizado y su aplicabilidad a la cartografía de áreas quemadas ver Chuvieco *et al.* (2005).

tivo, el análisis *espectro-espacial* se centra en cuantificar las posibles confusiones que presentan los índices al discriminar áreas quemadas de otras cubiertas de la imagen cuando se impone la condición de detectar correctamente todos los puntos de la muestra correspondiente a la categoría *quemado*. Así pues, se considerarán como umbrales de detección para establecer la comparación los valores máximo y mínimo de cada índice para la categoría quemado (tabla 1). Los píxeles muestreados en las distintas categorías de no quemado cuyos valores queden incluidos dentro de dicho umbral serán considerados errores de comisión.

	Mínimo	Máximo
BAI	92,2	562,9
BAIM	61,7	628,2
MIRBI	1,6	2,4
NBR	-0,4	0,1

Tabla 1: Valores máximo y mínimo de la muestra de quemado para cada índice.

ANÁLISIS ESPECTRO-TEMPORAL.

Desde un punto de vista teórico, un índice espectral es adecuado a un cambio físico de interés si existe una relación simple entre el cambio y la dirección de desplazamiento en el espacio espectral definido (Roy *et al*, 2006). Por lo tanto, la definición de un índice espectral eficaz se identifica con el grado de perpendicularidad entre el vector de cambio y las isolíneas definidas por el propio índice sobre el espacio espectral utilizado en su formulación. Cuanto más se aproxime a dicha perpendicularidad, mayor será la consistencia teórica del índice desde una perspectiva multi-temporal (Roy *et al*, 2006). Por lo tanto, una aproximación lógica al diseño de un índice espectral pasa por establecer cómo las propiedades de la cubierta de interés afectan a sus características espectrales y, posteriormente, definir un índice cuyas isolíneas sean ortogonales a los desplazamientos que marcan el cambio en esa región del espectro (Verstraete y Pinty, 1996).

Sin embargo, en la práctica, este planteamiento no resulta tan sencillo, pues una serie de factores relacionados con la propia adquisición de los datos y con otros elementos externos afectan a las medidas de reflectividad propias de cada cubierta, y son considerados como ruido. Dichos factores de perturbación incluyen la contaminación atmosférica, las

variaciones en la reflectividad bidireccional, cambios en las condiciones de observación y cambios espectrales en la superficie no relacionados con los parámetros de interés (Roy *et al*, 2006).

De acuerdo con estos fundamentos, el análisis de la perpendicularidad de las isolíneas que definen un índice espectral respecto a la dirección del desplazamiento del cambio que pretende discriminar (en el espacio espectral correspondiente), servirá para determinar la capacidad teórica de dicho índice en la detección del cambio. En la figura 1 se esquematiza la situación de un índice espectral ideal (representado por las isolíneas azules paralelas) definido con el propósito de detectar un cambio teórico en una cubierta de interés, en un espacio bidimensional compuesto por dos bandas espectrales x e y. En este espacio se localizan dos puntos, que representan los valores pre y post incendio de una determinada cubierta. Como puede observarse, el vector de cambio que une los dos puntos anteriores forma un ángulo de 90° con las isolíneas del índice, es decir, son perfectamente perpendiculares lo que significa, según la literatura existente anteriormente mencionada, que el índice espectral es sensible únicamente al cambio producido por el incendio, no viéndose influido por ningún tipo de perturbación radiométrica que se reconocería en un alejamiento de la perpendicularidad y que se traduciría en una pérdida de su eficacia.

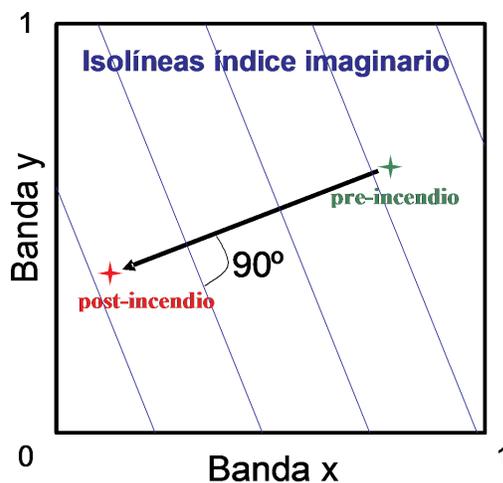


Figura 1: Esquema de perpendicularidad entre el vector de cambios que representa los valores pre y post incendio y las isolíneas de un índice teórico.

En este trabajo se evalúa la idoneidad teórica de los índices analizados para discriminar áreas quemadas en un análisis multi-temporal. Para ello se estimó el grado de perpendicularidad de cada uno de los índices analizados respecto al vector de cambio definido por valores pre y post incendio, extraídos de imágenes MODIS. La perpendicularidad se valoró a partir del cálculo del ángulo que forma el vector de cambio con la recta tangente a las isolíneas de cada uno de los cuatro índices. Según los fundamentos teóricos expuestos, cuanto más se aproxime el valor del ángulo a 90°, mayor será la idoneidad del índice para la discriminación de áreas quemadas a partir del análisis multi-temporal.

La definición de un vector ideal de *quemado* resulta compleja ya que depende del tipo de vegetación inicial y de las características del incendio. Por este motivo, el análisis se llevó a cabo sobre los 500 puntos de la muestra correspondientes a la categoría *quemado*, ya utilizada en el análisis *espectro-espacial*. Recordemos que este muestreo se realizó de forma aleatoria entre los perímetros de incendios disponibles en Portugal, Andalucía y Cataluña por lo que podemos considerarlo suficientemente representativo de la variedad geográfica del fenómeno, al menos en un ámbito regional como el que nos ocupa. Para cada uno de los píxeles muestreados se extrajo el valor de reflectividad (bandas 1 a 7) correspondiente a la situación pre y post incendio. Se utilizaron como referencia dos compuestos temporales de imágenes MODIS correspondientes a los meses de julio (situación pre-incendio) y agosto (situación post-incendio) de 2003. Se calcularon, para cada uno de los píxeles de la muestra, los vectores de cambio correspondientes. Estos vectores caracteri-

zan un rango amplio de situaciones de cambio, tanto en lo que se refiere al tipo de vegetación previa al incendio como a las características de la zona quemada (nivel de severidad). Finalmente, se calculó el promedio de los valores angulares de los 500 vectores para cada índice.

RESULTADOS

ANÁLISIS ESPECTRO-ESPACIAL

La tabla 2 muestra los resultados del análisis espectro-espacial en lo que se refiere a la estimación de los errores de comisión cuando se establece la condición de detectar el 100 % de la muestra de puntos quemados. Como puede observarse, las diferencias entre índices son importantes. Si tenemos en cuenta los valores promedio del error de comisión con todas las categorías de *no quemado*, el BAIM ofrece los mejores resultados con un nivel de confusión del 0,5 %, seguido a cierta distancia, por el BAI que presenta un error medio próximo al 12 %, muy similar al del MIRBI con un 14,5 %. El NBR presenta el error promedio de comisión más alto que se sitúa en el 20 %. Si analizamos los resultados por categorías, observamos que el BAIM no presenta confusiones (error de comisión igual a 0) con cuatro de las ocho categorías analizadas (cultivos agrícolas, bosque de frondosas, bosque mixto y pastizales naturales) mientras que con el resto el error de comisión es siempre inferior al 2 %. BAI, MIRBI y NBR presentan confusiones con, al menos, 7 de las 8 categorías, llegando a ofrecer, en algunos casos, errores de comisión superiores al 30 %.

%		BAI	BAIM	MIRBI	NBR
Detección de quemado		100,0	100,0	100,0	100,0
Error de comisión	Cultivos agrícolas	0,0	0,0	0,4	35,8
	Bosque frondosas	0,2	0,0	0,4	1,4
	Bosque coníferas	1,2	0,2	0,8	0,6
	Bosque mixto	1,2	0,0	1,0	0,0
	Pastizales naturales	0,8	0,0	0,0	24,2
	Matorrales	2,6	1,2	1,2	16,2
	Espacios abiertos con escasa o sin vegetación	7,2	0,4	15,2	48,8
	Agua	82,2	1,8	96,8	32,6
	Media aritmética del error de todas las categorías	11,9	0,5	14,5	20,0
	Media aritmética del error sin la categoría <i>agua</i>	1,9	0,3	2,7	18,1

Tabla 2: Errores de comisión por categorías con una detección del 100 % de los puntos de la muestra quemado.

Queda patente que, debido a su peculiar comportamiento espectral, muy similar al de las zonas recientemente quemadas, el *agua* es la clase más problemática en todos los índices, pero en especial en el MIRBI, pues prácticamente un 97 % de los píxeles extraídos de la imagen pertenecientes a la categoría agua quedaban dentro del rango de la categoría quemado. Un comportamiento muy similar presenta el BAI con errores de comisión en esta categoría superiores al 82 %. En una posición intermedia se encuentra el NBR mientras que el BAIM presenta el error más bajo (inferior al 2 %). Si eliminamos la categoría agua del cálculo del error de comisión medio, éste se reduce notablemente en el BAI (pasa del 11,9 al 1,9 %) y el MIRBI (del 14,5 al 2,7%) mientras que se mantiene muy similar en el NBR y el BAIM.

En cualquier caso, el BAIM sigue ofreciendo el mejor resultado. La categoría de *espacios abiertos con escasa o sin vegetación* ofrece también importantes confusiones, especialmente en el NBR que presenta prácticamente un 50 % de error de comisión. En el resto de categorías los errores de comisión son menores, por debajo del 3 % en todos los casos, salvo en el del NBR que mantiene errores altos en el *matorrales* (16,2 %), *pastizales naturales* (24,2%) y *cultivos agrícolas* (35,8 %).

Podemos concluir que, a la vista de los datos ofrecidos por este *test*, el BAIM es el índice espectral que mejores resultados ofrece, con claras diferencias respecto de los otros tres índices analizados no sólo porque presenta errores de comisión muy inferiores al resto “sino también” porque presenta confusiones con menos categorías. Esto es especialmente interesante si tenemos en cuenta que en los estudios de escala regional y global se valoran mucho los resultados conservadores, es decir, aquellos que minimizan los errores de comisión (Brivio *et al.*, 2003).

ANÁLISIS ESPECTRO-TEMPORAL.

Los resultados del análisis de perpendicularidad en el que se evalúa la idoneidad de los índices en estudios multi-temporales de acuerdo al método previamente descrito, se pueden observar en la tabla 3.

De los índices analizados, el que presenta un valor más próximo a la perpendicularidad (90°) que sería, en nuestro caso, el ideal teórico para un índice utilizado para discriminar el cambio producido por un incendio, es el MIRBI (83°), seguido por el BAIM y

Índice espectral	Ángulo (grados sexagesimales con fracción decimal)
BAI	55,58
BAIM	75,32
MIRBI	83,53
NBR	74,18

Tabla 3: Perpendicularidad de los índices. Valor promedio del ángulo correspondiente a la intersección entre el vector de cambio pre y post incendio de cada píxel muestreado y la recta tangente a las isolíneas de cada índice.

el NBR, ambos con valores muy próximos entre sí. En último lugar se sitúa el BAI con un valor angular de 55,58°. Estos resultados indican que, desde una perspectiva multi-temporal, el MIRBI es, de los índices analizados, el que más se aproxima al ideal teórico que estima la capacidad de un índice de ser sensible a la naturaleza del cambio que pretende medir e insensible a otros factores que lo distorsionan.

En las figuras 2, 3, 4 y 5 se han representado, en el espacio bi-espectral utilizado en el cálculo de cada uno de los índices analizados, la distribución de los valores extraídos de las imágenes pre- y post- incendio que corresponden a la muestra de 500 puntos utilizada en este análisis. Estos han sido los valores empleados para definir los vectores de cambio que han servido de referencia para calcular la perpendicularidad a las isolíneas de cada índice.

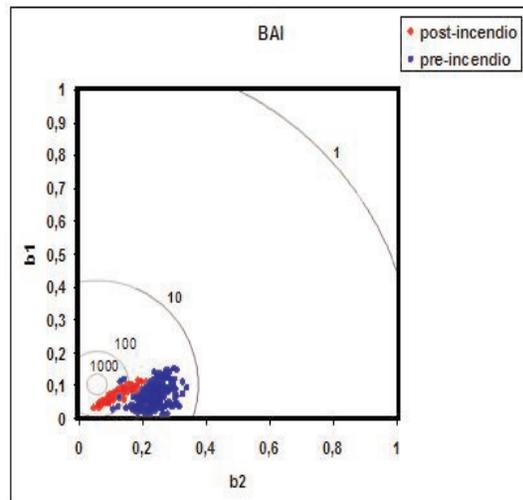


Figura 2: Isolíneas BAI

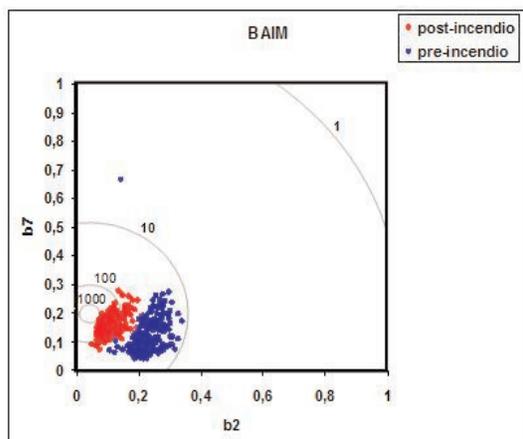


Figura 3: Isolíneas BAIM

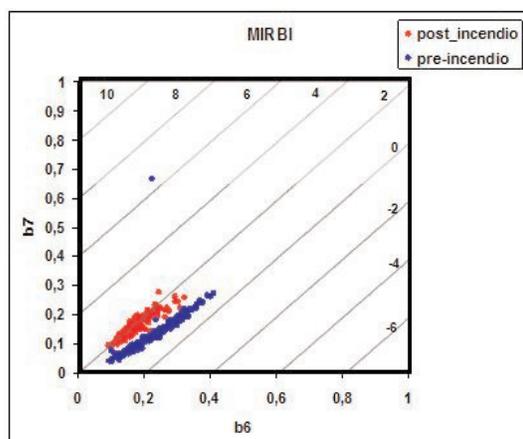


Figura 4: Isolíneas MIRBI

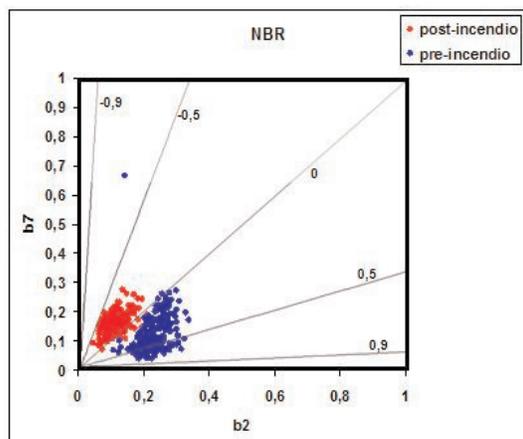


Figura 5: Isolíneas NBR

Para facilitar la interpretación de los resultados, se han representado, además, en cada gráfico las isóneas de los índices. Como puede comprobarse, en el caso del MIRBI las isóneas son prácticamente perpendiculares a la dirección del cambio, sin embargo, los valores pre y post incendio están muy cercanos lo que afectará a su capacidad de discriminación. El BAI ofrece, en este sentido, el peor escenario al presentar los menores valores angulares (menor perpendicularidad) al tiempo que la mayor proximidad entre valores pre y post incendio (figura 2). En una situación intermedia se sitúan BAIM y NBR con valores angulares bastante altos y muy similares e idéntica distancia espectral entre valores pre y post incendio al estar definidos en el mismo espacio bi-espectral. Así pues, los resultados obtenidos en este análisis han de ser interpretados teniendo en cuenta que se ha comparado la idoneidad teórica de los índices en función de su perpendicularidad al vector de cambio y no a la magnitud del mismo. En este sentido, el índice más adecuado para la discriminación de áreas quemadas sería aquel cuyas isóneas sean más perpendiculares al vector de cambio y esté definido en un espacio espectral que maximice la separación entre los valores pre y post-incendio.

CONCLUSIONES

El resultado del análisis comparativo entre los índices NBR, MIRBI, BAI y BAIM, abordado en este trabajo con el doble enfoque *espectro-espacial* y *espectro-temporal*, muestra que el BAIM es el índice espectral que cumple mejor con el objetivo de discriminación, especialmente para análisis basados en imágenes post-incendio. En todos los casos el tipo de cubierta que presenta mayores confusiones es el *agua*, observándose una reducción de este tipo de confusión en los índices que combinan información del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio de onda corta, como ocurre con el NBR y, especialmente, con el BAIM. Por otra parte, de acuerdo a los resultados obtenidos, el MIRBI resultaría teóricamente más adecuado para los estudios multi-temporales. No obstante, es preciso indicar, que el estudio realizado no valora los posibles errores de omisión y comisión que pudieran producirse en este tipo de estudios y que, en principio estarían derivados tanto de la propia magnitud del cambio como de la presencia de cambios con una dirección e intensidad similares a los producidos por la ocurrencia de incendios. En este sentido y atendiendo a los resultados obtenidos en los dos test, el BAIM y el NBR

compensarían un grado de perpendicularidad algo menor que el del MIRBI, con una mayor separación espectral de los valores pre y post-incendio. Sin embargo, los resultados obtenidos en el análisis espectro-espacial, demuestran que el BAIM resulta mucho más fiable que el NBR en la discriminación del área quemada respecto a zonas agrícolas, pastos, matorrales y zonas con escasa vegetación.

Los índices espectrales pueden constituir una herramienta útil en la discriminación de superficies quemadas. Sin embargo, como hemos comprobado, ninguno de los índices analizados, utilizados en la literatura para la cartografía de áreas quemadas, está exento de errores por lo que para una correcta delimitación de las zonas quemadas sería conveniente recurrir a otras técnicas auxiliares que idealmente deberían combinar criterios espectrales con otros espaciales y/o de contexto que consiguieran reducir las confusiones con determinadas categorías, especialmente en las zonas de borde o en las áreas donde el incendio presentó menor intensidad.

Finalmente, si bien, la simulación del comportamiento de los índices espectrales a través de las extracciones de valores de *quemado y no quemado* sobre imágenes de satélite nos parece suficientemente consistente, consideramos de interés ampliar el estudio con datos obtenidos a partir de radiometría de campo e incluso mediante la utilización de modelos de reflectividad.

REFERENCIAS

- BARBOSA, P. M., SAN MIGUEL, J., MARTÍNEZ, B. y SCHMUCK, G., Eds. 2002. Burnt area mapping in southern Europe using IRS-WIFS. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Rotterdam, Millpres.
- BASTARRIKA, A. y CHUVIECO, E. 2006. Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones: Aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (6). 182-204.
- BRIVIO, P.A., MAGGI, M., BINAGHI, E. y GALLO, I. 2003. Mapping burned surfaces in Sub-Saharan base on multitemporal neural classification. *International Journal of Remote Sensing*. 23: 4003-4018.
- CHUVIECO, E. y CONGALTON R.G. 1988. Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 54: 1275-1281.
- CHUVIECO, E., VENTURA, G., MARTÍN, M.P., y GÓMEZ, I. 2005. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*. 94: 450-462
- EVA, H. D., BELWARD, A.S., GRÉGOIRE, J.M., MOULA, M., BRUSTET, J.M. y JANODET, N. 1995. The application of Along Track Scanning Radiometer to burnt area mapping in different savannah ecosystems in central Africa. *Proceedings of the 1995 Meteorological Satellite Data User's Conference*, Winchester.
- FREDERICKSEN, P., LANGAAS, S. y MBAYE, M. 1990. *NOAA-AVHRR and GIS-BASED monitoring of fire activity in Senegal- a provisional methodology and potential applications*. Ecological Studies. J. G. Goldammer. Berlin, Springer-Verlag. 84: 400-417.
- 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): 533-549.
- GRÉGOIRE, J. M., TANSEY, K. y SILVA, J.M.N. 2003. The GBA2000 initiative: developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 24(6): 1369-1376
- HUDAK, A. T. y BROCKETT, B.H. 2004. Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 25(16): 3231-3243.
- KASISCHKE, E. S., FRENCH, N.H., HARRELL, P., CHRISTENSEN, N.L., USTIN, S.L. y BARRY, D. 1993. *Remote Sensing of Environment*. 45: 61-71.
- KASISCHKE, E. y FRENCH, N.H. 1995. Locating and estimating the area extent of wildfires in Alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR NDVI composite data. *Remote Sensing of Environment*. 51: 263-275.
- KEY, C.H. y BENSON, N. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson and L.J. Gangi, Eds.), USDA Forest Service, Rocky Moun-

- tain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164, Ogden, UT, pp. CD:LA1-LA51
- KOUTSIAS, N., KARTERIS, M., FERNÁNDEZ, A., NAVARRO, C., JURADO, J., NAVARRRO, R. y LOBO, A. 1999. Burnt land mapping at local scale. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. E. Chuvieco. Berlin, Springer-Verlag, pp. 123-138.
- LASAPONARA, R. 2006. Estimating spectral separability of satellite derived parameters for burned areas mapping in the Calabria region by using SPOT-Vegetation data. *Ecological Modelling*. 196: 265-270.
- LÓPEZ, M. J. y CASELLES, V. 1991. Mapping Burns and Natural Reforestation Using Thematic Mapper Data. *Geocarto International*. 1: 31-37.
- MALINGREAU, J. P., STEVENS, G. y FELLOWS, L. 1985. Remote sensing of forest fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *Ambio*. 14: 314-321.
- MARTÍN, M. P. y CHUVIECO, E. 1993. Mapping and evaluation of burned land from multi-temporal analysis of AVHRR NDVI images. *Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management*. P. J. Kennedy and M. Karteris. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 71-83.
- 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. Alcalá de Henares.
- 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: 109-128.
- MARTÍN, P., GÓMEZ, I. y CHUVIECO, E. 2005. Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment, Zaragoza*. Universidad de Zaragoza. 193-197.
- PEREIRA, M. C. y SETZER, A.W. 1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA-AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*. 14(3): 583-597.
- PEREIRA, J. M. C. 1999. A comparative evaluation of NOAA-AVHRR vegetation indices for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 37: 217-226.
- PONZONI, F., LEE, D. y FILHO, P. 1986. Assessment of area burnt and vegetation recovery at Brasilia National Park, using Landsat TM data. *IV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, São José dos Campos, INPE.
- ROY, D. P., 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(1-2): 263-286.
- ROY, D. P., JIN, Y., LEWIS, P.E. y JUSTICE, C.O. 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*. 97: 137-162.
- ROY, D.P., BOSCHETTI, L. y TRIGO S.N. 2006. Remote sensing of fire severity: Assessing the Performance of the Normalized Burnt Ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.3: 112-116.
- TANAKA, S., KIMURA, H. y SUGA, Y. 1983. Preparation of a 1:25.000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island. *International Journal of Remote Sensing*. 4(1): 17-31.
- TRIGG, S. y FLASSE, S. 2000. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. *International Journal of Remote Sensing*. 21(16): 3161-3168.
- TRIGG, S. y FLASSE S. 2001. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*. 22: 2641-2647.
- VERSTRAETE, M. y PINTY, B. 1996. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 3: 1254-1265.