

Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA-AVHRR y Landsat-TM

M. P. Martín¹ y E. Chuvieco²

Correo electrónico: mpilar.martín@ieg.csic.es y emilio.chuvieco@uah.es

¹ Instituto de Economía y Geografía, C.S.I.C.

C/ Pinar, 25. 28006 Madrid

² Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares

RESUMEN

Se presenta una alternativa para abordar la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes de satélite. Se trata del índice de área quemada (IAQ) que se diseña específicamente con este propósito, y se basa en la cuantificación de la distancia espectral entre los valores de la imagen en las bandas del rojo e infrarrojo cercano y el punto de convergencia que se define como la respuesta espectral típica de las áreas recientemente quemadas en esas bandas. Su idoneidad se verifica a partir de radiometría de laboratorio e imágenes de satélite de alta y baja resolución espacial.

PALABRAS CLAVE: áreas quemadas, índices espectrales, Landsat-TM, NOAA-AVHRR, radiometría de campo.

ABSTRACT

A new spectral index adapted to burned land mapping is presented in this paper. The index is named Burned Area Index (BAI). It is based on the inverse spectral distance from each pixel to a burned convergence point, as defined by typical burned areas in the Red and NIR bands. Laboratory spectro-radiometry measurements, as well as high and low resolution satellite images are used in testing the usefulness of this index.

KEY WORDS: burned areas, spectral indices, Landsat-TM, NOAA-AVHRR, field radiometry.

INTRODUCCIÓN

La cartografía de áreas quemadas a partir de la teledetección se ha desarrollado notablemente en los últimos años, gracias al creciente interés por obtener una evaluación global de las áreas afectadas por incendios (Ahern *et al.*, 2001; Chuvieco y Martín, 1994). Con este enfoque global, el sensor más utilizado ha sido el NOAA-AVHRR, gracias a su buena resolución espectral y adecuada frecuencia temporal. Para abordar este tipo de estudios, se han planteado, hasta el momento, dos grandes grupos de metodologías. Por un lado, la cartografía de incendios activos a partir de los canales térmicos del AVHRR (principalmente del canal 3: Martín *et al.*, 1999; Robinson, 1991), y por otro la delimitación de áreas recientemente quemadas, a partir de la

comparación multitemporal de índices de vegetación (Kasischke *et al.*, 1993; Martín y Chuvieco, 1995). Algunos autores sugieren combinar ambos criterios, reteniendo los píxeles detectados como incendios activos para mejorar la discriminación de áreas identificadas como potencialmente quemadas en la comparación multitemporal (Fraser *et al.*, 2000). Aunque este segundo enfoque parece mejorar los resultados de los dos primeros, restan todavía notables incertidumbres, sobre todo como consecuencia de la existencia de cubiertas con rasgos espectrales similares a las áreas quemadas, además de la propia inestabilidad radiométrica de las imágenes AVHRR.

Los trabajos con sensores de mayor resolución espacial, como Landsat-TM o Spot-HRV parecen proporcionar mejores resultados (una discrimina-

ción más precisa y la posibilidad de abordar una evaluación de los niveles de daño: Jakubauskas *et al.*, 1990; Koutsias *et al.*, 1999), si bien al coste de cubrir zonas menos extensas y requerir una inversión más elevada.

En cualquier caso, la mayor parte de las técnicas aplicadas hasta el momento, tanto a imágenes de alta como de baja resolución espacial, se basan en el empleo de índices espectrales, comúnmente llamados índices de vegetación, que se emplean para diversos fines pero que, en su mayoría, fueron diseñados para el estudio de las características de las cubiertas vegetales.

IDONEIDAD DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS

La teledetección espacial se ha empleado hasta el momento principalmente con dos propósitos: identificar los elementos de interés sobre la imagen observada y cuantificar determinadas características de los mismos. En teoría estos dos objetivos están íntimamente relacionados, pues son las características espectrales de esos elementos las que permiten diferenciarlos de otros presentes en la imagen, además de estudiar sus propiedades. En la práctica, en cambio, resulta conveniente considerar estos objetivos por separado, pues es muy posible que requieran diferentes herramientas para su estudio. Por ejemplo, es difícil que un único índice espectral pueda resultar óptimo para discriminar una cubierta del resto de las presentes en la imagen y, al mismo tiempo, lo sea para analizar su variabilidad interna (Verstraete y Pinty, 1996). Trasladando este concepto al estudio que nos ocupa, parece razonable cuestionar la idoneidad de los índices de vegetación para la discriminación y análisis de áreas quemadas.

Los índices de vegetación (IV) tienen el objetivo primordial de ofrecer información relevante sobre el estado de la vegetación, reduciendo al mínimo el efecto producido por posibles perturbaciones externas. Por este motivo, tienden a ser particularmente sensibles en la zona que indica presencia de vegetación dentro del espacio espectral definido por las dos bandas más frecuentemente utilizadas en su cálculo (rojo e infrarrojo cercano). Su uso resulta especialmente indicado cuando tratamos de obtener información sobre las características fisiológicas y/o morfológicas de la cubierta vegetal. Sin embargo, su sensibilidad, y por tanto su utilidad, se reduce a medida que nos alejamos del espacio espectral

característico de las zonas con vegetación. De hecho, los problemas de aplicabilidad de estos índices surgen siempre en zonas de escasa vegetación, donde la respuesta debida al suelo altera notablemente la información que el índice proporciona sobre la cubierta vegetal presente en el área. Como apuntamos en la introducción, los IV se han utilizado en los últimos años para intentar discriminar las áreas afectadas por incendios forestales. Esta aplicación se justifica por la capacidad de estos índices para discriminar zonas con vegetación de otras cubiertas de la imagen, así como por su utilidad para atenuar la influencia de factores externos. Ya hemos comentado que los IV son especialmente sensibles en el espacio espectral que corresponde a la vegetación, y que esa sensibilidad disminuye a medida que nos alejamos de ese espacio (resto de cubiertas). Por tanto, parece lógico asumir que estos índices, que resultan óptimos para discriminar entre zonas con y sin vegetación, no sean apropiados para discriminar entre distintas cubiertas sin vegetación, como sería el caso de las zonas afectadas por incendios y otras de suelos desnudos, barbechos o, incluso, de vegetación esclerófila.

Teniendo en cuenta las reflexiones anteriores, consideramos apropiado estudiar la posibilidad de generar un índice optimizado para la discriminación de áreas quemadas, tomando como referencia el comportamiento que suelen presentar estas zonas en las bandas espectrales disponibles en la mayor parte de los sensores operativos actualmente (visible e infrarrojo cercano).

CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Un índice espectral diseñado con el propósito específico de discriminar una cubierta de interés requiere, como es lógico, que ésta presente un comportamiento peculiar con respecto al resto de cubiertas, en una o varias bandas espectrales. Según Verstraete y Pinty (1996) una aproximación lógica al diseño de un índice partiría de analizar las propiedades radiativas de la cubierta de interés en el espacio espectral objeto de estudio. El siguiente paso consistiría en diseñar una fórmula que permitiera maximizar la separabilidad entre la cubierta de interés y el resto de cubiertas de la imagen, dentro del espacio espectral más indicado para tal fin.

Uno de los problemas esenciales en la caracterización espectral de áreas afectadas por incendios es la existencia de dos tipos muy diferentes de señal

post-incendio: la que corresponde a superficies recientemente quemadas, donde la señal procede básicamente de las cenizas y el carbón depositados sobre la superficie como consecuencia de la combustión de la vegetación, y otra, más duradera, que se produce como consecuencia de la pérdida o deterioro de la masa vegetal afectada por el fuego (Robinson, 1991). La segunda señal es más estable, si bien su persistencia varía mucho dependiendo de la vegetación y el clima de la zona afectada. Sin embargo, esta señal es menos característica a efectos de discriminación, pues la desaparición o el deterioro de la vegetación puede deberse a otras razones distintas a la ocurrencia de un incendio, como pueden ser su propia evolución fenológica, plagas, sequías o recogida de cosechas (Pereira *et al.*, 1997).

A pesar de este problema, parece existir un acuerdo bastante razonable en cuanto a la caracterización espectral de las zonas afectadas por incendios forestales, tanto en los estudios realizados sobre medidas de radiómetro tomadas en terreno, como en los obtenidos a partir del análisis de imágenes de satélite (generalmente de alta resolución espacial) adquiridas sobre zonas quemadas. A través de diversos trabajos de revisión bibliográfica actualmente contamos con una buena caracterización espectral de las áreas afectadas por incendios (Pereira *et al.*, 1999; Pereira *et al.*, 1997). Según estos trabajos, las áreas quemadas tenderán a presentar muy bajas reflectividades en las bandas visible, infrarrojo próximo y medio, similares a las que podemos encontrar en láminas de agua o zonas en sombra (topográfica o de nubes) (Figura 1). A medio-largo plazo, el efecto del fuego normalmente se marcará por una reducción del vigor vegetal, si bien en caso de climas más productivos, la señal puede equipararse con la vegetación no afectada por el fuego en relativamente poco tiempo.

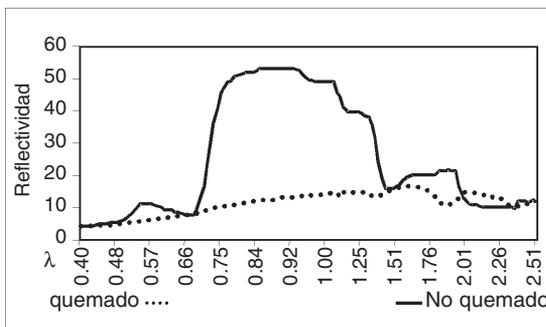


Figura 1. Curvas típicas de área quemada y vegetación no afectada obtenidas con radiometría de campo.

FORMULACION DEL IAQ

Para la formulación del índice de área quemada tomamos como referencia el trabajo de Verstraete y Pinty (1996) antes referenciado.

La experiencia de varios análisis con radiómetros de laboratorio y de la interpretación de imágenes de alta y baja resolución espacial, nos llevó a plantear un índice basado en las bandas del rojo e infrarrojo cercano, las más universalmente disponibles en los satélites de observación de la Tierra. Algunos autores sugieren que el espacio formado por el infrarrojo cercano y el medio de onda corta (SWIR) resulta más oportuno para discriminar áreas quemadas (Pereira *et al.*, 1999; Trigg y Flasse, 2000), pero preferimos no considerarlo en este caso ya que aún son muchos los sensores —con amplias posibilidades para la cartografía de áreas quemadas— que no cuentan con bandas de observación en el SWIR.

Asumimos, por tanto, que un índice idóneo para discriminar áreas quemadas podría ser definido por una función de su proximidad espectral a los valores de referencia que se consideran característicos de las zonas quemadas. Esa proximidad podría definirse como la distancia euclidiana entre el valor de albedo que representa a cada pixel de la imagen y el valor del punto de convergencia, en el espacio espectral considerado:

$$IAQ = \frac{1}{(pc_r - \rho_r)^2 + (pc_{ir} - \rho_{ir})^2}$$

donde pc_r y pc_{ir} son los valores de convergencia para las bandas del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Estos valores de convergencia se definieron, respectivamente, como 0,1 y 0,06 tras un exhaustivo análisis del comportamiento espectral de áreas recientemente quemadas realizado sobre una serie temporal de imágenes NOAA-AVHRR adquiridas sobre la Península Ibérica en los años 1991, 1994 y 1995.

De acuerdo a esta fórmula el valor del índice será mayor cuanto menor sea la distancia espectral entre un pixel de la imagen y el valor de convergencia que representa el comportamiento tipo de una zona quemada en las dos bandas del espectro consideradas, es decir cuanto más similar sea (espectralmente) a esa cubierta.

En consecuencia, los valores del IAQ tenderán a converger hacia el espacio espectral definido como característico de las zonas quemadas. Además, su sensibilidad aumentará a medida que se aproxime a ese espacio, tal y como podemos comprobar en la Figura 2, que muestra un diagrama del espacio espectral definido por las bandas del rojo e infrarrojo cercano sobre el que hemos incluido una

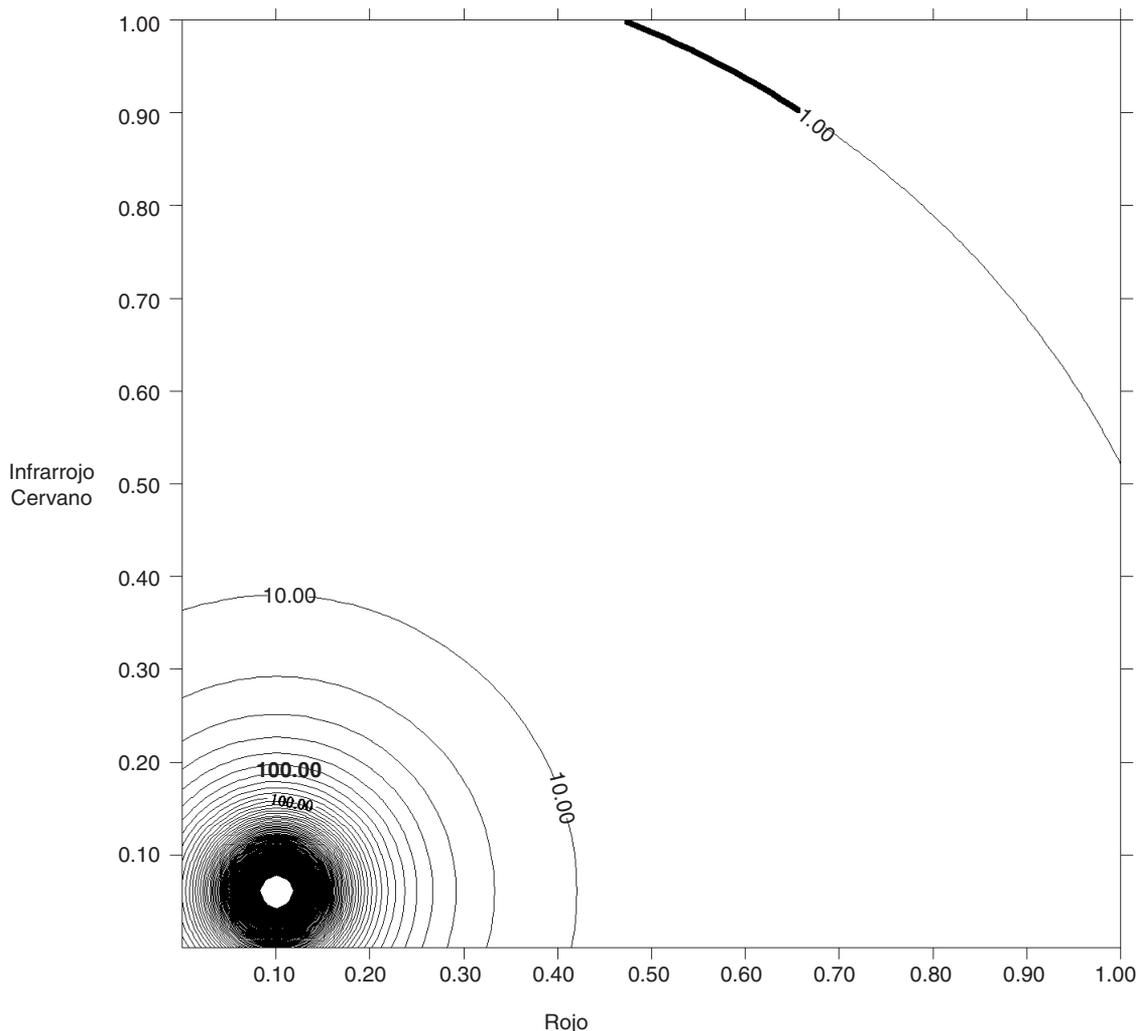


Figura 2. Diagrama espectral representando las isocías del IAQ para distintos valores de reflectividad en el Rojo e Infrarrojo Cercano.

representación de las isocías del IAQ para distintos valores de albedo en las dos bandas. Las isocías están más próximas entre sí en la zona espectral más cercana al punto que representa el comportamiento tipo de un área afectada por un incendio, lo que indica una mayor sensibilidad del índice en esa zona y, teóricamente, una mayor capacidad para discriminar cambios en ese tipo de cubierta.

Al no incluir un cociente entre bandas, el IAQ resulta muy dependiente de la radiometría de la imagen y, por tanto, ha de ser empleado con precaución, pues su rango dinámico puede variar bastante, sobre todo en estudios multitemporales donde la radiometría de la imagen puede verse afectada por distintas condiciones atmosféricas y/o de geometría de la iluminación y la observación.

Una vez formulado el índice, comprobamos su validez en la aplicación para la que fue diseñado comparándolo con otros índices tradicionalmente utilizados en la cartografía de áreas quemadas. Los resultados de esta fase del trabajo se describen en el siguiente epígrafe.

APLICACIÓN DEL IAQ

Hemos evaluado la aplicación del IAQ a la cartografía de áreas quemadas en diversos contextos utilizando imágenes de alta y baja resolución espacial así como datos medidos sobre terreno con espectroradiómetro.

El IAQ fue formulado inicialmente para su aplicación a imágenes NOAA-AVHRR. Por ello, comenzamos verificando su utilidad con este tipo de imágenes ensayando su aplicación a la cartografía de áreas quemadas en grandes incendios ocurridos durante 1994 en la Península Ibérica. Con el propósito de obtener una valoración cuantitativa de la capacidad de discriminación del IAQ, calculamos para las mismas imágenes, varios IV tradicionalmente empleados en la cartografía de áreas quemadas a escala regional como el NDVI, SAVI y GEMI. A continuación, estimamos la capacidad de cada índice para discriminar áreas quemadas utilizando como medida estadística la distancia normalizada calculada a partir de los valores de media y desviación típica obtenidos sobre áreas quemadas y otras cubiertas de interés. Para la obtención de estos valores se realizó un muestreo, suficientemente representativo, de áreas quemadas y no quemadas sobre una imagen posterior al incendio, concretamente la adquirida el día 8 de agosto de 1994, que fue seleccionada por tener escasa cobertura nubosa y estar próxima a la fecha de ocurrencia de varios grandes incendios. Los resultados obtenidos aparecen reflejados en la Tabla 1.

	Índices espectrales			
	NDVI	GEMI	SAVI	IAQ
Agua	1,86	4,80	1,90	4,66
Sombras de nubes	1,37	0,67	1,33	2,19
Forestal arbolado	3,46	3,10	3,48	5,55
Forestal arbustivo	2,92	4,52	2,97	5,90
Cultivos secano /vegetación natural	2,65	4,80	2,69	6,58
Cultivos secano	1,70	3,92	1,74	9,23

Tabla 1. Distancia normalizada entre los valores de las áreas quemadas y otras cubiertas de la imagen.

Como se puede observar, las mayores distancias espectrales entre las cubiertas muestreadas y las áreas quemadas, corresponden al IAQ, salvo en el caso del agua, donde el GEMI presenta la mayor separabilidad.

A la vista de estos resultados, se abordó la cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir del IAQ calculado sobre una serie multitemporal de imágenes NOAA-AVHRR. Las imágenes fueron segmentadas en dos categorías (quemado y no quemado) a partir de la media y desviación típica utilizándose el mismo umbral para todas las imágenes de la serie. Los resultados fueron contrastados con las estadísticas oficiales facilitadas por la DGCN (Tabla 2). Como puede observarse, las imágenes permitieron una buena discriminación de los incendios superiores a 1000 ha. El nivel de precisión se reduce ligeramente en

los incendios menores (de 500 a 1000 ha) debido a que estas áreas quemadas tienen un tamaño relativamente pequeño (para la resolución espacial de NOAA) y por lo tanto la mayoría de los píxeles constituyen una mezcla de área quemada y vegetación no afectada, por lo que no presentan suficiente contraste como para ser discriminadas apropiadamente.

	Estadísticas oficiales	Imágenes NOAA	
	Nº incendios (A)	Nº incendios (B)	(B/A)*100
TOTAL	35	31	88,5
500 – 1.000 has	7	3	42,8
1.000 – 2.000 has	8	8	100
2.000 – 3.000 has	4	4	100
3.000 – 4.000 has	2	2	100
> 4.000 has	14	12	100
Errores comisión (%pixels discriminados como incendio sobre áreas no afectadas)			31

Tabla 2. Verificación de los incendios discriminados a partir del análisis multitemporal del IAQ en imágenes NOAA-AVHRR.

La segunda aplicación de este índice se realizó en un estudio de simulación sobre las potencialidades del sistema Fuego para la cartografía de áreas quemadas (Chuvieco y Martín, 1999). En este caso, evaluamos el poder discriminante de este índice respecto a los anteriormente indicados (NDVI, GEMI y SAVI), señalando como criterio el número de cruces entre áreas quemadas y otro tipo de cubiertas del suelo que presentarían diferencias espectrales significativas. Asumiendo como clases puras las reflectividades del suelo, de la vegetación y de las áreas quemadas medidas con espectroradiómetro sobre el terreno, estimamos cuál sería la señal esperable para distintas proporciones de suelo y vegetación, con distintos grados de área quemada (Figura 3).

Para el caso simple de asumir 36 escenarios de separación posible (12 para un píxel cubierto completamente de vegetación antes del incendio, 12 para un píxel con 75% de vegetación y el resto de suelo, y otros 12 para 50% de vegetación y suelo), el IAQ ofreció valores de la *t de Student* significativos en todos los casos (36), frente al SAVI que lo hizo en 33 ocasiones, el NDVI en 31 y el GEMI en 29.

Finalmente, hemos evaluado la capacidad del IAQ para cartografiar incendios a partir de imágenes Landsat-TM. Las imágenes utilizadas corresponden a tres ámbitos geográficos distintos: la isla de Elba (Italia), un área próxima a Atenas (Grecia) y la zona de Buñol en el litoral mediterráneo español. Todas las imágenes utilizadas incluyen incendios recientes pero fueron adquiridas transcurridos

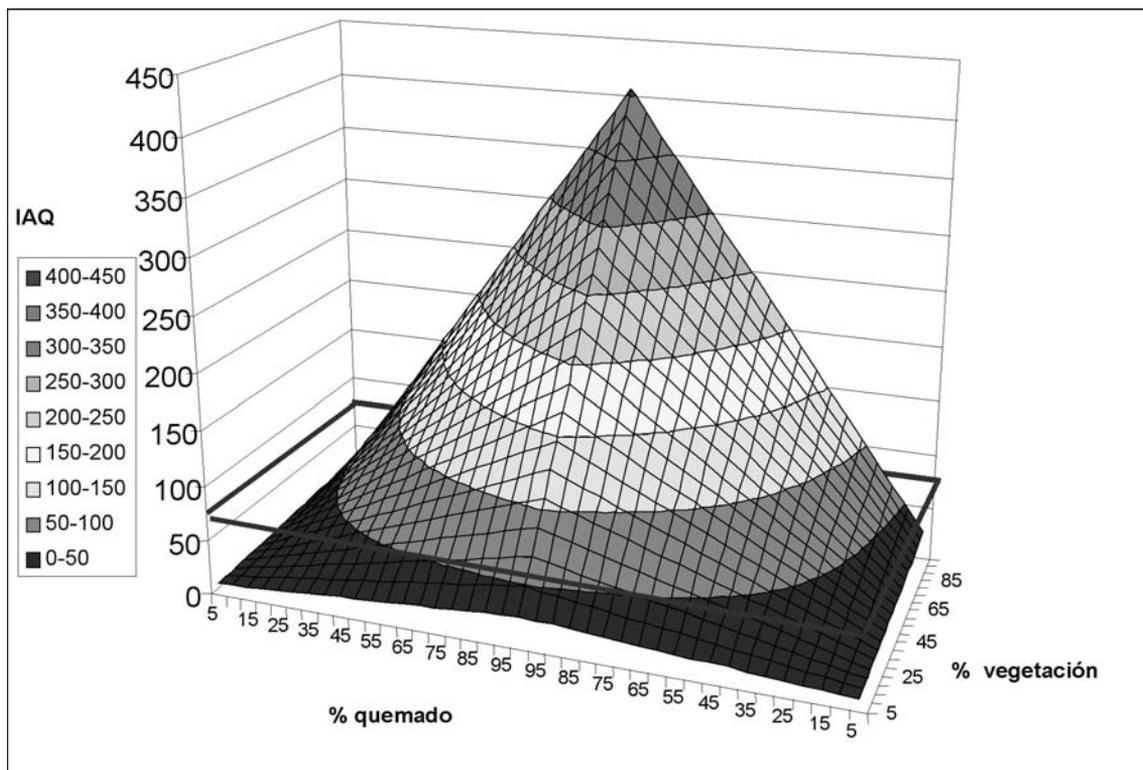


Figura 3. Valores del IAQ estimados para distintas proporciones de vegetación y área quemada.

distintos períodos de tiempo desde el incendio (unos días en el caso de la imagen de Buñol, tres semanas para la de Atenas y dos meses la de Elba).

Como en el caso anterior, además del IAQ se calcularon, para cada una de las imágenes, el NDVI, GEMI y SAVI. Se procedió a extraer una muestra de píxeles con distintas categorías de cobertura del suelo sobre imágenes anteriores y posteriores al incendio. Sobre estos datos se aplicaron distintas medidas estadísticas (distancia normalizada, *t de Student* y divergencia transformada) con el propósito de cuantificar y comparar la capacidad de discriminación de cada índice.

El promedio de las distancias normalizadas entre los valores encontrados en zonas quemadas y otras cubiertas de la imagen se utilizó como criterio para medir la sensibilidad de cada índice para discriminar áreas quemadas. El test de la *t de Student* nos permitió comprobar si las diferencias encontradas entre los valores de las distintas cubiertas respecto a la zona quemada resultaban o no significativas. Por último, la divergencia transformada se calculó con el propósito de seleccionar el índice que presentaba la mayor capacidad de discriminación entre pares de categorías (áreas quemadas y otras cubiertas).

La Figura 4 muestra los valores promedio de los píxeles muestreados en cada una de las cubiertas para la imagen posterior al incendio de la zona de Buñol. En el gráfico se observa una clara capacidad de discriminación del IAQ siendo el único índice que permite la utilización de un umbral simple para la delimitación del área quemada.

Las Tablas 3 y 4 muestran algunos de los resultados de la aplicación de estos índices a las diferentes zonas de estudio. La alta variabilidad que presenta el IAQ implica que algunas distancias normalizadas sean muy bajas (con cuerpos de agua y sombras de nubes, especialmente) y por ello los valores promedio resultan más bajos que en otros índices. Sin embargo, el test de la *t de Student* muestra diferencias significativas entre las zonas quemadas y otras cubiertas de la imagen. Similares tendencias se observan sobre la resta de imágenes anteriores y posteriores al incendio aunque en este caso el IAQ ofrece la mejor capacidad de discriminación en la zona de Elba y la segunda mejor en Atenas. Por su parte, los valores de divergencia transformada calculada entre pares de categorías presentan al IAQ como el mejor índice. Así por ejemplo, en la zona de Buñol este índice ofrece la mayor capacidad de discriminación en 6 de 8 combinaciones (tabla 4)

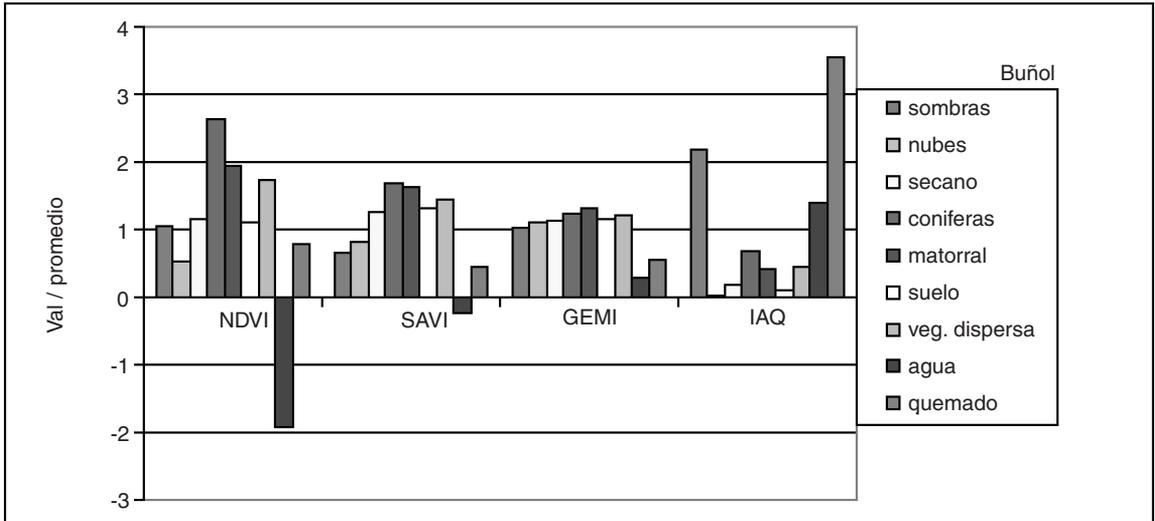


Figura 4. Valores promedio de los píxeles muestreados en cada cubierta para los distintos índices calculados sobre la imagen TM de Buñol posterior al incendio.

	Imágenes posteriores al incendio				Diferencias anterior-posterior			
	NDVI	SAVI	GEMI	IAQ	NDVI	SAVI	GEMI	IAQ
Elba	1.14	1.32	1.33	1.34	1.13	1.02	0.94	1.13
Athens	1.87	2.30	1.93	1.78	1.72	1.77	1.91	1.89
Buñol	2.10	2.55	2.76	1.91	1.95	2.52	2.72	1.97

Tabla 3. Promedio de las distancias normalizadas entre los valores correspondientes a zonas quemadas y el resto de cubiertas muestreadas sobre imágenes Landsat.

Cubierta	Post-incendio	Diferencia
Sombra	GEMI	GEMI
Nubes	IAQ DIF	IAQ
Cultivos	IAQ DIF	IAQ
Coníferas	IAQ DIF	NDVI
Matorrales	IAQ DIF	IAQ
Suelo desnudo	IAQ DIF	IAQ
Vegetación dispersa	IAQ DIF	NDVI
Agua	NDVI	NDVI

Tabla 4. Mejores bandas para discriminar áreas quemadas de otras cubiertas de la imagen según los resultados de la divergencia transformada. (zona de Buñol)

Al igual que en el caso de NOAA y con el propósito de comprobar la validez del IAQ para la discriminación de áreas quemadas, se aplicaron umbrales simples basados en la media y la desviación típica a las imágenes posteriores a los incendios con el objeto de discriminar las zonas quemadas del resto de cubiertas de la imagen. Se decidió aplicar umbrales rígidos con el propósito de reducir en lo posible los errores de comisión (que identificarían como quemado un píxel no afectado por el fuego). Se aplicó el mismo criterio de segmentación para el resto de índices (NDVI, GEMI y SAVI). Los resul-

tados muestran que el IAQ permite una correcta discriminación del área quemada con escasos errores de comisión. El resto de índices espectrales presentan diversas confusiones con nubes, sombras de nubes y áreas de vegetación dispersa. No obstante su buen comportamiento, el IAQ presenta algunos problemas en la línea de costa (imágenes de Elba y Atenas), a consecuencia de enfatizar las áreas de baja radiancia. Este problema podría subsanarse fácilmente utilizando una máscara para eliminar las láminas de agua y márgenes costeros presentes en la imagen.

CONCLUSIONES

Hemos planteado la aplicación de un nuevo índice espectral ajustado a la discriminación de áreas quemadas. Se ha visto la conveniencia teórica de plantear un índice de estas características y el buen rendimiento que plantea tanto para imágenes de baja como de alta resolución espacial, requiriendo una resolución espectral mínima.

BIBLIOGRAFÍA

- AHERN, F. J., GOLDAMMER, J. G. y JUSTICE, C. O. Eds. 2001. *Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort*. The Hague, SPB Academic Publishing.
- CHUVIECO, E. y MARTIN, M. P. 1994. *Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR*

- images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60: 563-570.
- CHUVIECO, E. y MARTÍN, M. P. 1999. *Performance Assessment in the Fire Post-fire Phase*. Final Report. Alcalá de Henares, Department of Geography.
- FRASER, R. H., LI, Z. y CIHLAR, J. 2000. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing and Environment*. 74: 362-376.
- JAKUBAUSKAS, M. E., LULLA, K. P. y MAUSEL, P. W. 1990. Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 56: 371-377.
- KASISCHKE, E. S., FRENCH, N. H., HARRELL, P., CHRISTENSEN, N. L., USTIN, S. L. y BARRY, D. 1993. Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*. 45: 61-71.
- KOUTSIAS, N., KARTERIS, M., FERNÁNDEZ, A., NAVARRO, C., JURADO, J., NAVARRO, R. y LOBO, A. 1999. Burnt land mapping at local scale. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. (E. Chuvieco, Ed.) Berlin, Springer-Verlag: 123-138.
- MARTÍN, M. P., CECCATO, P., FLASSE, S. y DOWNEY, I. 1999. Fire detection and fire growth monitoring using satellite data. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. (E. Chuvieco, Ed.) Berlin, Springer-Verlag: 101-122.
- MARTÍN, M. P. y CHUVIECO, E. 1995. Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios forestales a partir de imágenes de satélite. *Ecología*. 9: 9-21.
- PEREIRA, J. M., SA, A. C. L., SOUSA, A. M. O., SILVA, J. M. N., SANTOS, T. N. y CARREIRAS, J. M. B. 1999. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. (E. Chuvieco, Ed.) Berlin, Springer-Verlag: 123-138.
- PEREIRA, J. M. C., CHUVIECO, E., BEUDOIN, A. y DESBOIS, N. 1997. Remote Sensing of burned areas: a review. *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. (E. Chuvieco, Ed.) Alcalá de Henares, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá: 127-184.
- ROBINSON, J. M. 1991. Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 12: 3-24.
- 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: 3161-3168.
- VERSTRAETE, M. M. y PINTY, B. 1996. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 34: 1254-1265.