

---

## **CARTOGRAFÍA DE GRANDES INCENDIOS FORESTALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA A PARTIR DE IMÁGENES NOAA-AVHRR**

**María del Pilar Martín Isabel y Emilio Chuvieco Salnero**

Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá  
Colegios, 2-28801. Alcalá de Henares (Madrid)

**Resumen:** En este trabajo se evalúan las posibilidades de la aplicación de imágenes adquiridas por el sensor AVHRR, a bordo de los satélites de la serie NOAA, a la cartografía e inventario de superficies afectadas por grandes incendios forestales a escala regional y tomando como área piloto la Península Ibérica. Se han utilizado una serie de imágenes AVHRR adquiridas entre los meses de junio y septiembre de los años 1991, 1994 y 1995. Destaca como aportación metodológica en este campo el diseño de un índice espectral optimizado para la discriminación de áreas afectadas por incendios a partir de la información que proporcionan los canales visible e infrarrojo cercano de las imágenes NOAA-AVHRR.

**Palabras clave:** Grandes incendios forestales, cartografía, Península Ibérica, NOAA-AVHRR

**Abstract:** *Global scale burned land mapping was approached from NOAA-AVHRR images, since they provide proper spatial and spectral resolution for such studies and easily accessible. This research was based on a series of AVHRR data on the Iberian Peninsula covering the summer season (June to September) of 1991, 1994 and 1995. A new spectral index, specifically designed for burned area mapping was applied taking into account the spectral behaviour of those areas in the AVHRR red and near infrared bands.*

**Key words:** *Large forest fires, mapping, Iberian Peninsula, NOAA-AVHRR*

---

### **INTRODUCCIÓN**

La evaluación rápida de los efectos producidos por el fuego es uno de los problemas a los que deben hacer frente los países con alta incidencia de incendios forestales. Todavía en nuestro país, los partes de incendio resultan excesivamente generalistas, con escasa precisión, tanto en las causas, como en la localización y delimitación superficial de las áreas afectadas. Sólo para los grandes incendios se realiza una evaluación más detallada, que incluye la delimitación

espacial del área quemada, pero rara vez se indican con precisión las especies afectadas o la intensidad del daño. La inexistencia de una cartografía suficientemente detallada y exhaustiva de éstos y otros aspectos, nos impide disponer de una valiosa información sobre el conjunto de factores relacionados con el problema de los incendios. Es preciso, por tanto, desarrollar nuevas herramientas que nos permitan mejorar nuestro conocimiento del fenómeno, proporcionándonos información objetiva sobre su dinámica espacio-temporal. Aunque hasta el momento no ha sido suficientemente valorada la importancia de

contar con esta información, resulta evidente a distintas escalas, tanto local como global.

Hasta hace muy poco tiempo, la delimitación del área quemada y la evaluación de daños se realizaba exclusivamente mediante trabajo de campo, recorriendo la zona afectada por el incendio, o a través de la interpretación visual de fotografías aéreas. Estos procedimientos, además de lentos (se llevaban a cabo semanas, e incluso meses después que el fuego hubiera ocurrido) y costosos, resultaban poco precisos, pues ofrecían inventarios demasiado generales. En los últimos años se han comenzado a aplicar nuevas técnicas que permiten una evaluación más certera de las áreas quemadas, tanto desde el punto de vista estadístico como cartográfico. Una de ellas es el empleo de los sistemas de posicionamiento por satélite, comúnmente conocidos como GPS (*Global Positioning System*), que permiten obtener con relativa precisión el perímetro del incendio, lo que resulta muy útil de cara a realizar una primera valoración de los daños causados por el fuego. Sin embargo estos sistemas resultan costosos y en ocasiones pueden llevar a sobreestimar la superficie afectada por el fuego al considerar como quemadas todas las áreas incluidas en el perímetro exterior del incendio, incluyendo aquellas zonas en su interior, que por alguna razón no se vieron afectadas por el fuego o lo fueron sólo muy ligeramente. Además estos sistemas no permiten obtener información sobre las distintas intensidades de daño de cara a realizar una planificación de la recuperación del área tras el incendio.

La teledetección espacial se incluye entre estas nuevas técnicas que pueden proporcionarnos un inventario rápido y preciso de las superficies incendiadas, así como de su posterior dinámica. Gracias a la estabilidad orbital de los satélites de teledetección, podemos disponer de un seguimiento bastante exhaustivo de las características de la vegetación (composición, estado), previo y posterior al incendio. La información que aportan estos equipos sobre regiones del espectro no observables por medios convencionales (infrarrojo cercano, medio, térmico y microondas), resulta de gran valor para una evaluación precisa del área quemada (Tanaka et al., 1983; Chuvieco y Congalton, 1988), así como del proceso de recuperación de la misma tras el fuego, comparando las situaciones previas y posteriores al suceso (Jakubauskas et al., 1990). Para comprender mejor las posibilidades de aplicación de esta nueva herramienta al estudio de los incendios forestales, comenzaremos realizando una breve revisión de su fundamento teórico.

---

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL A LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS

La caracterización espectral de las zonas afectadas por incendios constituye el punto de partida para su estudio mediante sistemas de teledetección. Una cuestión clave en este sentido es la existencia de distintos tipos de comportamiento espectral en la zona afectada por el incendio. Por una parte, el observado inmediatamente después de su extinción, donde el comportamiento espectral de la cubierta está definido, fundamentalmente, por el fuerte efecto de absorción de la energía que produce la presencia de cenizas y carbón en la región del visible e infrarrojo cercano, y el aumento de temperatura que experimenta en la región del infrarrojo térmico. Este tipo de comportamiento es más o menos efímero, puede persistir varias semanas o meses después del incendio dependiendo del tipo de vegetación afectada y las condiciones ambientales del área. Sin embargo, resulta de gran interés de cara al empleo de la teledetección en la discriminación de áreas quemadas, ya que las zonas recientemente afectadas por incendios presentan unas características espectrales muy peculiares que difieren en gran medida de la mayoría de cubiertas, presentando valores muy bajos de reflectividad del visible al infrarrojo medio.

El segundo tipo de comportamiento espectral se observa cuando las cenizas y el carbón han desaparecido como consecuencia de las lluvias y de la acción del viento, y está caracterizado por los cambios que ha experimentado la cubierta vegetal en el área afectada. Estos cambios se traducen normalmente en una pérdida considerable de la masa vegetal (dependiendo de la intensidad y velocidad del incendio) y, en cualquier caso, un deterioro de la misma. Este último tipo de señal suele ser más persistente, especialmente cuando el fuego ha sido intenso y la capacidad de regeneración de la cubierta se ha visto disminuida por algún factor ambiental. En cualquier caso esta señal es menos nítida y puede llevar a confusiones, pues la pérdida de masa vegetal en una zona puede deberse, no sólo al paso del fuego, sino a otros factores como la sequía, la cosecha en zonas agrícolas, la tala de árboles para el aprovechamiento maderero, etc. La discriminación de este tipo de cubiertas, se basa entonces en el distinto comportamiento espectral que presenta la vegetación sana frente a la que ha sido afectada por el fuego.

En términos generales, la vegetación sana se caracteriza por una reducida reflectividad en el visible y una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano (IRC) que se reduce hacia el infrarrojo medio (IRM) (Figura 1). Estas características se relacionan principalmente con la acción de los pigmentos fotosintéticos, y del agua que almacenan las hojas, así como de su estructura interna.

Bajo determinadas condiciones de estrés (como las que provoca un incendio), las plantas experimentan alteraciones en su estructura y composición y ello provoca una modificación en la respuesta espectral de las mismas a distintas longitudes de onda. La hoja quemada pierde buena parte de sus pigmentos con lo que la reflectividad en el visible tiende a ser mayor. Por el contrario, el deterioro de la estructura celular causa una reducción de la señal en el IRC. La pérdida de humedad tiene como consecuencia un aumento de la reflectividad en el IRM. Finalmente, la temperatura del área quemada suele ser mayor. En resumen la vegetación quemada tiende a presentar una curva más plana que la sana.

## EL EMPLEO DE IMÁGENES NOAA-AVHRR EN LA CARTOGRAFÍA Y EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE ÁREAS QUEMADAS

Como hemos visto el comportamiento espectral de la vegetación sana difiere, a distintas longi-

tudes de onda, del que presenta la afectada por el fuego, lo que permite su discriminación a partir de la teledetección espacial. Así desde los años 70 se han desarrollado experiencias de gran interés sobre la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes de satélite, utilizando mayoritariamente sensores de alta resolución espacial, como los instalados a bordo de los satélites Landsat o Spot. Menos frecuentes son, en cambio, los trabajos realizados con imágenes de menor resolución espacial como NOAA-AVHRR debido, básicamente, a los problemas que plantea el trabajar con un pixel tan grosero. A pesar de ello, la aplicación de imágenes NOAA a la cartografía y evaluación de incendios forestales, se ha incrementado notablemente en los últimos años, siendo cada vez más frecuentes los trabajos de investigación en este campo (Pereira et al., 1999). Esto se explica por las ventajas que este tipo de imágenes ofrecen para el seguimiento de fenómenos dinámicos en el espacio y en el tiempo, como es el caso de los incendios forestales, cuyo estudio requiere disponer de información casi en tiempo real. Su buena resolución espectral, junto a la excelente resolución temporal y al tamaño medio del pixel, así como la existencia de una completa serie de datos históricos, convierten al AVHRR en el sensor actualmente más capacitado para abordar estudios de fenómenos dinámicos a pequeña escala.

Hasta hace muy poco tiempo, la mayor parte de los trabajos que han explorado la posibilidad de aplicar imágenes NOAA-AVHRR a la cartografía de incendios forestales se han basado en

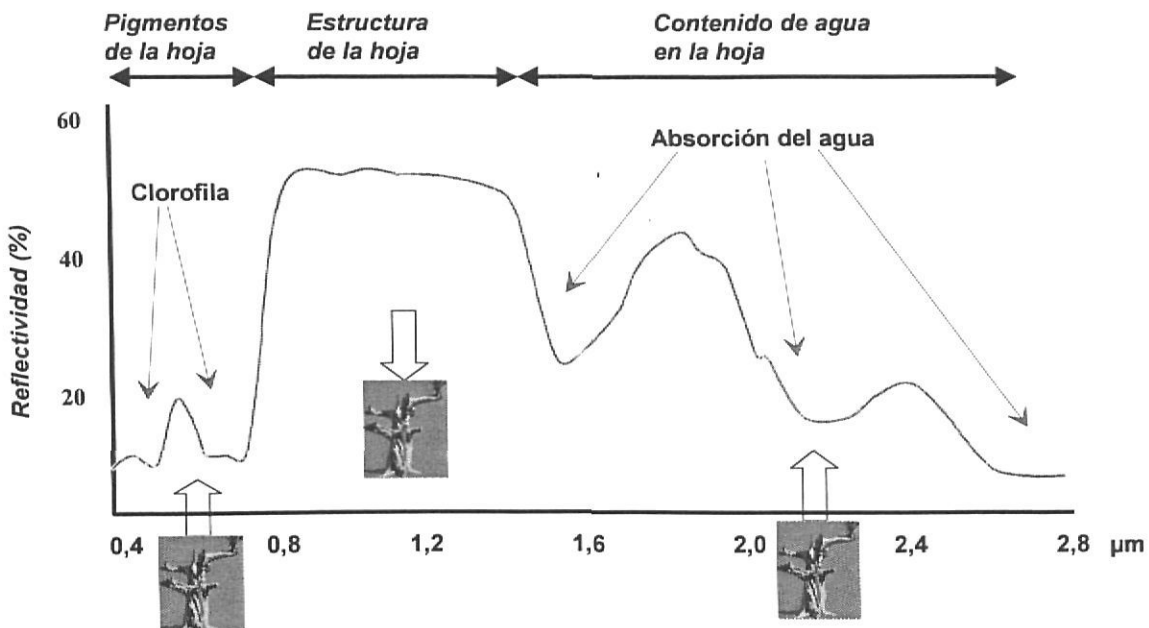


Figura 1. Comportamiento espectral típico de la vegetación sana y tendencias de cambio derivadas del paso del fuego.

la utilización de los canales 3 y 4 (infrarrojo medio y térmico, respectivamente). A pesar de que el canal 3 del AVHRR ha demostrado su interés, tanto para la detección como para la cartografía y evaluación de incendios forestales, existen varios factores que dificultan la utilización operativa de estas imágenes. Por un lado, el propio tamaño del píxel (en torno a 1 km<sup>2</sup> en el nadir), que condiciona la superficie mínima que debe estar ardiendo para que el incendio pueda detectarse en la imagen (Malingreau, 1990). Ese umbral depende bastante de la temperatura de combustión del incendio, así como del contraste térmico que ofrezca la superficie quemada con las otras cubiertas que ocupan un determinado píxel y no se encuentran ardiendo. Otro problema, en este caso ligado a la baja sensibilidad del canal 3, que se satura a los 47° C (320 K), es la posible confusión entre incendios y otros rasgos del paisaje muy calientes en las imágenes de verano, como bordes de nubes o suelos desnudos (Belward, 1991a). Esta confusión es especialmente clara en los espacios mediterráneos, en donde las masas forestales se imbrican frecuentemente con espacios agrícolas o suelos desnudo. La hora de adquisición de las imágenes puede suponer, igualmente, un obstáculo potencial para la cartografía de incendios forestales a partir del canal 3; es decir, a partir de la detección de incendios activos en el momento de la adquisición de la imagen. Este procedimiento requiere que la frecuencia de adquisición se corresponda con la duración de los incendios. Además, la mayor parte de estos trabajos se han centrado más en la detección de incendios que en su cartografía o evaluación superficial.

Junto a los trabajos que se basan en la utilización del canal 3, hemos encontrado algunos estudios recientes de gran interés que demuestran la utilidad de los índices de vegetación calculados a partir de los canales rojo e infrarrojo cercano, así como otros que incorporan el componente reflectivo del canal infrarrojo medio para realizar una estimación espacial de los efectos del fuego.

Uno de los trabajos pioneros en la utilización de estos índices de vegetación para la detección y delimitación de áreas quemadas fue llevado a cabo por Malingreau (1984). En un ensayo realizado en Indonesia sobre una zona afectada por grandes incendios en el Norte de Borneo en 1983, se observó un drástico decremento en los valores del índice entre las imágenes anterior y posterior al incendio. Este cambio permitía delimitar con claridad la zona afectada por el fuego, si bien se ponían de manifiesto una serie de dificultades relacionadas con la sensibilidad del índice

utilizado a las interferencias atmosféricas (nubes, humo, vapor de agua, etc.). Una experiencia similar se llevó a cabo en Brasil (Matson y Holben, 1987), aunque en esta ocasión se compararon los valores del índice en píxeles próximos a un incendio, con aquellos calculados en píxeles afectados por el fuego. También aquí se observó un significativo decremento de los valores del índice en el área quemada.

En un estudio más reciente, llevado a cabo sobre una amplia zona de bosque boreal en el interior de Alaska (Kasischke et al., 1993), se utilizaron, en lugar de los índices de vegetación calculados para las imágenes diarias, dos imágenes obtenidas a partir de la composición multitemporal de las anteriores, correspondientes a la primera quincena de junio y la última de agosto. Mediante la resta de ambas se obtuvo la cartografía y evaluación del área afectada por los incendios producidos en la zona en el período de tiempo analizado. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia del análisis multitemporal de los índices de vegetación para detectar grandes incendios (hasta el 89,5 % de los superiores a 2.000 has), aunque la precisión disminuye hasta el 73,2 % para los de más de 1.000 has. Por lo que respecta a la evaluación del área quemada, se obtuvieron estimaciones de hasta el 98 % en incendios superiores a 5.000 has. Kasischke y French (1995) ampliaron este estudio utilizando imágenes de 3 años (1990, 91 y 92), con objeto de comprobar la eficacia del método para detectar incendios de más de 400 has y estimar su superficie. Los resultados obtenidos, muy similares a los presentados en el trabajo anterior, demostraron que, en la mayor parte de los casos, las imágenes NOAA infra-estiman el área quemada. Se plantean como posibles fuentes de error, la resolución espacial de las imágenes y la utilización de compuestos en lugar de imágenes diarias, por los posibles problemas de ajuste geométrico entre las imágenes.

En un ámbito mediterráneo, Martín y Chuvieco (1995) aplicaron una metodología similar sobre un gran incendio ocurrido en el levante español en 1991. A partir de los índices de vegetación (NDVI), derivados de imágenes anteriores y posteriores al incendio, se utilizaron técnicas de detección de cambios para discriminar el área quemada. El mismo procedimiento se aplicó a los compuestos multitemporales, calculados a partir de los NDVI diarios, con objeto de comprobar los efectos de esta composición multitemporal sobre la estimación del área quemada. Aunque ambas estimaciones resultaron bastante precisas, la obtenida con las imágenes diarias ofreció mejores resultados (95 % de coincidencia con las estadísticas oficiales frente al

88 % para los compuestos). Estos resultados confirman las suposiciones de Kasischke y French (1995) respecto a los problemas que presentan los compuestos multitemporales de imágenes para la estimación de áreas quemadas, debido a la dificultad para conseguir un buen ajuste entre las imágenes. Pereira et al. (1994) realizaron un estudio similar en Portugal. En esta ocasión se aplicó una corrección a las imágenes diarias con el propósito de eliminar los efectos atmosféricos. Se utilizó para la corrección un método simplificado en el que se consideraron valores estándar en toda la imagen para el cálculo de aerosoles. Esta generalización provocó errores en la corrección que resultaron afectar negativamente a la discriminación de las áreas quemadas.

Razafimpanilo et al. (1995) han desarrollado una interesante metodología para estimar el área afectada por incendios forestales a partir de datos del canal 2 y el NDVI. El método consiste en estimar una función que relacione los valores del canal 2 y el NDVI con la proporción de área quemada, tomando como referencia los valores encontrados en la bibliografía sobre medidas de radiometría en áreas totalmente quemadas y los datos extraídos de la imagen para zonas no afectadas y áreas quemadas. El método parece ofrecer buenos resultados, especialmente cuando el contraste espectral entre la zona quemada y la vegetación sana es fuerte. Sin embargo, presenta el inconveniente de haber sido desarrollado a partir de datos simulados por lo que no es posible determinar aún su validez para datos reales.

---

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es evaluar las posibilidades de la aplicación de imágenes adquiridas por el sensor AVHRR a bordo de los satélites de la serie NOAA, a la cartografía e inventario de superficies afectadas por grandes incendios forestales (mayores de 500 has) a escala regional. Para abordar este estudio se ha elegido como área piloto la Península Ibérica. La frecuencia y dimensión que los incendios forestales suelen alcanzar en esta región hacen que resulte idónea para ensayar la metodología que en este trabajo se propone, ya que las imágenes NOAA-AVHRR restringen su empleo a grandes incendios como consecuencia de su resolución espacial, al tiempo que su amplio radio de cobertura favorece su utilización en estudios a escala regional y/o global. Se pretende, pues, demostrar la utilidad de este tipo de información en el estudio de áreas quemadas en un ámbito mediterráneo donde la

estructura del paisaje, el tipo de vegetación y el tamaño de los incendios dificulta, al menos teóricamente, la utilización de imágenes de baja resolución espacial.

Nuestro objetivo es discriminar las áreas potencialmente afectadas por incendios forestales y aislarlas del resto de cubiertas de la imagen reduciendo en lo posible los errores de omisión y comisión. En este sentido consideramos clave investigar sobre las bandas más adecuadas para llevar a cabo esa discriminación, las técnicas de composición multitemporal más apropiadas para evitar posibles ruidos en la imagen y las técnicas de discriminación más sencillas y precisas.

Proponemos, igualmente, el uso de la información generada a partir de las imágenes, para realizar una primera aproximación al análisis geográfico de los grandes incendios ocurridos en nuestro país en los años de estudio mediante la generación de una base de datos a escala regional conteniendo información espacializada de aquellas variables más directamente relacionadas con el inicio y propagación del fuego. Este análisis puede aportar una visión complementaria sobre los factores que determinan la ocurrencia de grandes incendios en la Península Ibérica, así como una visión más global de las áreas afectadas por el fuego. Esta información sería de gran interés de cara a planificar posibles intervenciones de carácter preventivo así como para establecer estrategias de recuperación de zonas afectadas.

---

## METODOLOGÍA

El proceso metodológico desarrollado en este estudio aparece esquematizado en la figura 2. Consistió, básicamente, en la corrección geométrica de las imágenes, su análisis radiométrico, el cálculo de variables derivadas de la información contenida en las bandas originales y su posterior tratamiento, de cara a obtener una metodología que permitiera aislar los píxeles correspondientes a zonas afectadas por incendios del resto de los píxeles de la imagen. Esta metodología debía cumplir el doble objetivo de ser consistente en el espacio y en el tiempo, lo que haría posible su aplicación a escala nacional al finalizar la temporada de incendios.

### Selección de imágenes

Las imágenes utilizadas en este trabajo proceden de la serie de satélites NOAA, que se di-

señó inicialmente con el propósito de complementar la información meteorológica facilitada por plataformas geosíncronas como GOES o METEOSAT. Estos satélites operan a una altitud que oscila entre los 833 y 870 km y cuentan con una órbita polar y heliosíncrona. La mayoría de los sensores a bordo de los satélites NOAA adquieren imágenes cada 12 horas, sin embargo

este ciclo puede mejorarse al trabajar con dos satélites de órbitas complementarias que operan sincrónicamente (Cracknell, 1997). Por ello, teóricamente podemos obtener al menos 4 imágenes diarias sobre una misma zona de la superficie terrestre. En la actualidad existen 3 satélites operativos el NOAA-12 y el 15 que cubren la órbita de la mañana y el NOAA-14 que cubre la de

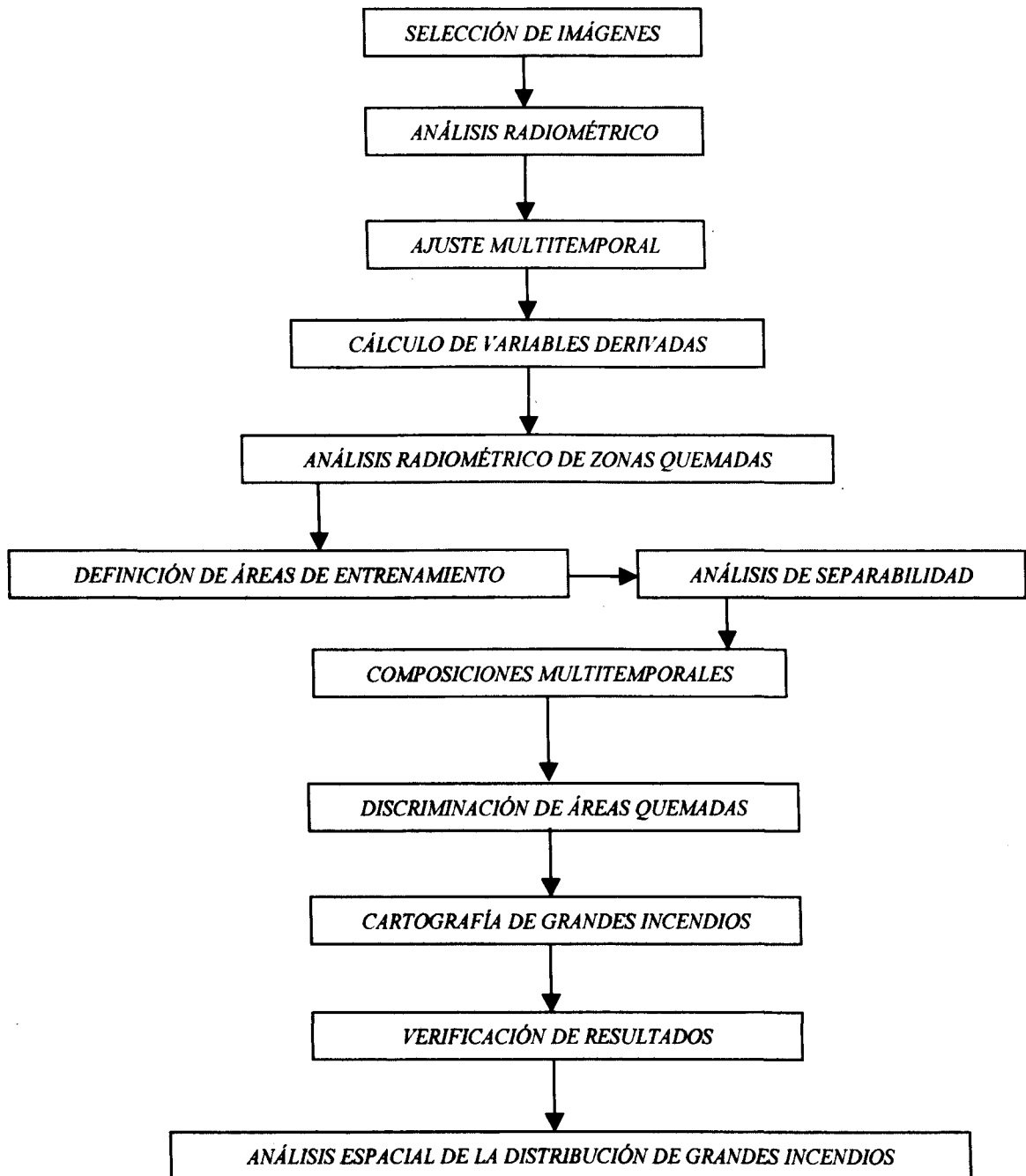


Figura 2. Esquema metodológico

la tarde. Los satélites NOAA cuentan con diversos sensores a bordo, la mayoría de ellos de interés meteorológico y oceanográfico. De todos ellos el más idóneo para aplicaciones medioambientales como la que nos ocupa es el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Se trata de un radiómetro de barrido multiespectral con una resolución espacial aproximada en el nadir de 1,1x1,1 Km. Debido a la amplitud de barrido que realiza ( $\pm 55,4^\circ$ ), el tamaño del pixel puede degradarse hasta 2,4 x 6,5 Km en los extremos de la imagen. Con ese ángulo de observación y a la altura a la que operan los satélites NOAA, cada imagen obtenida por el AVHRR cubre un área aproximada de 3.000 km de lado. En cuanto a su resolución espectral, el AVHRR adquiere datos en 5 canales espectrales, uno en el visible, uno en el infrarrojo cercano, otro en el medio y dos en el térmico.

Para la realización de este trabajo se han utilizado imágenes NOAA adquiridas por el sensor AVHRR sobre la Península Ibérica en los años 1991, 1994 y 1995. La elección del período de estudio se hizo con el propósito de que la serie de datos analizada fuera lo suficientemente larga como para permitirnos comprobar la consistencia temporal de la metodología propuesta. Además, nos pareció muy conveniente para demostrar su validez el hecho de que los 3 años que abarca nuestro período de estudio fueran extraordinariamente dispares en lo que a ocurrencia de grandes incendios forestales se refiere. Así, mientras el año 95 fue uno de los de más baja incidencia de la última década, en los años 91 y 94, y en especial en este último, se batieron récords en cuanto a superficie total afectada en nuestro país por incendios de grandes dimensiones.

Aunque lo ideal hubiera sido poder contar con todas las imágenes disponibles para el período seleccionado, sólo pudimos contar con 10 imágenes consecutivas de cada mes considerado de interés por la ocurrencia de incendios forestales (de junio a septiembre) para los años 1991 y 1994. Para el año 1995, en cambio, se adquirieron todas las imágenes disponibles de los meses de julio, agosto y septiembre y los diez últimos días del mes de junio. Finalmente se obtuvieron un total de 144 imágenes. Las de los años 1991 y 1994 (80 en total) fueron adquiridas por el satélite NOAA-11 y las de 1995 (64 imágenes) por el NOAA-14. Todas las imágenes corresponden a la órbita ascendente y por tanto la hora de adquisición se sitúa entre las 13 y las 14 horas.

Antes de abordar cualquier intento de desarrollo metodológico, fue preciso realizar un análisis

exhaustivo de los datos disponibles. El primer paso consistió en verificar visualmente cada una de las 144 imágenes con objeto de eliminar aquellas que no fueran válidas para el estudio. Fueron descartadas todas las que presentaban abundante cobertura nubosa, así como aquellas que no cubrían, al menos, el 50 % del área de estudio. Finalmente se retuvieron como válidas un total de 94 imágenes.

## **Correcciones geométricas y radiométricas**

Para realizar cualquier estudio multitemporal a partir de la teledetección espacial, es preciso que las mediciones realizadas por el sensor sean consistentes a lo largo de la serie. Esto implica realizar algunos procesos de ajuste geométrico que garanticen esa coherencia, de tal forma que los cambios detectados entre imágenes sean debidos a cambios reales en el terreno, y no a errores en el registro espacial entre ellas. Una inadecuada superposición entre imágenes podría llevar a conclusiones erróneas, puesto que pondría en evidencia cambios entre fechas que serían debidos, no tanto a modificaciones reales en el terreno como, simplemente, a estar analizando pixels correspondientes a áreas distintas.

Para la corrección geométrica de las imágenes utilizadas en nuestro trabajo, se ha seguido un método en tres fases:

- Navegación de la imagen, corrigiendo las bruscas deformaciones iniciales a partir de un modelo orbital.
- Corrección cartográfica de las imágenes.
- Ajuste multitemporal entre imágenes mediante puntos de control.

Esta última fase de ajuste fue extremadamente laboriosa y, dada la gran cantidad de imágenes utilizadas en el trabajo, requirió un esfuerzo considerable, especialmente por la inversión en tiempo que nos vimos obligados a realizar. No obstante, consideramos que ésta es una fase clave de nuestro estudio, pues los errores de ajuste observados tras la corrección orbital (desplazamientos entre imágenes en algunos casos superiores a 5 píxeles) habrían dificultado enormemente la realización de un análisis multitemporal como el que se plantea en este trabajo.

Además de las deformaciones cartográficas, las imágenes de satélite presentan otro tipo de distorsiones provocadas, en su mayor parte, por la interferencia de los componentes atmosféricos en la radiación reflejada por la superficie y,

en menor medida, por problemas derivados de un mal funcionamiento del sensor. En cualquier caso, resulta necesario eliminar estas distorsiones mediante las oportunas correcciones radiométricas que tratan de acercar los niveles digitales originales a los que habría presentes en la imagen en caso de una recepción ideal. Este tipo de correcciones se hacen especialmente necesarias cuando se trata de realizar estudios multitemporales, puesto que los factores que afectan a una imagen no suelen ser comparables a los que experimenta otra en fecha distinta. En nuestro caso las imágenes utilizadas fueron calibradas radiométricamente antes de su adquisición, de tal forma que los valores originales registrados en cada banda por el sensor se transformaron a valores de reflectividad o albedo en el caso de los canales ópticos (1 y 2) y a temperaturas de brillo en los canales térmicos (4 y 5).

### **Cálculo de variables derivadas**

Una vez realizadas las correcciones oportunas sobre las bandas originales de nuestras imágenes, procedimos a calcular una serie de variables derivadas que consideramos de interés para la aplicación que nos ocupa. En la revisión bibliográfica tuvimos ocasión de comprobar que los índices de vegetación se han utilizado con frecuencia en la cartografía de incendios forestales con imágenes de satélite mediante la comparación multitemporal de imágenes obtenidas antes y después del incendio. Estos índices de vegetación son combinaciones aritméticas de bandas espectrales, basados fundamentalmente en el contraste que muestra la vegetación entre las bandas espectrales del rojo e infrarrojo cercano (Figura 1), que resulta original frente a otras cubiertas no vegetales. Tienden a realzar la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie y atenúan la de otros factores, como el suelo y las condiciones atmosféricas y de iluminación que pueden producir interferencias en la señal radiométrica. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es, sin duda, el más utilizado en la literatura especializada, ya que reúne dos características muy importantes: la sencillez de su cálculo y su idoneidad para compensar las diferencias en la reflectividad absoluta de las distintas superficies. Basándonos en estas características del NDVI y teniendo en cuenta que ha sido el índice más utilizado en la aplicación de imágenes NOAA-AVHRR a la cartografía de incendios, decidimos calcular este índice a partir de nuestras imágenes con el objetivo de demostrar su aplicabilidad a este tipo de estudios en el ámbito geográfico que nos ocupa. Partimos de la hipótesis de que

un decremento brusco en el valor del NDVI, indicará una notable pérdida en la cobertura vegetal. El efecto del fuego, en consecuencia, quedará patente en estos índices, a partir del seguimiento de su evolución temporal en la serie de imágenes disponibles. Sin embargo, varios autores han puesto de relieve el efecto sobre este índice de factores externos que dificultan su interpretabilidad, sobre todo cuando se trata de analizar áreas extensas o series de datos largas. Entre estos problemas, los más importantes se relacionan con: la radiancia debida al suelo, las alteraciones ocasionadas por la atmósfera y la geometría de la observación y el ángulo de elevación solar.

Para tratar de atenuar o eliminar algunos de estos efectos decidimos incluir en nuestro estudio dos nuevos índices, el SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) y el GEMI (*Global Environment Monitoring Index*), específicamente diseñados para atenuar el efecto distorsionador del suelo, el primero, y los problemas ocasionados por la atmósfera, el segundo.

La mayor parte de trabajos realizados hasta el momento demuestran que los IV son especialmente sensibles en el espacio espectral que corresponde a la vegetación, pero esa sensibilidad disminuye a medida que nos alejamos de ese espacio (resto de cubiertas). Por tanto, planteamos como hipótesis para estos índices, que pueden resultar óptimos para discriminar entre zonas con y sin vegetación, en cambio no lo sean para discriminar entre distintas cubiertas sin vegetación, como sería el caso de las zonas afectadas por incendios y otras de suelos desnudos, barbechos o de vegetación esclerófila. Consideramos, por tanto, apropiado estudiar la posibilidad de generar un índice optimizado para la discriminación de áreas quemadas, teniendo en cuenta el comportamiento que suelen presentar estas zonas en las bandas espectrales disponibles para nuestro estudio (aquéllas en las que recoge información el sensor AVHRR).

Para la formulación del índice tomamos como referencia el trabajo de Verstraete y Pinty (1996) sobre diseño de índices espectrales óptimos. Según estos autores el comportamiento radiativo representativo de una cubierta tiende a converger en el espacio espectral hacia un punto común que difiere en función del tipo de cubierta o incluso de sus características peculiares. El análisis de las cubiertas presentes en la imagen nos llevó a establecer que el espacio espectral más apropiado para el estudio de las áreas quemadas, teniendo en cuenta la información disponi-



ble, estaba definido por las regiones espectrales del rojo e infrarrojo cercano, siendo el punto de convergencia en ese espacio, para las zonas afectadas por incendios, el definido por los valores de albedo obtenidos en el análisis radiométrico de las cubiertas de la imagen en las dos bandas espectrales consideradas de interés para la cartografía de incendios forestales. De este análisis concluimos que los valores de albedo representativos de las zonas afectadas por incendios se situaban en torno a 0,1 en el rojo (canal 1) y 0,06 en el infrarrojo cercano (canal 2). Después de contrastar estos valores con los mencionados en la bibliografía (Pereira et al., 1997) se decidió utilizarlos como referencia en la formulación del índice. 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 (Figura 3). 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 antes aludido, en el espacio espectral considerado:

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

donde  $pc_r$  y  $pc_{ir}$  son los valores de convergencia para las bandas del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente (0,1 y 0,06 en nuestro caso) y  $\rho_r$  y  $\rho_{ir}$  son los valores de reflectividad de cada pixel de la imagen en las bandas del rojo e infrarrojo respectivamente. De acuerdo a esta fórmula el valor del índice será menor 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. Sin embargo, la mayoría de los índices están formulados de tal forma que su valor aumenta cuanto mayor es la cantidad o mejor el estado de la cubierta que representan (i.e. el NDVI se aproxima a 1, su valor máximo, cuanto mayor es la densidad y/o vigor de la cubierta vegetal). Para que nuestro índice siga la misma lógica a la hora de ser interpretado basta con redefinirlo como la inversa de la distancia euclidiana. Así tendríamos formulado el Índice de Área Quemada (IAQ) como:

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

Los valores del IAQ tenderán a converger hacia el espacio espectral definido como caracte-

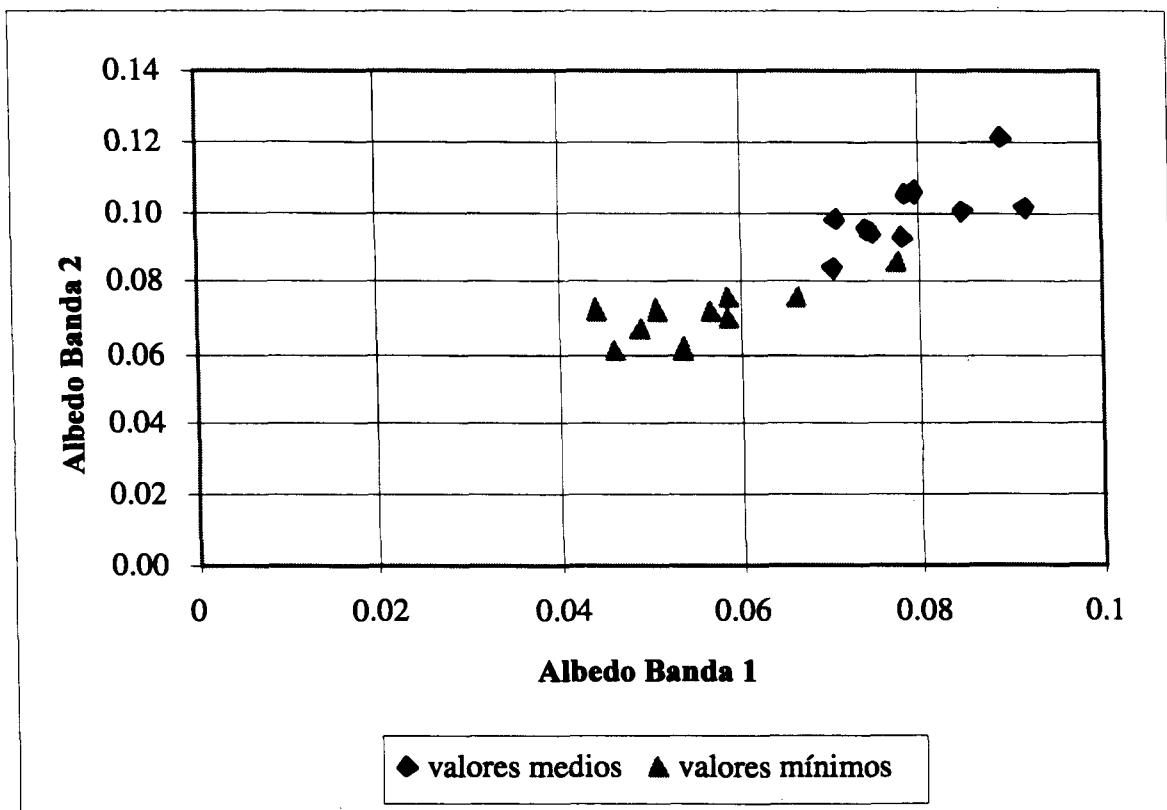


Figura 3. Valores medios y mínimos de pixels muestreados sobre áreas quemadas en varias imágenes de la serie dentro del espacio espectral definido por los valores de albedo de los canales 1 y 2

rístico de las zonas quemadas. Además, su sensibilidad aumenta a medida que se aproxima a ese espacio lo que, al menos teóricamente, indica una mayor capacidad para discriminar cambios en ese tipo de cubierta. Sin embargo, al ser un índice ortogonal y no un cociente entre bandas, el IAQ presenta el inconveniente de ser 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.

### Análisis de la capacidad de bandas originales e índices espectrales para la discriminación de áreas quemadas

Como ya comentamos en el epígrafe de objetivos, para llevar a cabo una correcta discriminación sobre la imagen de los pixels afectados por incendios resultaba imprescindible realizar un análisis sobre la banda o combinación de bandas más adecuadas para llevar a cabo esa discriminación. Es posible obtener una valoración cuantitativa de la capacidad de discriminación de las bandas originales y variables derivadas, aplicando algún criterio estadístico que permita comprobar si estas variables son capaces de separar las áreas quemadas del resto de cubiertas de la imagen. Un sencillo criterio es la distancia normalizada, expresada como:

$$D_{norm} = \frac{|\mu_c - \mu_q|}{\sigma_c + \sigma_q}$$

tomando como referencia los valores de media ( $\mu$ ) y desviación típica ( $\sigma$ ) obtenidos sobre áreas quemadas ( $q$ ) y otras cubiertas de interés ( $c$ ). Estos valores se calcularon a partir de los datos extraídos de una de las imágenes empleadas en el trabajo, concretamente la correspondiente al día 8 de agosto de 1994, que fue selec-

cionada por tener escasa cobertura nubosa y estar próxima a la fecha de ocurrencia de los incendios tomados como referencia del área quemada. Como se puede observar en la tabla 1, las mayores distancias espectrales entre las cubiertas muestreadas y las áreas quemadas, corresponden al IAQ, salvo en el caso del agua, donde la banda 5 presenta la mayor separabilidad. Entre los índices de vegetación el GEMI presenta, en general, la mayor capacidad de discriminación. En cuanto a las bandas originales, se confirma que la banda 2, correspondiente al infrarrojo cercano, es la más apropiada para detectar áreas quemadas pues, salvo en el caso de las superficies de agua y sombras de nubes, presenta los valores de separabilidad más elevados.

### Composiciones multitemporales

Otro de los objetivos a abordar en este trabajo era el estudio de las técnicas de composición multitemporal más apropiadas para evitar posibles ruidos en la imagen y facilitar así la delimitación de las áreas quemadas. Como vimos en la revisión bibliográfica, hasta el momento la discriminación de áreas afectadas por incendios se ha basado, casi exclusivamente, en la comparación multitemporal de imágenes adquiridas antes y después del incendio. Este hecho se fundamenta en las consecuencias espaciales que el paso del fuego tiene sobre la vegetación y en sus repercusiones sobre el comportamiento espectral de la misma. La selección de las imágenes de referencia resulta un factor clave en este tipo de estudios, pues es fundamental que éstas sean las más indicadas para evidenciar el cambio provocado por el incendio, discriminándolo de otros posibles cambios. En definitiva, se trata de conseguir unas imágenes donde el contraste sea nítido para las zonas afectadas por el fuego y no existan elementos como nubes y sombras que dificulten su observación. Además, existen otros factores externos (atmosféricos, de iluminación y geometría de la observación, fundamentalmente) que pueden llegar a enmascarar los cambios reales en el terreno sobre imágenes adquiridas en dos fechas distintas. Para intentar minimizar algunos de esos efectos se han desarrolla-

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

	Bandas originales				Índices espectrales			
	Banda 1	Banda 2	Banda 4	Banda 5	NDVI	GEMI	SAVI	IAQ
Agua	4,34	5,00	7,01	8,99	1,86	4,80	1,90	4,66
Sombras de nubes	2,00	1,15	1,67	1,88	1,37	0,67	1,33	2,19
Forestal arbolado	1,46	2,20	0,83	0,74	3,46	3,10	3,48	5,55
Forestal arbustivo	0,03	2,49	1,54	2,09	2,92	4,52	2,97	5,90
Cultivos secano /vegetación natural	0,97	3,32	1,82	2,58	2,65	4,80	2,69	6,58
Cultivos secano	2,81	4,65	0,82	1,09	1,70	3,92	1,74	9,23

do una serie de técnicas basadas en la composición multitemporal de imágenes. La más utilizada en el caso de las imágenes captadas por el sensor NOAA-AVHRR es la conocida como Maximum Value Composite (MVC; Holben, 1986), que se aplica a una serie multitemporal de imágenes georeferenciadas y convertidas a valores de NDVI. El MVC se obtiene seleccionando, para cada pixel, el valor máximo del NDVI que se encuentre en la serie de imágenes considerada. Ésta abarca normalmente un período que oscila entre una semana y un mes.

Al igual que ocurría con los índices de vegetación, el MVC es una técnica creada para reducir la influencia de los factores externos en el estudio multitemporal de las cubiertas vegetales. Teniendo en cuenta que el propósito de nuestro trabajo es el análisis de zonas con un comportamiento espectral muy distinto al de las áreas cubiertas con vegetación, es lógico pensar que existan otros métodos de composición multitemporal más apropiados a nuestros objetivos. Nosotros planteamos en este trabajo un nuevo método de composición multitemporal basado en valores de temperatura. El método consiste en retener, para cada período, los valores de los pixels que presenten la temperatura de brillo más alta en el canal 4 del AVHRR (menos afectado que el canal 5 por las perturbaciones atmosféricas). De esta forma evitaríamos, al menos teóricamente, la contaminación por nubes (las nubes presentan temperaturas más bajas que las zonas quemadas en el canal 4) y la debida a las sombras que éstas producen (en teoría una zona en sombra debe presentar una temperatura más baja que otra expuesta directamente a los rayos del sol). Al mismo tiempo, esta técnica de composición tendería a realizar la señal procedente de las áreas quemadas, pues se ha demostrado que las zonas recientemente afectadas por un incendio presentan una temperatura ligeramente superior a las zonas no afectadas por el fuego con lo cual, si se produjera un incendio durante el período que abarca el compuesto, éste tendería a retener el pixel afectado por presentar una temperatura más alta.

### **Técnicas para la discriminación de áreas quemadas**

Buena parte de las aplicaciones de la teledetección a la cartografía de incendios forestales realizadas hasta el momento con imágenes de baja resolución espacial, se han basado en el análisis multitemporal de imágenes adquiridas antes y después de los incendios. La componente temporal ha estado presente en este tipo de aplicaciones sobre la base de que un cambio tan brusco como el pro-

vocado por un incendio sobre la cubierta vegetal, será más evidente si lo comparamos con la situación existente antes del paso del fuego. Esto es cierto en la mayor parte de los casos, no obstante, existe una serie de factores que pueden dificultar la interpretación de los resultados de un análisis multitemporal de este tipo (Li et al., 1997). Así por ejemplo, si trabajamos sobre un área extensa, como es nuestro caso, es posible que en la imagen se registren otros cambios sobre la vegetación además de los ocasionados por los incendios forestales. Por ejemplo, el provocado por la cosecha de algunos cultivos extensivos de secano que presentaban un considerable vigor vegetativo en los primeros días de junio y han dado lugar a la presencia de suelo descubierto en el mes de agosto. Lo mismo ha ocurrido en las zonas forestales o agroforestales ocupadas por vegetación herbácea. El cambio en la respuesta espectral que se produce en estas zonas puede llegar a ser de similares características y magnitud al experimentado en una zona forestal afectada por el fuego, de tal forma que en una imagen de cambios resultaría muy difícil discriminarlos apropiadamente.

Otra posibilidad es plantear la discriminación del área quemada sobre las imágenes diarias y/o sobre compuestos temporales, haciendo uso en este caso de la componente temporal, no para detectar los cambios ocurridos en las cubiertas sino únicamente para eliminar las posibles fuentes de ruido y/o confusión inherentes a este tipo de información como por ejemplo, la presencia de nubes que puede impedir la observación de la cubierta de interés en un día concreto. Con objeto de comprobar la validez de los dos procedimientos, hemos optado por incluir en nuestro desarrollo metodológico dos enfoques distintos: uno multitemporal y otro unitemporal.

### **Enfoque multitemporal**

El enfoque multitemporal está basado en la comparación temporal entre imágenes. Entre las técnicas de detección de cambios, la más sencilla y, sin duda, con más frecuencia utilizada en una gran variedad de ámbitos geográficos es la diferencia de imágenes (Singh, 1989). Una simple resta entre las imágenes de dos fechas, previamente homogeneizadas radiométrica y geométricamente, permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios (Chuvienco, 1996). Basándonos en experiencias anteriores descritas en la revisión bibliográfica, decidimos aplicar este sencillo método de detección de cambios a nuestro estudio, tomando como referencia los compuestos multitemporales basados en la temperatura del canal 4 y obtenidos para datos de IAQ (pues como vimos

este índice demostró ser el más adecuado para discriminar las áreas quemadas del resto de cubiertas de la imagen). Los compuestos seleccionados incluyen las imágenes de junio (situación previa al incendio) y agosto-septiembre (situación posterior al incendio). Esto es:

$$\text{IMGCAM} = (\text{IMG\_AGOSEPT} - \text{IMG\_JUNIO})$$

El resultado de este cálculo será una imagen de cambios que representa las variaciones experimentadas en los valores del índice entre las dos fechas de referencia. En nuestro caso, las áreas quemadas serán definidas por los valores más altos en la imagen resultado, al tratarse de los sectores con mayor ganancia del índice.

La resta de compuestos dio como resultado una imagen de cambios que fue preciso segmentar en dos categorías (quemado y no quemado). Como acabamos de apuntar, los incendios podrán ser identificados en la imagen de cambios al presentar los valores más altos. La cuestión reside en establecer el umbral más adecuado para realizar la discriminación. Cualquier criterio para establecer ese umbral resulta criticable, ya que el fenómeno quemado no es completamente discontinuo en el espacio. Cualquier área quemada ofrece diversos grados de afectación, lo que dificulta establecer fronteras nítidas entre lo afectado y no afectado por el fuego. En este caso, recurrimos a la información disponible sobre los valores promedio que presenta el IAQ en las áreas quemadas y otras cubiertas de la imagen tomados a partir de un muestreo de algunas de las imágenes utilizadas en el trabajo. Analizando estos valores comprobamos que después de las zonas quemadas (y descartando la categoría sombra de nubes) los valores más altos del IAQ corresponden a las zonas de vegetación forestal arbustiva (media 107 y desviación típica 25). Estos datos, junto con los valores obtenidos para las áreas quemadas (media 489 y desviación típica 39), fueron utilizados para simular los valores esperados en la imagen de decrementos. Se consideró un escenario pesimista (mínimo contraste) con objeto de evitar en lo posible los errores de comisión. Así, considerando la situación más desfavorable, las zonas no afectadas por incendios en el mes de junio presentarían como máximo un valor igual a la media de las zonas forestales arbustivas más dos desviaciones típicas, es decir 157 ( $107 + 25 \times 2$ ), mientras que las zonas quemadas en el compuesto de agosto-septiembre ofrecerían como mínimo un valor igual a la media menos dos desviaciones, tomando como referencia los valores del IAQ para zonas quemadas, es decir, 411 ( $489 - 39 \times 2$ ). De esta forma, la mínima diferencia esperada para zonas afectadas por incendios en la imagen de cambios sería igual a 254 (411-

157). Por tanto, este fue el umbral que consideramos más apropiado para la segmentación de nuestra imagen de cambios. En consecuencia, se asignó la categoría de incendio a todos los píxeles con valores superiores a 254 en esta imagen.

### Enfoque unitemporal

El enfoque unitemporal se abordó utilizando como referencia un solo compuesto obtenido para los valores de IAQ a partir de la máxima temperatura del canal 4 en las imágenes disponibles de los meses de agosto y septiembre. Se consideró que, al incluir imágenes del final de la estación, este compuesto debería recoger todos los incendios ocurridos en el período estival. En este caso, la alternativa más simple para discriminar el área quemada, y la que utilizamos en el estudio, consistió en establecer un umbral de corte que permitiera segmentar la imagen analizada en dos categorías (quemado y no quemado). Decidimos utilizar un umbral fijo, basado en un múltiplo de la desviación típica. Un primer análisis de las estadísticas elementales de las imágenes nos reveló la necesidad de aplicar, antes de proceder a segmentar la imagen, una máscara que eliminase las zonas de agua, pues éstas ofrecían algunos valores anómalos que alteraban el cálculo de las medidas estadísticas de centralidad (media) y dispersión (desviación típica). Para eliminar estas zonas se utilizó el mapa de ocupación del suelo Corine (EEA, 1996). A partir de él se obtuvo una máscara binaria otorgando un valor 1 a las zonas de agua (mar, ríos, lagos, embalses, etc.) y 0 al resto de las cubiertas. Sobre esta máscara binaria se aplicó un análisis de distancias considerándose finalmente dentro de la categoría de agua todos los píxeles situados a menos de 2 km de las áreas inicialmente asignadas a la categoría 1. Esto se hizo con el propósito de evitar posibles problemas derivados de un mal ajuste entre las dos fuentes (imagen y mapa), sobre todo en las zonas del interior de la Península donde la dificultad para tomar puntos de control pudo determinar un mayor error en el ajuste geométrico de las imágenes.

Después de eliminar las zonas de agua se calcularon de nuevo las estadísticas elementales de las imágenes observándose valores promedio del IAQ en torno a 25 y desviaciones típicas de 40 aproximadamente. Como tuvimos ocasión de comprobar a partir de datos obtenidos sobre algunas imágenes del año 1994, el IAQ presentaba valores inferiores a 200 para las zonas no quemadas y en torno a 400 para las zonas recientemente afectadas por un incendio. Por ello, consideramos apropiado establecer el umbral de corte en un valor intermedio (en torno a 300), lo que, teniendo en cuenta las estadísticas de las imágenes, se podría traducir en un umbral situado en la

media más 7 desviaciones típicas. Se consideró, por tanto, que correspondían a zonas quemadas, todos los píxeles que rebasaban ese umbral.

Con objeto de mejorar la calidad de los resultados obtenidos mediante la aplicación de umbrales simples pensamos abordar la discriminación de áreas quemadas sobre cada uno de los compuestos, utilizando la componente temporal para enriquecer la información disponible, aproximando los datos de referencia al momento de extinguirse el incendio, lo que nos permitiría captar una señal más nítida y reducir ruidos en la discriminación. Como el número de imágenes disponibles mensualmente era muy reducido para 1991 y 1994, realizamos dos compuestos, uno con las imágenes de julio y agosto y otro con las de agosto y septiembre. De esta forma nos aseguramos una mayor probabilidad de obtener imágenes libres de nubes y sombras, sobre todo en aquellas zonas donde la cubierta nubosa resultaba más frecuente (N y NW peninsular). En este caso el umbral para discriminar entre quemado y no quemado en cada compuesto se estableció, tal y como acabamos de describir, a partir de la desviación típica, después de haber eliminado las zonas de agua que podrían provocar problemas al presentar valores extremos del IAQ. Por último, se combinaron los resultados de los dos compuestos reteniendo los incendios detectados en ambos.

Finalmente, aplicamos a las imágenes diarias disponibles un procedimiento similar al que acabamos de describir, aunque en este caso fue preciso hacer uso de la componente temporal para evitar las confusiones con clases espectrales similares (fundamentalmente sombras de nubes). Este procedimiento tiene la ventaja de ofrecer un mayor contraste entre la zona quemada y no afectada, pues existe la posibilidad de analizar imágenes donde los incendios hayan ocurrido muy recientemente, presentando una señal más nítida como consecuencia de la presencia de materiales procedentes de la combustión. Además, el empleo de imágenes diarias reduce los problemas derivados de un buen ajuste geométrico entre imágenes, siempre difícil de obtener con un pixel tan grueso como el del sensor AVHRR. Sin embargo, este tipo de imágenes presenta el inconveniente de la cobertura de nubes y los efectos atmosféricos, que pueden impedir o dificultar la adquisición de información sobre las zonas potencialmente afectadas por el fuego. También existe la posibilidad de que se produzcan confusiones con clases espectralmente similares (agua, sombras de nubes). Esto podría resolverse incluyendo alguna rutina para comparar las imágenes diarias entre sí, de tal manera que un área se considere afectada por el fuego cuando haya sido discriminada como tal en un número suficiente de imágenes. Esto evitaría problemas que sólo ocurren en

algunos días (no son constantes), mientras las zonas de agua, también espectralmente similares y constantes, podrían determinarse a partir de información auxiliar.

Sin embargo, el problema más importante que hemos encontrado se refiere a la falta de consistencia radiométrica, tanto espacial como temporal, de las imágenes diarias, que impide aplicar un solo umbral a toda la serie. A pesar de haber sido calibradas y corregidas, persiste una importante heterogeneidad radiométrica entre imágenes, por lo que el establecimiento de un umbral fijo resultaba poco apropiado. Se optó entonces por utilizar un método de clasificación no supervisada (algoritmo ISODATA) para agrupar los píxeles de cada imagen en dos categorías (incendio y no incendio). Este algoritmo es bastante adecuado para definir valores homogéneos dentro de la imagen, si bien tiene el inconveniente de definir los grupos en función no sólo de su valor espectral sino también de su tamaño. En nuestro caso, esto suponía un inconveniente pues los píxeles quemados o con valores similares al área quemada (en el caso del IAQ zonas de agua y sombras de nubes) ocupan una pequeña proporción respecto al total de píxeles de la imagen, por lo que el algoritmo tendería a agruparlos con otras categorías espectrales similares. Para resolver este problema se incluyeron en el análisis las zonas de la imagen ocupadas por el mar.

Finalmente, para separar incendios de sombras de nubes, partimos de la base de que las zonas correspondientes a sombras de nubes no resultaban un elemento estable sobre la imagen, sino que su posición variaba diariamente. Los incendios, en cambio, constituían un elemento más permanente, pues su señal perduraba en el tiempo, aún con ligeras transformaciones. Así pues, para verificar si un pixel etiquetado inicialmente como incendio en el análisis de las imágenes diarias lo era en realidad, sumamos las imágenes resultantes de la aplicación del algoritmo de ISODATA agrupándolas por meses y después comparamos las sumas para cada mes. Así, aquellos pixel que en la imagen de suma mensual tienen un valor igual o superior a dos y en la imagen de suma del mes posterior tienen un valor superior a cero se consideran incendios.

---

## RESULTADOS

Hasta aquí hemos comentado los principales aspectos de la metodología propuesta para la discriminación de grandes incendios forestales a escala regional. A continuación presentamos los resultados obtenidos tras la aplicación de los procesos metodológicos mencionados.

Nuestro interés al abordar este trabajo era dotarle de operatividad. Para ello resultaba necesario realizar una adecuada verificación de los resultados obtenidos. En nuestro caso, la ausencia y/o dificultad para obtener datos referidos a la localización espacial detallada de los incendios que se produjeron en la Península durante los años analizados, dificultó notablemente esta etapa del trabajo. Tan sólo en algunos casos nos fue posible contar con el perímetro del incendio, por lo que se optó por realizar la verificación de los incendios detectados a partir de los datos estadísticos que proporciona el Área de Defensa contra Incendios Forestales de la Dirección General para la Conservación de la Naturaleza (DGCN) y que están referidos espacialmente a una cuadrícula de 10 x 10 km que corresponde a la malla UTM del mapa topográfico del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:200.000.

Para realizar la verificación de nuestro trabajo de una forma automática, era conveniente disponer de un fichero digital con la representación de las cuadrículas en las que se produjo algún gran incendio (mayor de 500 has) durante el período de estudio. Para ello fue preciso crear una plantilla gráfica dentro de un sistema de información geográfica, con la localización de todas las cuadrículas del país lo que nos permitió asociar la información estadística contenida en los partes de incendio a dichas cuadrículas para obtener así información espacial en formato digital.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los métodos de discriminación descritos en la metodología sobre el análisis de las imágenes del año 1994. Como se puede observar, los mejores resultados corresponden al método unitemporal aplicado sobre varios compuestos (um-

brales multitemporales). Estos resultados mejoran sustancialmente los obtenidos sobre un sólo compuesto (de 74 a 88 %). Cabe destacar en este sentido, el aumento de la eficacia en la discriminación de los incendios de menor tamaño (500 a 1.000 has). Esto puede deberse al hecho de utilizar imágenes más próximas a la fecha en que ocurrieron los incendios, lo que implica una mayor nitidez y contraste en la señal que recoge el compuesto sobre las zonas afectadas. La eficacia de este método de discriminación resulta aún más evidente al comprobar que permite la detección del 100 % de los incendios mayores de 1.000 has. Por lo que respecta a los errores de comisión (incendios erróneamente detectados), los valores son muy similares a los obtenidos con las otras técnicas, salvo para el caso de los umbrales aplicados sobre imágenes diarias. Este método supone una mejora significativa respecto a los anteriores en lo que se refiere a los errores de comisión, sin embargo supone un notable retroceso respecto a los errores de omisión (sólo el 54 % de los incendios fueron correctamente identificados). Esto es debido en buena parte al método utilizado para el establecimiento de umbrales (algoritmo ISODATA), que sólo incluye en la categoría quemado los pixels con valores más altos de IAQ, lo que minimiza la posibilidad de confusión con otras cubiertas, pero a riesgo de dejar de detectar los incendios más pequeños o donde el grado de afectación de la vegetación fue menor.

En cuanto al método de detección de cambios, los resultados obtenidos no fueron del todo satisfactorios, especialmente en los incendios de menor tamaño (500 a 1.000 has). De los siete incendios ocurridos dentro de ese rango de superficie en el año 1994, sólo uno fue correctamente detectado. Esto se debe, probablemente, a que el um-

**Tabla 2.** Verificación de los resultados obtenidos con las distintas técnicas de discriminación de áreas quemadas para el año 1994. Porcentaje de acuerdo con las estadísticas oficiales.

	COMPUESTOS IAQ-MAXTb4			IMÁGENES DIARIAS
	Umbrales simples	Comparación de compuestos	Umbrales multitemporales	ISODATA
Nº Total incendios	74,2	68,6	88,5	54,2
500 - 1.000 has	28,6	14,2	42,8	14,2
1.000 - 2.000 has	75	75	100	50
2.000 - 3.000 has	100	75	100	25
3.000 - 4.000 has	100	100	100	100
> 4.000 has	85,7	85,7	100	78,5
Errores de comisión (% píxeles discriminados sobre incendios sobre áreas no afectadas)	32	30	31	15

bral establecido para la segmentación de la imagen fue excesivamente restrictivo, por lo que las áreas quemadas de tamaño relativamente pequeño (para la resolución espacial de NOAA), donde la mayoría de los píxeles constituyen una mezcla de área quemada y vegetación no afectada, no presentaban suficiente contraste como para ser discriminadas apropiadamente. Los resultados mejoran considerablemente para incendios superiores a 1.000 has (casi el 90 % de los incendios mayores de 3.000 has fueron correctamente identificados). Debemos apuntar aquí el avance que supone, respecto a otros trabajos similares, la utilización de un nuevo método de composición que sustituye al tradicional MVC, menos apropiado para este tipo de aplicaciones. También resulta original frente a estos trabajos la utilización de un índice espectral específicamente diseñado para la discriminación de áreas quemadas, en lugar de los tradicionales índices de vegetación que presentan el inconveniente de experimentar decrementos similares para todas las zonas que han perdido vegetación entre fechas, ya sea como consecuencia de un incendio o de cualquier otro factor. Con el IAQ este problema no se plantea, pues las zonas de suelo desnudo presentan valores inferiores a las áreas con vegetación, mientras que las zonas quemadas ofrecen valores muy superiores, por lo que en una imagen de decrementos una pérdida de vegetación que implicase dejar el suelo al descubierto nunca podría confundirse con la ocasionada por un incendio forestal.

Consideramos preciso incidir aquí en la dificultad que supone encontrar un umbral apropiado para discriminar las áreas quemadas, pues aplicar un umbral lo suficientemente restrictivo para minimizar los errores de comisión supone siempre un aumento notable en los de omisión y viceversa.

Como conclusión a este epígrafe sobre los resultados obtenidos con las distintas técnicas apli-

cadadas a la discriminación espectral de incendios forestales, presentaremos a continuación los resultados obtenidos para los años 1991 y 1995. Cada una de las técnicas descritas hasta el momento se aplicaron en un principio a los datos del año 1994, no obstante, fueron ensayadas también con el resto de imágenes disponibles para el estudio con objeto de comprobar su consistencia temporal. Para simplificar aquí la exposición de los resultados, presentaremos la verificación realizada sobre los resultados obtenidos con la técnica que había demostrado ser más eficaz para la discriminación de acuerdo a los datos de 1994. Tal y como hemos visto, el mejor balance entre errores de omisión y comisión para ese año se obtuvo mediante la aplicación de umbrales multitemporales a los compuestos de julio-agosto y agosto-septiembre.

Como se puede observar en la tabla 3, la eficacia en la detección por el método de umbrales multitemporales resulta también elevada en los años 1991 y 1995. Si bien se observa una disminución en la eficacia global. Ésta se debe fundamentalmente, a la mayor proporción de incendios inferiores a 1.000 has ocurridos estos años respecto a los del año 1994. Hemos tenido ocasión de comprobar cómo la detección de estos incendios resulta especialmente complicada, sea cual sea el método de análisis. Esto se relaciona con la resolución espacial de las imágenes utilizadas en el trabajo. Por lo que respecta a los errores de comisión para el año 1991 se mantienen en valores similares a los encontrados en 1994. En el año 1995, en cambio, estos errores son considerablemente más altos. Creemos que esto puede deberse a un problema de falta de datos estadísticos para la verificación en la zona de Portugal, donde se han detectado más incendios de los registrados en las estadísticas obtenidas. No obstante, la imposibilidad de obtener más información nos ha impedido corroborar esta hipótesis.

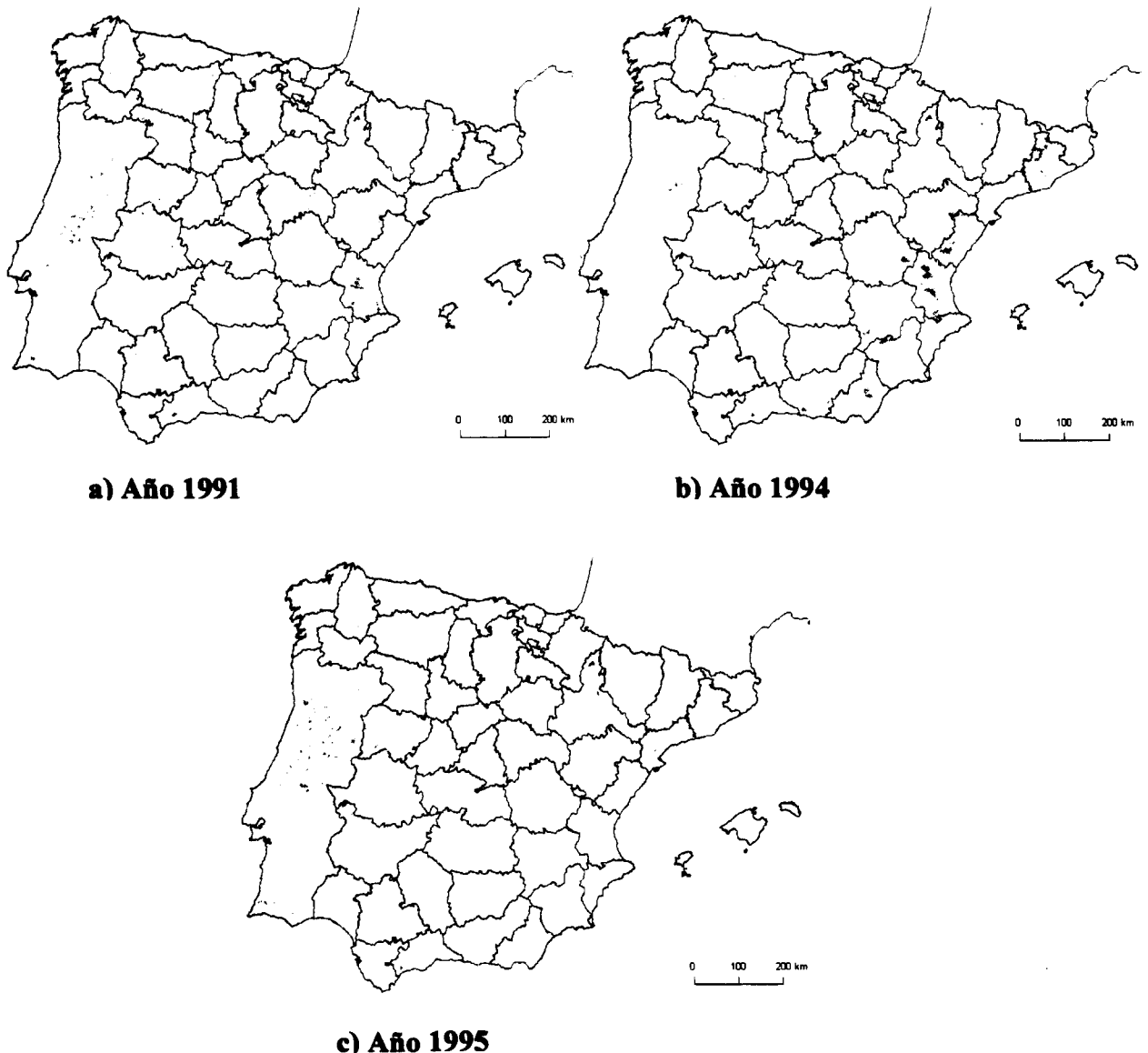
**Tabla 3.** Verificación de los resultados obtenidos para los años 1991 y 1995 con el método de umbrales multitemporales.

1991	Estadísticas oficiales		Imágenes NOAA (B/A)*100	1995	Estadísticas oficiales		Imágenes NOAA (B/A)*100
	Nº Incendios (A)	Nº Incendios (B)			Nº Incendios (A)	Nº Incendios (B)	
Nº Total incendios	28	20	71,4	Nº Total incendios	8	6	75
500 - 1.000 has	13	8	61,5	500 - 1.000 has	5	3	60
1.000 - 2.000 has	8	5	62,5	1.000 - 2.000 has	2	2	100
2.000 - 3.000 has	2	2	100	2.000 - 3.000 has	0	0	—
3.000 - 4.000 has	3	3	100	3.000 - 4.000 has	1	1	100
> 4.000 has	2	2	100	> 4.000 has	0	0	—
Errores de comisión (% píxeles discriminados sobre incendios sobre áreas no afectadas)		24		Errores de comisión (% píxeles discriminados sobre incendios sobre áreas no afectadas)		45	

Finalmente y con objeto de obtener una visión espacial de los resultados conseguidos, hemos elaborado un mapa que incluye los grandes incendios discriminados utilizando las imágenes NOAA para los tres años de estudio a partir del método de umbrales multitemporales (Figura 4). Para el conjunto de la península Ibérica, se han discriminado un total de 187 grandes incendios en los tres años. El total de superficie detectada, que incluye también algunos incendios menores a 500 has, alcanza las 573.177 has, de las que 413.457 corresponden a España y 150.720 a Portugal. De estas zonas, 4.235 has fueron quemadas dos veces en el período, lo que da idea de la gran recurrencia que puede tener

el fenómeno en algunos lugares especialmente frágiles desde el punto de vista ambiental como es el caso del litoral mediterráneo.

En cuanto a la distribución espacial, este mapa síntesis de los tres años nos muestra, como sectores más vulnerables a los grandes incendios, la franja levantina y el centro-norte de Portugal. Las provincias más afectadas en el período fueron Valencia, con 116.644 has (el 12 % de su superficie provincial), Castellón, con 34.243 has (el 5 % de la superficie provincial), y Barcelona con 37.631 has, lo que supone también aproximadamente el 5 % de su superficie total.



**Figura 4.** Cartografía de los grandes incendios ocurridos en la Península Ibérica durante los años 1991, 1994 y 1995



---

## **CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE LAS ÁREAS AFECTADAS**

Tras comentar brevemente la distribución espacial de los principales incendios cartografiados en nuestro período de estudio, nos parecía oportuno incluir un análisis de las principales variables territoriales asociadas a la incidencia de estos eventos. Si bien, no se trata del objetivo principal de este trabajo (centrado en la propuesta de un método para la discriminación de grandes incendios a partir de imágenes de baja resolución), parecía conveniente realizar este comentario, ya que al tratarse de un método digital la integración con variables explicativas en el entorno de un SIG resultaba una consecuencia bastante directa y lógica de nuestro trabajo.

Las variables auxiliares, relacionadas con la ocurrencia de incendios, obtenidas para esta fase del trabajo hacen referencia a las condiciones topográficas (altitud media, de la que se derivaron pendientes y orientaciones), al clima dominante y a la cobertura del suelo. Todas ellas se encontraban referenciadas en la misma proyección y con el mismo tamaño del pixel que el archivo con los incendios cartografiados en los tres años de nuestro estudio. Esto permitió cruzar esta capa de información con las otras variables auxiliares, de cara a inferir algunas tendencias sobre la influencia de dichas variables en la ocurrencia de grandes incendios. Lamentablemente, algunas de las variables analizadas sólo estaban disponibles para España, por lo que este comentario se limita al territorio peninsular español.

Para llevar a cabo el análisis de los datos, hemos obtenido tabulaciones cruzadas entre la capa de incendios y las variables auxiliares consideradas. Para enriquecer el comentario, en algún caso se ha hecho una previa recodificación de las variables auxiliares. Por ejemplo, en la capa de alturas y de pendientes se han señalado distintos rangos (Tablas 4 y 5), y en la cobertura del suelo se han eliminado aquellas clases con escasa o nula posibilidad de quemarse (zonas urbanas, salinas, playas, áreas dunares, etc.) (Tabla 6). Las tablas cruzadas nos permiten analizar qué cantidad de pixels quemados se incluyen en cada categoría de las distintas variables, comparando su distribución con la que presentan en el conjunto del país (Tablas 4 a7).

Del análisis de estas tablas hemos podido extraer las siguientes conclusiones preliminares:

- Aunque las relaciones no son completamente determinantes, se observa una clara tendencia de los grandes incendios a ocupar rangos de altura y pendiente intermedios (entre los 500 y los 1.100 metros, y entre el 10 y 30 %, respectivamente) (Tablas 4 y 5).
- Con claridad, las coníferas sufren una incidencia del fuego mucho mayor que la de otras cubiertas vegetales (se queman casi tres veces más de lo que cabría esperar en función de la superficie que ocupan), siendo las frondosas, superficies de pastos y praderas las menos afectadas proporcionalmente (Tabla 6).
- Se puede observar una clara asociación entre grandes incendios y aridez, con una fuerte incidencia del fenómeno en los climas mediterráneos, sobre todo en el litoral y de montaña (Tabla 7).

Obviamente, se trata de respuestas parciales, obtenidas a partir del análisis de un período corto y referidas a un tipo muy especial de incendio (superior a 500 has), por otra parte el más problemático, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. Ahora bien, pensamos que la información derivada de las imágenes de satélite puede servir de soporte para otras investigaciones encaminadas en esta línea, sobre todo si se consigue obtener una serie temporal suficientemente larga.

---

## **CONCLUSIONES**

A lo largo de este trabajo hemos tenido ocasión de comentar los numerosos problemas que las imágenes AVHRR presentan a nuestro objetivo, algunos de ellos inherentes al propio sensor (falta de calibración de los canales ópticos, resolución espacial, deformaciones geométricas), y otros específicos de las imágenes que teníamos disponibles (falta de información sobre calibraciones atmosféricas realizadas, hora de paso del satélite, ángulo de observación e iluminación). Estos últimos resultan menos críticos, pues podrían suplirse si dispusiéramos de otras imágenes o de recepción propia, pero han sido muy importantes en nuestro trabajo. Algunas de las dificultades se han solventado con tratamientos específicos comentados en el texto. Otros podrían obviarse en caso de contar con una serie de imágenes más larga, mejor calibrada y con mayor información auxiliar (períodos de adquisición, parámetros angulares). En cualquier caso, con las limitaciones propias de las imágenes que hemos podido emplear en este trabajo, nos

**Tabla 4. Distribución de áreas quemadas en distintos rangos de alturas**

Altitud (metros)	No Quemado		Quemado		Total	
	Píxeles	%	Píxeles	%	Píxeles	%
1-500	145396	35,24	780	22,83	146176	35,13
501-800	112546	27,28	1181	34,56	113727	27,34
801-1100	98587	23,89	1014	29,68	99601	23,94
1100-1500	41684	10,10	321	9,39	42005	10,10
> 1500	14417	3,49	121	3,54	14538	3,49
Total	412630	100,00	3417	100,00	416047	100,00

**Tabla 5. Distribución de áreas quemadas en distintos rangos de pendientes**

% pendiente	No Quemado		Quemado		Total	
	Píxeles	%	Píxeles	%	Píxeles	%
0,01-10	345387	86,57	2540	74,36	347927	86,47
10-30	50198	12,58	849	24,85	51047	12,69
30-50	2505	0,63	22	0,64	2527	0,63
50-100	562	0,14	5	0,15	567	0,14
>100	305	0,08	0	0,00	305	0,08
Total	398957	100,00	3416	100,00	402373	100,00

**Tabla 6. Distribución de áreas quemadas en distintas coberturas del suelo**

Tipo de cobertura	No Quemado		Quemado		Total	
	Píxeles	%	Píxeles	%	Píxeles	%
Agrícola	77186	26,07	225	7,10	77411	25,87
Pastos y prados	64573	21,81	61	1,92	64634	21,60
Matorrales	81679	27,59	1665	52,54	83344	27,85
Froncosas	27835	9,40	62	1,96	27897	9,32
Coníferas	36146	12,21	1131	35,69	37277	12,46
Bosque mixto	8628	2,91	25	0,79	8653	2,89
Total	296047	100,00	3169	100,00	299216	100,00

**Tabla 7. Distribución de áreas quemadas en distintas regiones climáticas**

Tipo de clima	No Quemado		Quemado		Total	
	Píxeles	%	Píxeles	%	Píxeles	%
Oceánico de Costa	25960	6,37	16	0,47	25976	6,32
Oceánico de Interior	31413	7,70	168	4,95	31581	7,68
Mediterráneo Continental	169511	41,57	1143	33,67	170654	41,5
Mediterráneo Semicontinental	79069	19,39	185	5,45	79254	19,27
Mediterráneo Litoral	31961	7,83	903	26,59	32864	7,99
Mediterráneo con Influencia	7783	1,91	10	0,29	7793	1,89
Clima de Montaña	26381	6,47	339	9,99	26720	6,49
Clima Mediterráneo de Montaña	33249	8,15	591	17,41	33840	8,23
Total	407741	100,00	3395	100,00	411136	100,00

parece que los resultados obtenidos demuestran el interés de seguir trabajando con este tipo de información de cara a obtener una visión global del área afectada por grandes incendios. Su bajo coste y alta frecuencia de adquisición hacen del AVHRR un sensor idóneo para obtener ese objetivo, salvando, en la medida que sea posible, sus problemas y limitaciones.

---

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación forma parte de una tesis doctoral realizada con el apoyo económico del Ministerio de Educación y Cultura a través del programa de becas de formación de personal investigador. Parte del desarrollo metodológico se realizó en el ámbito del proyecto MegaFiREs (ENV-CT96-0256) financiado por la Unión Europea. Nuestro agradecimiento a los organismos e instituciones que nos facilitaron la información necesaria para la elaboración del trabajo: la Dirección General para la Conservación de la Naturaleza, la Dirección General del Medio Natural de la Generalitat de Cataluña y el Centro Nacional de Información Geográfica de Portugal, que nos facilitaron la información necesaria para abordar el proceso de verificación de resultados; y el Centro Común de Investigación de la Unión Europea que puso a nuestra disposición las imágenes utilizadas en este estudio.

---

## REFERENCIAS

- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, Rialp.
- Chuvieco, E. y Congalton, R.G. (1988). Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. *Geocarto International* 4: 41-53.
- Cracknell, A.P. (1997). *The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. Londres, Taylor & Francis.
- EEA (1996). *Natural Resources*. Copenhagen, European Environmental Agency.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1417-1434.
- 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. y French, N. H. (1995). Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR NDVI composite data. *Remote Sensing of Environment* 51: 263-275.
- 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.
- Li, Z., Cihlar, J., Moreau, L., Huang, F. y Lee, B. (1997). Monitorin fire activities in the boreal ecosystem. *Journal of Geophysical Research* 102: 29611-29624.
- Malingreau, J. P. (1984). Remote sensing and disaster monitoring. A review of application in Indonesia. *18th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. Paris: 283-297.
- 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.
- Matson, M. y Holben, B. (1987). Satellite detection of tropical burning in Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 8: 509-516.
- Pereira, J. M. C., Cadete, L. y Vasconcelos, M. J. P. (1994). An assessment of the potential of NOAA \ AVHRR HRPT imagery for burned area mapping in Portugal. *2nd International Conference on Forest Fire Research*. Coimbra, Portugal: 665-666.
- 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.
- Pereira, J.M.C., Sousa, A.M.O., Sá, A.C.L, Martín, M.P. y Chuvieco, E. (1999). *Regional scale burnt area mapping in Southern Europe using NOAA-AVHRR 1km data*. Springer-Verlag, en prensa
- Razafimpanilo, H., Frouin, R., Iacobellis, S. F. y Somerville, R. C. (1995). Methodology for estimating burned area from AVHRR reflectance data. *Remote Sensing of Environment* 54: 273-289.
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10: 989-1003.
- 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: 17-31.

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.