

## Seguimiento mediante el empleo de la teledetección

# Evolución espacial de grandes incendios forestales

M. Pilar Martín Isabel y Emilio Chuvieco Salinero  
Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares  
Colegios, 2 28801 Alcalá de Henares

En este artículo se presenta un método sencillo para seguir la evolución espacial de grandes incendios a partir de los datos del canal 3 del sensor NOAA-AVHRR. El ensayo metodológico se ha realizado sobre un gran incendio que arrasó, durante el verano de 1991, una superficie aproximada

de 20.000 has en la comarca valenciana de la Hoya de Buñol. Sobre las imágenes diarias del canal 3 se ha discriminado el área ardiendo o recientemente quemada, para el período en el que el incendio permaneció activo. Esto nos ha permitido generar un mapa de síntesis que refleja

el desarrollo espacial diario del fuego. Este producto puede ser de gran valor de cara a validar los modelos de comportamiento del fuego, así como para mejorar nuestro conocimiento de los factores que afectan la propagación de grandes incendios.

A simple method for fire growth mapping using channel 3 data is presented. An 20,000 hectare forest fire affecting the Mediterranean coast of Spain during the summer of 1991 is

used as case study. Discrimination of burned area was performed on every image during the days the fire was active. Overlay techniques were used to obtain a synthesis

map of the daily evolution of the fire. This product can generate valuable input for fire behaviour programmes to improve our understanding of the factors affecting fire spread.

### INTRODUCCIÓN

La aparición de los incendios forestales en el tiempo, viene determinada por una serie de parámetros ambientales y socioeconómicos que, en las últimas décadas, han sufrido una notable transformación, configurando un escenario en el que los incendios no sólo son más probables, sino que, cuando se inician, son más difíciles de detener (Prieto, 1989). Así, un pequeño número de incendios escapa cada año a las labores de control, arrasando extensas superficies y provocando importantes daños desde el punto de vista económico y ecológico.

Según la clasificación del ICONA, se consideran grandes incendios aquellos que afectan a una superficie total superior a las 1.000 has, aunque a partir de 500 has se catalogan ya como incendios de gran magnitud. Entre 1982 y 1992 se produjeron en nuestro país un total de 696 incen-

dios de más de 500 has, lo que supone tan sólo el 5,6 % del total de incendios ocurridos en el mismo período. Sin embargo, estos grandes incendios arrasaron una superficie próxima a las 879.000 has, es decir el 36,3 % de la superficie total quemada en ese período. En la figura 1 se muestra la evolución de estos grandes incendios en nuestro país durante la última década. El año 1985 aparece con el mayor número de incendios (162) y la mayor superficie afectada (más de 200.000 has). Sin embargo, en cifras relativas, el año 1991 arrojó el balance más negativo, puesto que más de la mitad de la superficie total quemada ese año (concretamente el 56,1 %), se debió a grandes incendios.

Que el fuego escape al control y se convierta en una gran incendio se puede atribuir a dos grupos de condiciones: de tipo ambiental, referidas fundamentalmente a las condiciones meteorológicas y del combustible, y de carácter organizativo. Entre las condiciones ambientales,

destaca la pérdida del mosaico vegetal tradicional, como consecuencia de las transformaciones agrarias recientes. Esa estructura tradicional del paisaje, con frecuente imbricación entre espacios agrícolas y forestales, dificultaba la transmisión del calor y el avance del fuego a la vez que facilitaba su extinción, al ofrecer mayor accesibilidad hacia los focos activos. La homogeneidad paisajística ha dado lugar a una mayor continuidad espacial y vertical en el combustible, que hace más probables los incendios de gran intensidad, con mayor extensión y efectos más destructivos. También resulta decisiva la fisiografía del terreno. En las zonas forestales muy abruptas las dificultades para controlar el incendio son mayores, debido al efecto chimenea que se produce en los barrancos y laderas de las montañas. En cuanto a las condiciones de carácter organizativo, el desconcierto, la confusión o el desorden durante la extinción suelen ser denominador común en este tipo de incendios catastróficos.

Resulta evidente, pues, que el fenómeno de los grandes incendios tiene una considerable importancia en nuestro país. Ello justifica la adopción de medidas especiales para su prevención y control, sobre todo si tenemos en cuenta que las consecuencias que se derivan de este tipo de incendios pueden ser muy graves. En este sentido, la aplicación de imágenes procedentes de sensores de baja resolución como el NOAA-AVHRR, al estudio de los incendios forestales, constituye una herramienta sumamente útil, como tendremos ocasión de demostrar a lo largo del presente artículo.

### TELEDETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES: EMISIVIDAD DE LAS SUPERFICIES QUEMADAS

La teledetección es una técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre, gracias a la existencia de una interacción energética entre dichos objetos y un sensor. Este flujo energético es una forma de radiación electromagnética, y permite caracterizar las diversas cubiertas que forman la superficie terrestre en función de su comportamiento en las distintas regiones del espectro.

En consecuencia, para abordar la aplicación de esta técnica al estudio de los incendios forestales, hemos de revisar las características espectrales asociadas a este fenómeno, en especial, en lo que se refiere al comportamiento radiativo del incendio en sí mismo, pues la caracterización espectral de un incendio activo permitirá verificar la viabilidad de la teledetección, tanto para detectarlo eficazmente, como para estudiar su evolución. Para esto es preciso repasar algunas leyes que gobiernan la radiación electromagnética.

La temperatura de un cuerpo puede determinarse a partir de la radiación que emite, te-

niendo en cuenta la ecuación de Planck, que relaciona la cantidad de energía emitida por un objeto con su temperatura para distintas longitudes de onda:

donde  $M_{\lambda}$  indica la emitancia radiativa espectral de un cuerpo negro ( $n$ ), a una determinada longitud de onda ( $\lambda$ );  $h$  es la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  Ws<sup>2</sup>);  $K$  es la constante de Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$  Ws<sup>2</sup>/K);  $c$ , la velocidad de la luz;  $\lambda$ , la longitud de onda, y  $T$ , la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin).

En pocas palabras, la fórmula de Planck nos señala que cualquier objeto por encima del cero absoluto (0 K, -273 °C) radia energía, y que ésta se incrementa con la temperatura. A la vez, a mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. Por lo tanto, a partir de esta fórmula podemos calcular la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro ( $\lambda_{max}$ ), conociendo su temperatura ( $T$ ) en Kelvin. Esta es la llamada ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} = 2898 \text{ } \mu\text{m K/T} [2]$$

que tiene una gran importancia para seleccionar la banda más conveniente para detectar un determinado fenómeno, siempre que se conozca su temperatura.

La temperatura de un incendio es difícil de calcular, pues varía mucho con el tipo de combustible, viento reinante y topografía. A partir de medidas de laboratorio, se han estimado temperaturas que oscilan entre 570 y 870 K, en el frente de llamas, aunque pueden alcanzarse los 1700 K para incendios con combustibles pesados (Robinson, 1991). En consecuencia, de acuerdo a la ley de Wien, la banda espectral más sensible a los focos activos se sitúa en el rango comprendido entre 3,33 y 5,08  $\mu\text{m}$ , correspondiente al infrarrojo medio. Esto ha permitido aplicar, muy satisfactoriamente, la teledetección espacial y aérea a la detección de incendios, además de apoyar las tareas de extinción.

#### EMPLEO DE IMÁGENES NOAA EN LA DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES

La teledetección espacial, y más concretamente las imágenes NOAA, han demostrado su utilidad en el estudio de diversos aspectos relacionados con los incendios forestales en la medida en que contribuyen a mejorar el conocimiento de las condiciones ambientales previas al incendio (estado del combustible; Burgan y Hartford, 1993), facilitando las labores de organización y aumentando la eficacia de las labores preventivas. De igual forma, este tipo de imágenes resultan especialmente indicadas para la elaboración de una cartografía de grandes incendios, así como para la estimación del área afectada por los mismos (Kasischke et al.,

1993; Martín y Chuvieco, 1993).

La serie de satélites NOAA, inicialmente diseñada para aplicaciones meteorológicas, se muestra cada vez más como una fuente básica para el seguimiento de fenómenos dinámicos y de escala global gracias a las características técnicas de sus sensores y a la larga serie de datos con que se cuenta (desde 1979). De los diversos sensores instalados a bordo de los satélites NOAA, el más frecuentemente utilizado en aplicaciones medioambientales es el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), radiómetro de barrido multispectral que proporciona imágenes digitales sobre 5 bandas del espectro (rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y dos en el térmico) con una resolución de 1,1 km x 1,1 km en el nadir y un ciclo de cobertura de 12 horas, que puede reducirse a 6 al existir en funcionamiento dos satélites de órbitas complementarias que operan sincrónicamente.

Las imágenes NOAA se han aplicado muy satisfactoriamente a la detección de incendios y a la cartografía y evaluación de áreas quemadas, en función de la emitancia espectral de las distintas superficies (vegetación sana y quemada), que está directamente relacionada con su temperatura absoluta (Chuvieco y Martín, 1994).

El canal 3 (3,55 - 3,93  $\mu\text{m}$ ) resulta el más apropiado para la detección de focos de alta temperatura, por situarse en el infrarrojo medio (Robinson, 1991). Su eficacia para esta aplicación se ha demostrado en numerosos estudios, especialmente sobre áreas de difícil acceso y detección por medios convencionales, como es el caso de Indonesia (Malingreau, 1984), Canadá (Flannigan y Vonder Haar, 1986), Amazonia (Matson y Holben, 1987; Setzer y Pereira, 1991), China (Jijia et al, 1989) y África ecuatorial (Langaas, 1992).

Estas experiencias señalan una magnífica eficacia de estas imágenes para detectar grandes incendios (hasta el 90 % de los superiores a 400 has en el caso de Canadá: Flannigan y Vonder Haar, 1986), pero la precisión desciende notablemente para los de pequeña extensión (hasta un 15 % en el mismo estudio).

Por lo que respecta al seguimiento y eva-

luación de áreas quemadas, se han llevado a cabo estudios interesantes, sobre todo a escala regional y en zonas de difícil acceso. En la cuenca del Amazonas se han desarrollado varios proyectos para estimar el área total afectada anualmente por incendios forestales en el territorio brasileño utilizando la información procedente del canal 3 de las imágenes NOAA-AVHRR, con objeto de calcular la tasa de deforestación anual que está experimentando el país (Pereira et al, 1990). Basándose en los buenos resultados obtenidos, se decidió la utilización de este tipo de imágenes en un programa operacional, desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) para la detección de incendios en el territorio brasileño, especialmente en aquellas zonas de interés para la conservación. Los resultados son cartografiados y publicados semanalmente en un periódico nacional (Setzer y Pereira, 1991).

A pesar de que el canal 3 del AVHRR ha demostrado su utilidad, tanto para la detección

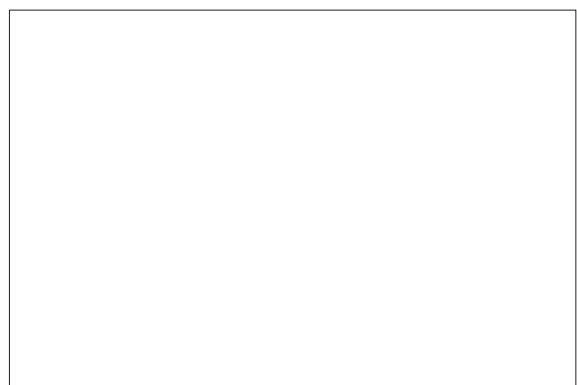
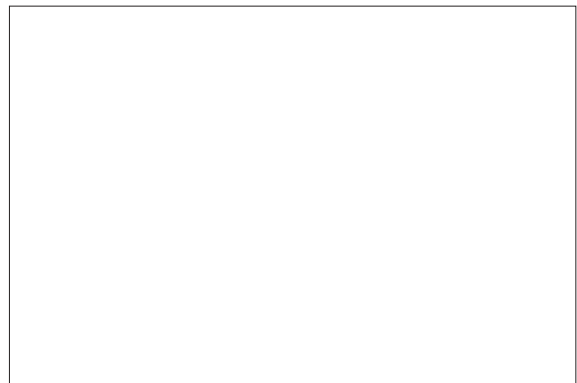


Fig. 1: Evolución del número de incendios de más de 500 has y de la superficie afectada por los mismos en España (1982-1992)

Fig. 2: Localización del área de estudio. En el interior del recuadro sombreado se ha representado el perímetro del incendio de Buñol.

como para el seguimiento y evaluación de incendios forestales, existen varios factores que dificultan la utilización operativa de estas imágenes. Por un lado, el propio tamaño del pixel (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). Por otro, la baja sensibilidad térmica del canal 3 del AVHRR, que puede crear problemas de sobreestimación del área quemada, sobre todo si tenemos en cuenta que un pixel puede alcanzar la saturación incluso si sólo una pequeña porción del mismo está ocupada por el fuego.

Otro problema 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, 1991). Esta confusión es especialmente clara en los espacios mediterráneos, donde las masas forestales se imbrican frecuentemente con espacios agrícolas o suelos desnudos.

Otras fuentes de error derivadas del uso del canal 3 para la detección de incendios es la presencia de nubes, la hora de adquisición de las imágenes y la propia geometría del sensor.

## OBJETIVOS

El objetivo del trabajo que aquí presentamos es evaluar la aplicación de las imágenes NOAA-AVHRR al seguimiento del desarrollo espacial y temporal de grandes incendios mediante la utilización de imágenes diarias del canal 3. Esta información puede ser de gran utilidad de cara a mejorar y validar los resultados obtenidos a partir de algunos programas de simulación del comportamiento del fuego en el caso

de los grandes incendios, además de resultar de gran ayuda en la planificación de las labores de control de los mismos.

## METODOLOGÍA

### El área de estudio

El área piloto elegida para desarrollar nuestro estudio se encuentra situada

en el interior de la provincia de Valencia (fig. 2), en la Comarca conocida como Hoya de Buñol. Esta zona presenta las características típicas de las montañas costeras mediterráneas. La vegetación está compuesta, fundamentalmente, por coscojares en los suelos mejor conservados y matorrales abiertos en los casos de mayor alteración edáfica. En ambos casos un dosel de pinos (fundamentalmente *pinus halepensis*), procedente de repoblaciones o regeneraciones tras incendios anteriores, cubre en mayor o menor medida a tomillares

y coscojares. Se trata de una zona de relieves abruptos, con pendientes pronunciadas, en algunos casos con valores superiores al 90 %, que propician el desarrollo de grandes incendios. En cuanto al clima, está muy influenciado por la proximidad del Mediterráneo. En verano, la influencia del anticiclón de las Azores, en su situación septentrional, impide la llegada de las perturbaciones atlánticas, causando una intensa sequía. Ésta se ve acentuada por la acción de los vientos de Poniente, que tras su paso por la recalentada Meseta, llegan a la costa valenciana provocando un efecto abrasador. En estas condiciones las temperaturas pueden llegar a los 40 °C, con una bajísima humedad relativa (del 20 al 25 %), creando un ambiente propicio para el inicio y desarrollo de grandes incendios. Además, el factor humano también favorece la alta incidencia del fuego en esta región, al tratarse de un área sujeta a notables transformaciones agrarias y con una importante presencia de actividades de carácter turístico o recreativo.

Esta zona, frecuentemente afectada por incendios forestales, sufrió uno de especial importancia en los últimos días del mes de julio de 1991, que arrasó unas 18.000 has de superficie forestal (ver fig. 2). Este incendio tuvo su inicio en la tarde del día 28 de julio como consecuencia de un rayo provocado por una tormenta seca, y se consideró completamente extinguido el 5 de agosto. La confluencia de una serie de circunstancias, tanto de origen natural (fuertes vientos de Poniente), como provocadas por el hombre (aparición simultánea de focos secundarios intencionados), favoreció la propagación del mismo hasta adquirir dimensiones catastróficas. Las peculiares formas que presenta el perímetro final del incendio, son consecuencia de los factores territoriales de mayor significación en el avance del fuego, principalmente la topografía de la zona, la disposición de la vegetación y la red de carreteras.

### Selección y corrección de las imágenes

Con objeto de realizar un seguimiento exhaustivo de la evolución del incendio decidimos utilizar todas las imágenes disponibles en las fechas en que éste permaneció activo (28 de julio al 4 de agosto de 1991). Después de consultar los archivos de varias estaciones receptoras europeas, pudimos comprobar que ninguno de ellos contaba con la serie completa que pretendíamos utilizar para este proyecto. Finalmente se seleccionaron un total de 8 imágenes. Cinco de ellas fueron adquiridas en la estación de Maspalomas (Islas Canarias), las correspondientes a los días 29 y 30 de julio (ambas diurnas), y 3 y 4 de agosto (la primera nocturna y la segunda diurna y nocturna). Las tres restantes (31 de julio y 1 y 2 de agosto), fueron adquiridas a la estación receptora de Dundee (Escocia), si bien estas imágenes sólo pudieron utilizar-

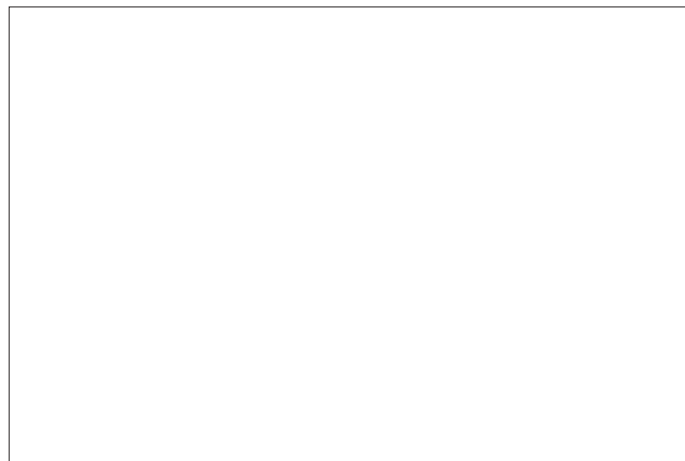
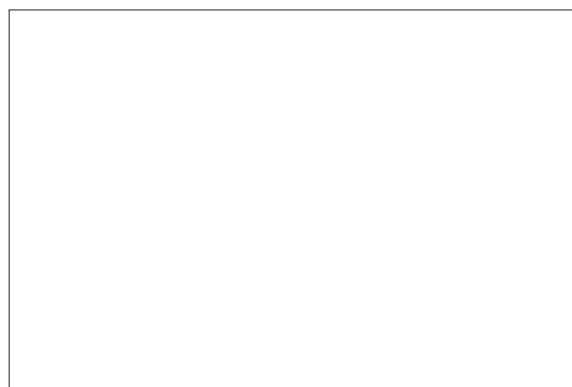


Fig. 3: Perfiles espaciales de temperaturas de brillo para un día antes y un día después del inicio del incendio. El transecto cruza un sector activo, indicado por un aumento brusco de la temperatura de brillo.

Fig. 4: Evolución del incendio a partir de los datos del canal 3. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 28, 29, 30 y 31 de julio, 1 de agosto, 3 de agosto nocturna, 3 de agosto diurna, 4 de agosto nocturna y 4 de agosto diurna.

se de modo cualitativo al no estar codificadas en los niveles digitales originales.

Una vez seleccionadas, fue preciso someter las imágenes a una serie de tratamientos previos, con objeto de garantizar su coherencia radiométrica y geométrica para análisis posteriores, pues para realizar cualquier estudio multitemporal a partir de la teledetección es preciso que las mediciones realizadas por el sensor sean consistentes a lo largo de la serie, de tal forma que los cambios detectados entre imágenes sean debidos a cambios reales en el terreno, y no a diferencias en el calibrado o en el registro espacial entre ellas.

Por lo que respecta a la corrección geométrica, las imágenes NOAA-AVHRR presentan importantes deformaciones debido a su gran ángulo de barrido ( $\pm 55^\circ$ ), por lo que se hace necesario realizar una corrección previa, con objeto de que las imágenes que componen la serie puedan ajustarse tanto entre sí, como a una cartografía básica. En nuestro caso abordamos una primera corrección a partir de la información disponible sobre las características orbitales del sensor. Esto nos permitió corregir las bruscas deformaciones iniciales de la imagen. Posteriormente, mejoramos el ajuste entre imágenes mediante la selección de puntos de control (generalmente embalses o rasgos costeros fácilmente identificables), comunes a todas las imágenes de la serie. Los errores de ajuste se situaron siempre por debajo del tamaño del pixel.

**Temperaturas de brillo multitemporales**

Además de la detección visual de los incendios, a partir de las columnas de humo, las imágenes NOAA nos permiten discriminar los focos activos y medir la temperatura de combustión. Para nuestros objetivos, el aspecto más destacado es la detección y evolución espacial de incendios, a partir de la información proporcionada por el canal 3, situado en el infrarrojo medio. Como ya vimos, esta banda del espectro es especialmente sensible a las altas temperaturas. Sin embargo, inicialmente el canal 3 del NOAA no se diseñó para detectar focos de calor, sino para discriminar nubes, por lo que se satura a temperaturas relativamente bajas (47 °C). Esto implica que aparezcan, en ocasiones, confusiones entre incendios activos y suelos desnudos, ya que en verano éstos alcanzan frecuentemente, en nuestras latitudes, la temperatura de saturación. Ese problema sería fácilmente resuelto si las zonas cercanas al incendio fueran exclusivamente forestales, puesto que las temperaturas de la vegetación sana son siempre inferiores. Otro método para eliminar falsas alarmas consiste en relacionar esta información con la que proporcionan los dos canales térmicos (Malingreau, 1990), o abordar un análisis multitemporal, que relacione las temperaturas de brillo de un momento dado con las

del día precedente.

Para el cálculo de temperaturas de brillo a partir de imágenes NOAA, es preciso, en primer lugar, convertir los valores digitales de la imagen a valores de radiancia. Para ello, hemos utilizado la fórmula propuesta por la Agencia Espacial Europea, en el formato SHARP (ESA-EPO, 1992):

$$L_i = A_i * ND_i + B_i \quad [3]$$

donde  $L_i$  indica la radiancia espectral en una de las bandas infrarrojas;  $ND_i$  el valor digital de la imagen, y  $A_i$  y  $B_i$  los coeficientes de calibración, utilizados por el sensor para la codificación de radiancias, que están incluidos en la cinta.

Una vez obtenidas las radiancias para cada canal, puede calcularse la temperatura de brillo a partir de invertir la fórmula de Planck, dejando la temperatura (Kidwell, 1991):

$$T_b = \frac{c_2 \cdot i}{\ln(1 + c_1 \cdot i^3 / L)} \quad [4]$$

donde  $T_b$  indica la temperatura de brillo;  $i$  la longitud de onda central de la banda correspondiente, y  $c_1$  y  $c_2$  son constantes ( $c_1 = 1,1910659 \times 10^{-5}$  milliwattios/m<sup>2</sup> sr cm<sup>-4</sup> y  $c_2 = 1,438833$  cm K).

Para este proyecto, pretendíamos únicamente seguir la evolución espacial del incendio de Buñol, por lo que bastó trabajar con temperaturas de brillo. Para otros estudios, en donde se requiera obtener la temperatura de superficie, sería preciso realizar ulteriores correcciones. En primer lugar, sería necesario generar alguna corrección atmosférica de estos valores, puesto que los diferentes componentes atmosféricos, en función de su propia temperatura, también emiten radiación de onda larga. A esto hay que añadir los efectos de absorción, especialmente significativos en el caso del vapor de agua. Del mismo modo, sería necesario introducir la corrección de emisividad (Delegido et al, 1991; Prins y Menzel, 1992), pues la superficie terrestre no puede considerarse un cuerpo negro, absorbente y emisor perfecto.

Para obtener un mapa síntesis del desarrollo espacial del incendio, hemos realizado una composición multitemporal de las áreas que estaban ardiendo cada día de los que disponíamos de imágenes. Esa zona activa se ha aislado a partir de un umbral térmico de 317 a 323 K, para las imágenes diurnas, y de 295 a 320 K para las nocturnas. Se han recodificado a 0 los pixels que se situaban fuera de estos umbrales, asociando un código al resto, de acuerdo al día de referencia res-

pecto al inicio del fuego, con objeto de mantener la información relativa al día en que cada zona se encontraba ardiendo. Para evitar las confusiones con los suelos desprovistos de vegetación circundantes, hemos multiplicado cada imagen por una máscara del perímetro quemado, obtenido a partir de las bandas visibles e infrarrojo cercano de imágenes posteriores al incendio. Finalmente, realizamos una superposición de estas imágenes con el área activa en cada día de la serie, para obtener un mapa que sintetizase la evolución espacial del incendio.

**RESULTADOS**

No es el objeto de este trabajo realizar un análisis exhaustivo del comportamiento térmico del incendio, sino de su evolución espacial, por lo que no hemos considerado una valoración cuantitativa de las temperaturas alcanzadas por el frente de llamas. Simplemente, hemos basado nuestro trabajo en el análisis visual de las imágenes correspondientes al canal 3, para los días en los que estuvo activo el incendio, con el propósito de comprobar la utilidad de este tipo de imágenes para realizar un seguimiento de la evolución espacial de grandes incendios. No obstante, consideramos interesante estudiar el contraste térmico que existe en las zonas afectadas por el fuego respecto a las que no han sufrido daño. Con esta intención hemos elaborado unos perfiles espaciales en los que aparecen representadas las temperaturas de brillo de las distintas cubiertas que integran nuestra zona de estudio (fig. 3). Hemos utilizado, para ello, las imágenes del 27 y 29 de julio. La primera fue adquirida un día antes del inicio del fuego, y la segunda un día después. Estos perfiles nos han permitido constatar la existencia de un contraste térmico importante entre la zona afectada por el incendio y las cubiertas no dañadas. Así, el perfil correspondiente al día 29 evidencia un brusco aumento de la misma en la zona activa (señalada en la figura con una flecha), que alcanza el límite de sa-

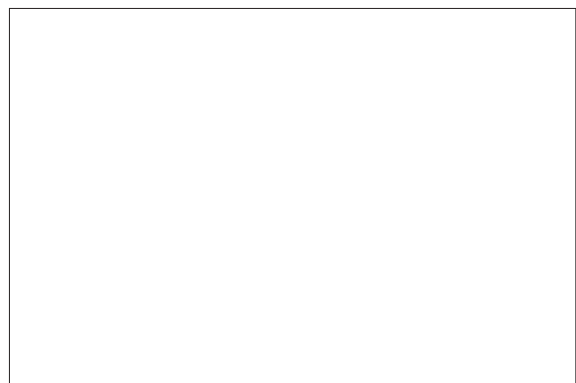


Fig. 5: Mapa de la evolución espacial del incendio. Se han incorporado algunos elementos cartográficos de referencia y una escala gráfica con objeto de facilitar la interpretación. En la esquina superior derecha se ha representado el perímetro facilitado por ICONA.



turación del sensor (320 K). Como se puede observar, la trayectoria de ambos perfiles es similar pero no idéntica. Esto se debe, en parte, a los efectos atmosféricos que producen alteraciones a la respuesta espectral captada por el sensor.

En la figura 4 se puede observar una composición que incluye las imágenes utilizadas en este trabajo. La primera recoge la situación previa al incendio. La siguiente, del día 29 de julio, evidencia el primer frente activo del incendio, situado en la Sierra de Malacara, en el centro de la imagen. Las temperaturas de brillo, medidas sin corrección de emisividad, alcanzan el nivel de saturación (320 K). En la imagen del día 30 de julio, se muestran ya dos frentes activos: el de la Sierra de Malacara (en el centro), y el de la Sierra de Martés (al sur); el segundo de origen intencionado. También aquí se alcanza el nivel de saturación del sensor. En las dos imágenes siguientes, correspondientes a los días 31 de julio y 1 de agosto aparece claramente el inicio y posterior propagación de un nuevo foco, también al parecer intencionado, al norte de los anteriores y que no llega a unirse con éstos. En ambos casos, el rango más alto de temperaturas no discrimina perfectamente el área quemada, puesto que también incluye otras zonas de suelos desprovistos de vegetación, que presentan un elevado calentamiento durante el verano en las horas de adquisición de la imagen (14,20 TMG).

Este problema se solventa con el análisis de las imágenes nocturnas. En concreto, las correspondientes a los días 3 y 4 de agosto, no ofrecen ningún problema de discriminación frente a otras cubiertas no vegetales, que se encuentran bastante frías a la hora de paso del satélite (en torno a las 2 TMG). En este caso, el foco activo registra temperaturas de brillo en torno a 296 K. En ambas imágenes resulta evidente el nuevo foco situado al norte de la Nacional III, en el municipio de Chiva, iniciado el día 31 de Julio. En la imagen del día 3, se recoge la máxima extensión del frente activo en esta zona, mientras sigue vigente, aunque muy reducido, el de la Sierra de Malacara. Por fin, en la imagen nocturna del día 4 se recoge ya un frente muy abierto, debilitándose en su extensión hacia el suroeste. La imagen diurna consiguiente, adquirida ese mismo día a las 14.30 horas, permite delimitar con claridad el perímetro quemado, aunque vuelven a mostrarse los problemas de saturación antes comentados para las imágenes diurnas.

Tal y como describimos en el epígrafe anterior, a partir de la discriminación diaria de los pixels donde el incendio estaba activo, se ha obtenido la figura 5 que recoge la evolución espacial del fuego. Hemos prescindido aquí de las imágenes de Dundee, por no presentar una radiometría similar a las de Maspalomas. En esta figura se aprecia la evolución espacial de los distintos focos, claramente controlada por el viento, que sopla en

dirección oeste y noroeste en los primeros días del incendio.

Como puede observarse, la progresión del incendio coincide netamente con la delimitada por el ICONA en su informe correspondiente (representada en la figura 5, esquina superior derecha), aunque aquí se incorpora información de otras fechas. Se puede apreciar claramente la influencia que algunos factores como la topografía, la presencia de vías de comunicación, ríos y embalses, y la propia cubierta vegetal tuvieron sobre la propagación del fuego. Así, por ejemplo, el trazado de la carretera Nacional III, impidió que se unieran los dos focos principales evitando que el incendio alcanzase mayor extensión. Por otra parte, la existencia de embalses como el de Forata (al sur), y de pequeños valles interiores, dió al perímetro final del incendio esa forma característica, pues en algunas de estas zonas el frente de llamas se extinguió de forma espontánea, mientras que en otras se extendió más uniformemente, al no mediar barreras. Por último, es posible observar que, en aquellas zonas donde la cubierta vegetal era homogénea (áreas forestales), el incendio se extendió con mayor facilidad; en cambio, en las zonas donde existía una ruptura de esa homogeneidad (zonas agrícolas) se frenó el avance del fuego. Así, en la zona inferior de la imagen, dentro todavía del perímetro del incendio, podemos identificar una zona que no sufrió daño, por estar ocupada por cultivos.

## DISCUSIÓN

Queda patente el interés de la información obtenida a partir del canal 3 del sensor AVHRR para seguir la evolución espacial de los grandes incendios. Si bien es obvio que el ejemplo aquí analizado resulta bastante excepcional, esta información puede aportar información y elementos de juicio bastante interesantes para el mejor conocimiento de las relaciones entre las distintas variables geográficas (topografía, viento, vegetación, etc) en el desarrollo de eventos de esta magnitud. Además, la cartografía del crecimiento espacial puede ser de gran utilidad de cara a verificar la eficacia de los programas de simulación del comportamiento de incendios, como es el caso de BEHAVE (Burgan y Rothermel, 1984) o CARDIN (Martínez, 1990). Estos programas se basan en unas ecuaciones teóricas sobre las relaciones entre los tipos de combustible ardiendo, la topografía y el viento locales, que pueden integrarse en un Sistema de Información Geográfica para predecir el comportamiento del fuego en un área determinada (Vasconcelos y Guertin, 1992). Las series diarias de imágenes AVHRR facilitan una información muy valiosa para este tipo de programas, al mostrar, con suficiente detalle, la dimensión espacial del crecimiento de un incendio. Como es lógico, este tipo

de estudios sólo resultará válido para el caso de grandes incendios, con un desarrollo temporal suficientemente prolongado.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación financiado por el Servicio de Defensa contra Incendios Forestales del ICONA, sin cuya colaboración, y la de su director, el Dr. Ricardo Vélez, no hubiera sido posible llevarlo a cabo. La información obtenida del centro regional de Valencia y el informe sobre el incendio de Buñol realizado por D. Rafael Currás, fueron de gran ayuda para la verificación de los resultados. Las empresas AURENSA e INFOCARTO S.A., prestaron igualmente su colaboración en la lectura de las imágenes NOAA.

## REFERENCIAS

- Belward, A.S. (1991): Remote sensing for vegetation monitoring on regional and global scales, en *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing countries*, A.S.Belward y C.R. Valenzuela Eds., Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 169-187.
- Burgan, R.E. y Hartford, R.A. (1993): Monitoring vegetation greennes with satellite data, USDA Forest Service, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-297, 14pp.
- Burgan, R.E. y Rothermel, R.C. (1984): BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Fuel Subsystem, Ogden (Utah), USDA Forest Service.
- Chuvieco, E. y Martín, M.P. (1994): Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.60, nº 5, pp. 563-570.
- Delegido, J., Caselles, V. y Hurtado, E. (1991): Determinación a escala regional de la evapotranspiración, en *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura*, S. Gandía y J. Meliá Eds., Universitat de València, Departament de Termodinámica, pp. 345-370.
- ESA-EPO (1992): SHARP User's Guide, Frascati, European Space Agency.
- Flannigan, M.D. y Vonder Haar, T.H. (1986): Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 16, pp. 975-982.
- Jijia, Z., Qingshan, Z., Changgong, D., Cheng, L. y Chaohua D. (1989): Detection of forest fires in Da Hinggan Ling region by meteorological satellite, *Acta Meteorologica Sinica*, vol. 3, pp. 562-568.
- 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*, vol. 45, pp. 61-71.
- Kidwell, K.B. (1991): NOAA Polar Orbiter Data Users Guide, NOAA/NESDIS, Washington D.C.
- Langaas, S. (1992): Temporal and spatial distribution of savanna fires in Senegal and the Gambia, West Africa, 1989-90, derived from multi-temporal AVHRR night images, *International Journal of Wildland Fire*, vol. 2, pp. 21-36.
- Malingreau, J.P. (1984): Remote sensing and disaster monitoring, a review of application in Indonesia, *Proc. 18th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Paris, pp. 283-283.
- Malingreau, J.P. (1990): The contribution of remote sensing to the global monitoring of fires in tropical and subtropical ecosystems, en *Fire in Tropical Biota*, J.G.Goldammer Ed., Berlin, Springer Verlag, pp. 337-370.
- Martín, M.P. y Chuvieco, E. (1993): Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images, *Proc. of the International Workshop on Satellite Technology and GIS for mediterranean forest mapping and fire management*, Thessaloniki, (en prensa).
- Martínez, J. (1990): Fire behavior modeling research and practice, *Proc. of the First International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra.
- Matson, M. y Holben, B. (1987): Satellite detection of tropical burning in Brazil, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 509-516.
- Pereira, M.C., Amaral, S., Zerbini, N.J. y Setzer, A.W. (1990): Estimativa da área queimada no Parque Nacional das Emas con o uso de imagens da banda 3 do AVHRR: comparação com estimativas do TM-Landsat, *Proc. 6th Sim. Bras. Sensor. Remoto*, Manaus, vol. 2, pp. 302-310.
- Prieto, F. (1989): Incendios forestales. Ideas para una interpretación, en C. Ortega: *El libro rojo de los bosques españoles*, Madrid, Ed. Adena-WWF, pp. 211-236.
- Prins, E.M. y Menzel, W.P. (1992): Geostationary satellite detection of biomass burning in South America, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 2783-2799.
- Robinson, J.M. (1991): Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 3-24.
- Setzer, A.W. y Pereira, M.C. (1991): Operational detection of fires in Brazil with NOAA-AVHRR, *Proc. 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Rio de Janeiro, pp. 469-482.
- Vasconcelos, M. y Guertin, D.P. (1992): FIREMAP. Simulation of fire growth with a Geographic Information System, *International Journal of Wildland Fire*, vol. 2, pp.87-96.