

## USO DE LAS IMÁGENES LANDSAT-TM EN UN SISTEMA DE EVALUACIÓN DE DAÑOS CAUSADOS POR INCENDIOS FORESTALES

C. NAVARRO.

Servicio de Evaluación de Recursos Naturales. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.  
Sevilla.

### RESUMEN

El presente trabajo analiza la utilidad de un sistema de evaluación de daños causados por incendios forestales utilizando imágenes de satélite y los S.I.G.. El sistema diseñado aportó datos sobre extensión de la superficie afectada por el incendio, grados de afectación dentro del incendio, tipos de vegetación y extensión de cada tipo de vegetación. Estos datos fueron comparados con las estadísticas al uso, comprobándose su mayor cantidad y calidad. Al mismo tiempo, se valoró la posible relación de los datos aportados con la carga de combustible forestal y el índice de inflamabilidad y se estudió la regeneración de las masas un año después del incendio.

### ABSTRACT

*This work assesses the utility of an A.M.A. designed system which evaluates the potential of the satellite images and the G.I.S. to study the damages caused by forest fires. This system provided data such as extension of the forest fire, different gradation within the scorched vegetation and types and extension of the vegetation in the scorched area. These data were compared with the ones officially provided, concluding their better accuracy. At the same time a possible relationship between these data, the fuel weight and the inflammability index was assessed and the regeneration one year after the fire was studied.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales afectan cada año a Andalucía de una manera sistemática, quemándose gran cantidad de hectáreas arboladas y de matorral mediterráneo. A nivel regional, el número total de incendios durante 1989 en los territorios gestionados por la A.M.A. fue de 196, abarcando una superficie de 2.793 ha, valorándose económicamente estas pérdidas en unos 154.000.000 pts.

Frente a estas cifras se hace, por tanto, necesario elaborar unas estadísticas lo más rigurosas posible, a fin de conocer con la mayor aproximación el número de hectáreas que se queman cada año.

Sin embargo, las estadísticas que se publican sobre el tema no suelen seguir una metodología normalizada, ya que se basan principalmente en cálculos estimativos efectuados por la guardería en el momento del incendio. Además, la información que proporcionan sobre el tipo de especies afectadas es con frecuencia escasa, ya que únicamente contemplan las áreas arboladas y las desarboladas.

Todo ello plantea la necesidad de establecer, por una parte, un procedimiento estadístico más fiable para determinar el número de hectáreas afectadas y, por otra, de ampliar la información sobre los daños causados al sustrato vegetal. En este sentido, las imágenes de satélite y los Sistemas de Información Geográfica constituyen dos herramientas de gran utilidad en la aportación de información, ya que permiten la evaluación rápida y fiable de las hectáreas afectadas, la de-

terminación de las afecciones territoriales de los efectos de los incendios forestales y su situación en el espacio.

Esta es la línea de investigación que está llevando a cabo el Servicio de Evaluación de Recursos Naturales de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en relación a un proyecto global de evaluación de incendios forestales, en el que, además de la determinación del número de hectáreas afectadas y su relación con las bases de datos existentes en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía (SinambA), se están llevando a cabo otras líneas de investigación como la evaluación de riesgo de incendios en tiempo real y la determinación del comportamiento del fuego.

La evaluación de riesgo de incendios en tiempo real es un proyecto global que pretende determinar, para cada día, el riesgo de incendio en toda Andalucía. Para ello se utilizarán las bases de datos del Sistema de Información Ambiental de Andalucía que, a partir de la información sobre registros históricos de incendios, sus causas más frecuentes, o los corredores de máximo riesgo por proximidad a redes viarias y asentamientos humanos, establezcan un riesgo que podríamos llamar "permanente". Este riesgo primario se actualizará diariamente a partir de la información que sobre stress de vegetación, evapotranspiración y temperaturas aporten las imágenes del satélite NOAA-AVHRR, determinándose por tanto un riesgo en tiempo real. El segundo proyecto pretende combinar la información georeferenciada del SinambA con los modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento de un incendio según una serie de parámetros

Tabla 1.- Relación entre el tipo de vegetación, la carga de combustible y el coeficiente de inflamabilidad.

TIPOS DE VEGETACION	GRADO DE AFECTACION (1= máx; 4= mín)	CARGA DE COMBUSTIBLE (Kg/m <sup>2</sup> )	COEFICIENTE DE INFLAMABILIDAD (1=mín; 10=máx)
Alcornocal con cubierta superior al 30%	1	2 - 2,5	6
Pinar	1,2	0,8 - 1	4
Matorral muy denso	1,2	3	10
Matorral arbolado	1,2	3	10
Matorral poco denso	1,2,3,4	0,1	8

FUENTE: ANA, 1991

de entrada.

La presente comunicación analiza, en una zona piloto, la primera parte de este proyecto global sobre incendios forestales.

## 2. MATERIAL Y MÉTODO

Para el estudio se utilizaron imágenes Landsat-TM de tres fechas: 15 de julio y 3 de octubre de 1989 y 20 de septiembre de 1990. El esquema metodológico fue el siguiente: la imagen de la segunda fecha fue corregida respecto a una cartografía convencional (1:50000). Las otras dos fueron corregidas con respecto a ésta, a fin de permitir la comparación de la zona incendiada en las tres fechas. El contorno del incendio fue digitalizado en la segunda imagen, hallándose el total de hectáreas y comparándose los datos con las estadísticas oficiales. A partir de la información sobre el sustrato vegetal proporcionada por el Sistema de Información Ambiental de Andalucía (Sihamba) y por fotografías aéreas, se determinaron las distintas unidades de vegetación dentro de la zona incendiada. Posteriormente, se realizó una cartografía de intensidades de afectación dentro de la zona incendiada y se intentó determinar los distintos niveles de recuperación de la vegetación un año posterior al incendio.

El proceso de trabajo ha implicado una serie de fases que se detallan a continuación:

- Caracterización espectral de las superficies incendiadas.
- Corrección geométrica de las imágenes.
- Digitalización de sectores y evaluación de superficies.
- Cartografía de las formaciones vegetales afectadas.

## 3. ANTECEDENTES

En relación al desarrollo de métodos de evaluación rápida de superficies afectadas, mencionaremos únicamente los proyectos que se han llevado a cabo en España.

En 1984, el Instituto Cartográfico de Cataluña publicó una estadística de incendios forestales de esa campaña, a

partir de los datos captados por el sensor Thematic Mapper. El estudio se planteó con información multitemporal obtenida antes y después del verano, concluyéndose que la información multispectral registrada por el sensor resultaba adecuada para detectar y cuantificar las extensiones forestales afectadas por incendios.

Otro estudio de características semejantes fue el llevado a cabo por el Instituto Andaluz de Reforma Agraria y la Agencia de Medio Ambiente en 1988 para diversas zonas de Jaén, Granada y Huelva. Se pretendía comparar las estadísticas oficiales con las obtenidas por levantamientos topográficos e imágenes de satélite, dando estas últimas los porcentajes más altos de acierto.

Chuvieco y Congalton (1988) llevaron a cabo una evaluación de superficies afectadas para un incendio en la costa mediterránea española. Mediante un proceso de clasificación mixta visual-digital, se consiguió representar el perímetro del incendio, pasándose a la posterior evaluación del mismo. El principal problema se planteaba por el solapamiento espectral entre la vegetación quemada y no quemada por la ausencia de cubierta vegetal y la confusión con otras áreas como las zonas rurales y urbanas.

En relación a los modelos de combustible, existen algunos estudios sobre los mismos realizados con imágenes de satélite. En Andalucía, en cada Plan Comarcal de Defensa contra Incendios Forestales, aparece una clasificación del combustible forestal realizada por el Servicio de Utilización y Actividades en el Medio Natural de la A.M.A. de acuerdo con la adaptación del Sistema de Ordenación del Combustible del U.S.A. Forest Service. En la actualidad trabaja en la adecuación entre las distintas clases de combustible y la cartografía de usos y coberturas vegetales del suelo derivada del Proyecto Land Cover-España, que fue realizada a partir de imágenes de satélite.

El I.N.I.A. (López Soria et al., 1988) realizó una evaluación de imágenes NOAA-AVHRR para estudiar los incendios forestales, donde se considera la potencialidad del índi-

Tabla 2.- Información sobre la vegetación afectada (Superficies).  
(Incendio: Alcalá de los Gazules. Fecha: 30-07-1989).

Superficie Arbolada (has.)	743
Superficie Desarbolada (has.)	166
TOTAL	909
Fuente: Plan INFOCA 1.989	
Dehesas (has.)	56
Alcornocal (> 30 %) (has.)	126,32
Encinar-Quejigal (has.)	54,53
Pinar (has.)	21,42
Eucaliptal (has.)	2,80
Olivar (has.)	26,32
Matorral Arbolado (has.)	79,44
Matorral Denso (has.)	102,42
Matorral Poco Denso (has.)	126
Pastizal (has.)	100,51
TOTAL	695,64

ce de vegetación normalizado para caracterizar las condiciones fisiológicas de la vegetación durante el año de cara a determinar su susceptibilidad en el comienzo y desarrollo de los incendios forestales. En este estudio se concluye que el Índice de Vegetación Normalizado es capaz de controlar la evolución de la fenología vegetal, determinando una variable sintética a partir de la resta del índice entre dos fechas, que funciona como indicador de la capacidad de ignición de la vegetación.

Finalmente, un estudio sobre riesgo de incendios forestales mediante un software de Sistemas de Información Geográfica fue llevado a cabo por Chuvieco y Congalton en 1989 para representar cartográficamente el riesgo de incendios. Se trataba de comprobar la capacidad de predicción de áreas de riesgo de un S.I.G. sobre la zona donde se había producido un incendio forestal. Las variables consideradas

fueron: vegetación, altitud, pendiente, orientación y proximidad a vías de comunicación y cámpings. Posteriormente se realizó una comparación entre el riesgo previsto y el porcentaje real de área quemada. El modelo propuesto dio buenos resultados en los píxeles de alto riesgo, mientras que sólo el 3,74% de los píxeles de bajo riesgo se quemaron.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Como zona test para el programa de evaluación de daños causados por incendios forestales se eligió un incendio ocurrido en el Parque Natural de Los Alcornocales (Cádiz) en el verano de 1989. Su gran extensión (900 ha según las estadísticas oficiales) permitía la comparación con las estadísticas aportadas por Teledetección, al tiempo que se podían determinar distintos niveles dentro del incendio en función de los distintos grados de afectación del mismo. Se pretendía, además, determinar el grado de recuperación de la cubierta vegetal un año después del siniestro.

Esta zona fue declarada Parque Natural por la Comunidad Autónoma Andaluza por la Ley Inventario de Espacios Naturales Protegidos del 25 de julio de 1989, conteniendo una de las mayores plantaciones de alcornocal del mundo. Su importancia ecológica y social demanda una atención especial acerca de la naturaleza y la dinámica de los incendios en este área (Rodríguez y Silva, 1990).

El Parque se inscribe dentro del dominio mediterráneo subhúmedo con influencia atlántica (IV), incluyéndose los años que se pueden identificar con los climas IV4 y IV3 y, por tanto, según el sistema de Walter Allue, asociado a un clima intermedio, entre un clima mediterráneo semiárido, cálido y seco, y el área atlántica. Su proximidad al Estrecho de Gibraltar le confiere características muy peculiares en la frecuencia, velocidad y dirección del viento. La frecuencia más alta corresponde a los vientos de levante, con un porcentaje de 43,2%, siguiéndole los del poniente con un 41,1%.

El matorral alcanza altos niveles de crecimiento y densidad y se extiende intensivamente, con lo que alcanza una absoluta continuidad horizontal. Las áreas de alto riesgo se caracterizan por la alta continuidad, tanto horizontal como vertical de combustible disponible, asimilable al tipo 4 (chapparal) de la clasificación del U.S. Forest Service. Las cargas de combustible proceden de los residuos del estrato arbóreo y del matorral, estimándose la carga de éste entre 2,5 y 4 kg/m<sup>2</sup>. Las especies de matorral de la zona incendiada eran: Pistacia lentiscus (lentisco), Quercus coccifera (carrasca), Ulex baeticus (tojo), Cistus ladanifer (jara), Phlomis purpurea (matagalgo), Genista triacanthos (aulaga), Erica scoparia, E. australis y E. arborea (brezo).

#### 5. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS SUPERFICIES QUEMADAS

La Imagen 1 muestra la zona del incendio en una imagen de satélite Landsat-TM en falso color (bandas 3,4,5). Considere-

rando las propiedades espectrales de la vegetación, se seleccionaron las bandas más idóneas para representar la zona incendiada. Estas bandas corresponden a las regiones del rojo-visible (0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo próximo (0,76-0,90  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo medio (1,55-1,75  $\mu\text{m}$ ). Esta combinación de bandas realza la diferencia visual entre la zona del incendio (en tonos rojizos) y la vegetación sana circundante (en tonos verdes).

Para caracterizar espectralmente la vegetación afectada por el incendio, se compararon los histogramas de radiancia de la banda correspondiente al infrarrojo cercano para las fechas anterior y posterior al incendio. La elección de esta longitud de onda se justifica en que en el dominio del infrarrojo próximo los pigmentos de la hoja y la celulosa de las paredes de las células son transparentes, siendo la absorción de la hoja muy baja (menos del 10%) y la radiación incidente se refleja o se transmite (Guyot, 1990). La vegetación sana refleja generalmente del 40 al 50% de la energía infrarroja-próxima incidente (0,7-1,1  $\mu\text{m}$ ), mientras que la vegetación enferma o senescente refleja en mucha menor proporción. Es posible, pues, distinguir en esta longitud de onda la vegetación sana de la vegetación quemada y, por tanto, es posible comparar espectralmente la zona del incendio en las imágenes anterior y posterior al mismo.

Antes de comparar ambos histogramas, se procedió a la conversión de los valores de brillo en valores físicos de radiancia (en  $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ), a partir de los coeficientes de calibración del sensor, mediante la fórmula:

$$L = \lambda \cdot ND + \beta$$

Los coeficientes de calibración utilizados fueron de 0,815 para  $\lambda$  de -1,5 para  $\beta$ , según Price (1987).

En el histograma de fecha posterior al incendio, el 73% de los valores de radiancia de la vegetación quemada se encuentran en el rango entre 31,915 y 52,290  $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ , mientras que en el histograma de la imagen anterior al incendio, el 73% de los valores de la vegetación sana se sitúan entre 53,920 y 67,775  $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ . Por tanto, es posible caracterizar espectralmente la vegetación quemada, ya que el porcentaje de energía reflejada en el infrarrojo próximo es significativamente menor que el que refleja la vegetación sana. Basándonos en esto, se aplicaría posteriormente un Índice de Vegetación Normalizado que permitiría discriminar distintos niveles de afectación en la vegetación quemada y, por tanto, determinar las zonas que fueron más afectadas.

Es importante considerar, sin embargo, la diferencia de ángulo solar entre las fechas utilizadas (verano y otoño), que

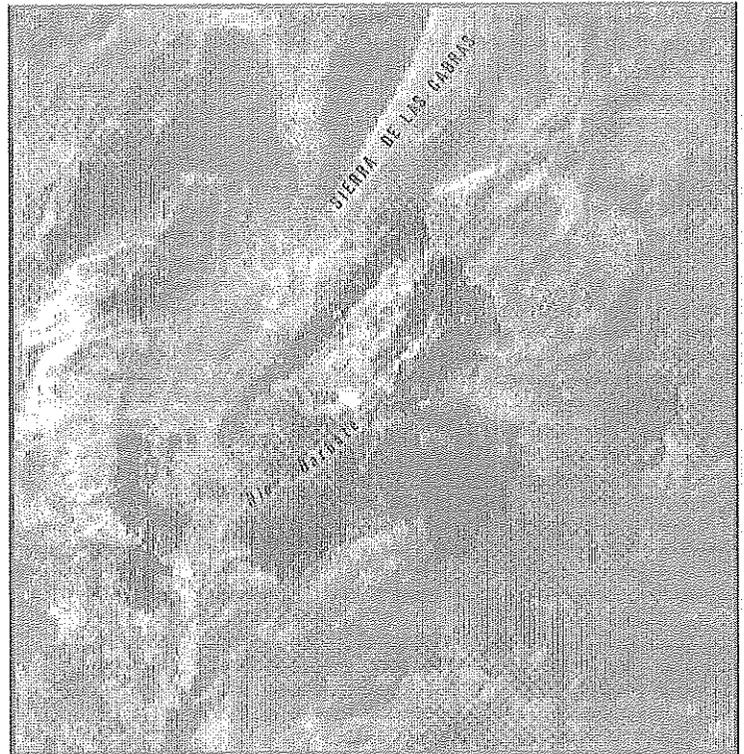


Imagen 1.- Imagen Landsat de la zona incendiada. Véase Anexo de color.

se traduce en un mayor efecto de las sombras en la fecha posterior al incendio y, por tanto, en unos niveles más bajos de respuesta espectral. En este sentido, sería conveniente una corrección radiométrica de ambas imágenes a fin de conseguir condiciones atmosféricas similares en las mismas.

## 6. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS IMÁGENES

El proceso de corrección geométrica de las imágenes se desarrolló a dos niveles. Por una parte, las imágenes fueron corregidas geoméricamente a fin de poder comparar en las tres fechas las características espectrales de la zona del incendio. Por otra parte, era también necesario ajustar el contorno del incendio obtenido a través de la imagen de satélite, con la fotografía aérea que se había tomado como base para realizar una cartografía de especies de vegetación anterior al incendio. La imagen de la segunda fecha fue corregida tomando como base el Mapa Topográfico Nacional, a escala 1:50.000, correspondientes a las hojas 1063 (Algar) y 1071 (Jimena de la Frontera).

La restitución de la imagen corregida se realizó mediante el método del vecino más próximo, con un polinomio de transformación de grado 1. Este método no altera los valores radiométricos originales de la imagen, con lo cual ésta puede ser utilizada posteriormente para tratamientos de cla-

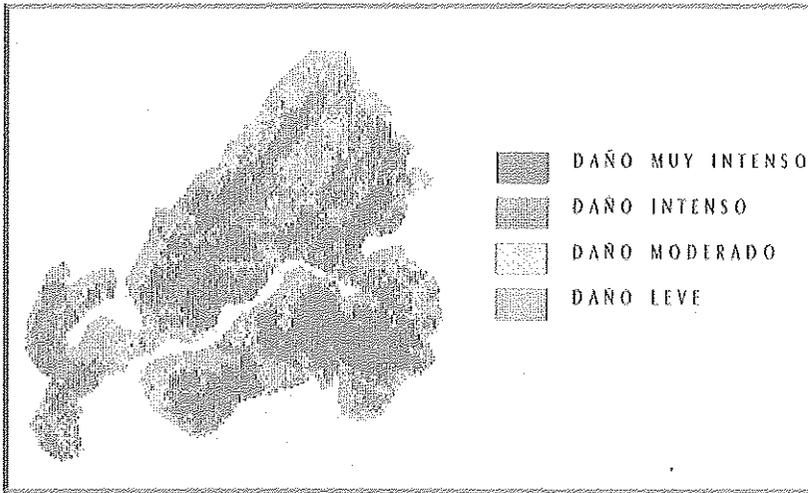


Imagen 3.- Grados de afectación. Véase Anexo de color.

sificación espectral.

La corrección geométrica se llevó a cabo seleccionando un conjunto final de 14 puntos de control que dieron lugar a un error medio cuadrático de 1. Las otras dos imágenes fueron corregidas respecto a la segunda por el mismo procedimiento. La imagen de la segunda fecha fue lanzada a escala 1:30.000 a fin de ajustar el contorno del incendio a la fotografía aérea que se utilizó como base para la cartografía de las distintas especies afectadas.

## 7. DIGITALIZACIÓN DE SECTORES Y EVALUACIÓN DE SUPERFICIES

Con objeto de evitar la confusión existente entre los valores radiométricos de la zona quemada y los de las zonas de suelo agrícola desnudo afectadas por la quema de rastrojeras, se aisló la zona del incendio mediante una máscara que ocultaba toda la zona exterior al mismo. Esta máscara fue digitalizada previamente, creándose un fichero de sectores con dos valores diferentes: la zona del incendio, con valor 1 y la zona exterior, con valor 0. Esta máscara con el contorno del incendio fue utilizada en tratamientos posteriores, para determinar el número de hectáreas y los niveles de afectación.

Al mismo tiempo, mediante la digitalización se obtuvo un fichero de superficies que determinó para el incendio analizado una superficie total de 695 hectáreas. Si comparamos este resultado con el facilitado para el mismo incendio por las estadísticas derivadas de las evaluaciones realizadas por la guardería forestal (909 has), se pone de manifiesto una fuerte discrepancia de las cifras de las superficies afectadas.

La diferencia entre ambas estadísticas ya se había constatado anteriormente en el trabajo que el Instituto Andaluz de Reforma Agraria y la Agencia de Medio Ambiente habían llevado a cabo en distintas zonas de Jaén, Granada y Huelva. En este trabajo se compararon las estadísticas oficiales

con las obtenidas en campo por mediciones topográficas y con las obtenidas mediante imágenes de satélite, aportando estas últimas los datos más fiables.

Un inconveniente en el método utilizado es la dificultad para cuantificar zonas de sierra, debido a la topografía accidentada. Debido a esto, se prevé en un futuro próximo el uso de un modelo digital del terreno que permita representar el relieve de la zona y calibrar los cambios en la radiometría según la pendiente así como el efecto de ésta sobre la significación superficial.

## 8. CARTOGRAFÍA DE LAS FORMACIONES AFECTADAS

La vegetación de la zona incendiada fue analizada inicialmente a partir de la información suministrada por el Sistema de Información Ambiental de Andalucía (SinambA) y actualizada mediante fotografía aérea a escala 1:30.000 y trabajos de campo.

Por una parte, se trataba de determinar los tipos de masas arbóreas y de matorral afectados, a fin de conocer con la mayor aproximación su superficie y establecer alguna correlación entre el tipo de vegetación y la intensidad de afectación de la misma en términos de inflamabilidad.

En la Imagen 2 aparecen los distintos tipos de uso y formaciones vegetales de la zona incendiada. En la elaboración de la leyenda se tuvieron en cuenta tanto los criterios generales del Mapa de Ocupación de Suelos (Proyecto Land Cover España, a escala 1:100.000) como criterios de densidad y combustibilidad.

La Tabla 1, que será comentada posteriormente, muestra la relación entre los tipos de vegetación de la zona incendiada, la carga de combustible y el coeficiente de inflamabilidad asignado a cada carga. Las diferentes cargas de combustible fueron asignadas por el Servicio de Actividades en el Medio Natural de la A.M.A. a partir de la clasificación del U.S. Fire Danger Rating System, y cada una lleva parejo un coeficiente de inflamabilidad o peligrosidad relativa específica. Estas cargas de combustible se utilizan en modelos de comportamiento del fuego como el sistema Behave del U.S. Fire Danger Rating System y el sistema español Cardin.

La Tabla 2 compara las estadísticas del Plan INFOCA con las que aporta el Sistema de Información Ambiental de Andalucía (SinambA), una vez realizado el procedimiento de evaluación de superficies mediante imágenes de satélite. Es significativa la mayor cantidad y diversidad de información que proporciona esta segunda fuente frente a las estadísticas oficiales. Estas únicamente desglosan la información de superficies en dos tipos de formaciones vegetales: arbolada y desarbolada, sin mencionar las distintas especies que com-

ponen cada clase y, sobre todo, sin localizarlas en el espacio. El SinambA, por el contrario, permite no sólo desglosar distintas formaciones y cuantificar el número de hectáreas que ocupan, sino que éstas quedan localizadas espacialmente al utilizar imágenes que están corregidas geométricamente con respecto a una cartografía básica.

El análisis conjunto de los tipos de formaciones vegetales y de los grados de afectación dentro del incendio, permite seleccionar las formaciones que han sido más afectadas por el incendio y, por tanto, determinar el estado de la vegetación de cara a los trabajos de restauración de la misma.

## 9. DETERMINACIÓN DE INTENSIDADES DE AFECTACIÓN

La localización espacial de los distintos niveles de afectación permitirá aislar las zonas más afectadas por el fuego, de cara a posteriores tratamientos, y determinar la capacidad de ignición de los distintos combustibles forestales. Esta información es importante para conseguir una evaluación completa del fuego así como para garantizar un tratamiento correcto de la zona afectada (Chuvieco y Congalton, 1988).

Para determinar las distintas intensidades de afectación dentro de la zona quemada se aplicaron, en principio, dos técnicas:

- Clasificación no supervisada.
- Clasificación bicanal de los ficheros obtenidos a partir del Índice de Vegetación Normalizado y de la máscara de sectores.

Con la clasificación no supervisada se pretendía un primer acercamiento a la determinación de una serie de niveles de afectación dentro de la superficie afectada por el incendio, en base al agrupamiento de las diversas clases espectrales presentes en el mismo. Sin embargo, esta clasificación no aportó datos de valor al análisis ya que las diversas clases resultantes correspondían a un criterio puramente estadístico y no eran, por tanto, interpretables, pudiendo ocultar otras posibles clases que tuvieran relación directa con las propiedades biofísicas del sustrato vegetal.

Ante los escasos resultados obtenidos por la clasificación no supervisada, se optó por una clasificación que contemplara el comportamiento espectral de la vegetación quemada y en la que el analista desempeñara un papel más activo en cuanto a la asignación de las diversas clases. La imagen 3, que muestra los distintos grados de afectación de la zona quemada, fue obtenida a partir de la combinación de dos

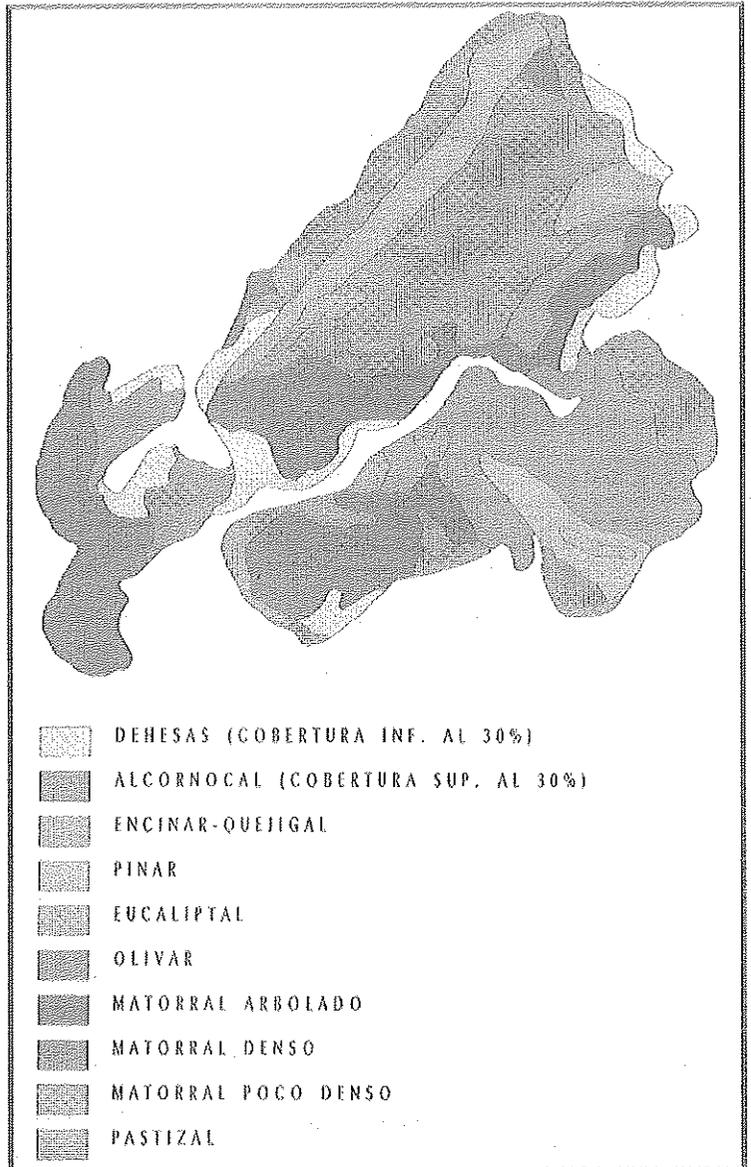


Imagen 2.- Coberturas vegetales de la zona incendiada. Véase Anexo de color.

tratamientos:

- Índice de vegetación normalizado (Normalized Vegetation Index).
- Clasificación bicanal del Índice de Vegetación Normalizado y del fichero de sectores.

El Índice de Vegetación Normalizado tiene una alta correlación con el índice de superficie foliar, con la producción primaria y con la actividad vegetativa de cada tipo de cobertura vegetal (Tucker, 1979; Perry et al., 1984). Tiene, ade-

más, una fuerte correlación con la fracción de radiación fotosintética activa (Photosynthetically Active Radiation) interceptada por el dosel (Hatfield, Asrar y Kanemasu, 1984). Por tanto, es posible diferenciar las superficies donde el vigor clorofílico sea alto de aquellas donde sea muy bajo, ya sea zonas de suelo desnudo o de vegetación no sana o senescente.

En la imagen de la zona afectada por el incendio se han diferenciaron dos sectores o clases:

- Sector 1º: zona del incendio
- Sector 2º: zona exterior al incendio

El fichero de sectores se combinó con el que se creó a partir del Índice de Vegetación para obtener, mediante una clasificación bicanal, distintas intensidades de afectación dentro de la zona quemada. Previamente, el fichero obtenido mediante el Índice de Vegetación Normalizado, fue segmentado en varias clases a partir del análisis de su histograma. Este análisis permitió diferenciar distintas zonas homogéneas, que corresponden a los siguientes grados de afectación:

- grado muy intenso
- grado intenso
- grado moderado
- grado leve

Por otra parte, la sensibilidad del Índice de Vegetación Normalizado a los niveles de afectación de la vegetación quemada está también influida por otros factores no tenidos en cuenta, como la diferencia de ángulo solar en las tres imágenes, que se traduce en distintas sombras. Por tanto, sería importante en el futuro determinar la influencia del relieve en la respuesta espectral de la vegetación, disponiendo para ello de un Modelo Digital del Terreno y de una corrección del efecto topográfico.

Actualmente se está trabajando en la Agencia en un Modelo Digital del Terreno para toda Andalucía, ya que únicamente se poseen algunos en determinadas zonas (Grazalema).

Como se mencionó anteriormente, en la Tabla 1 aparecen relacionados los tipos de vegetación más significativos dentro de la zona incendiada, el grado de afectación que presentan, la carga de combustible y el coeficiente de inflamabilidad asignados a los mismos. Tanto la carga de combustible como el coeficiente de inflamabilidad han sido determinados por el Servicio de Acciones en el Medio Natural de la A.M.A., correspondiendo cada carga de combustible a una clase de combustible forestal.

El coeficiente de inflamabilidad o de peligrosidad relativa de cada formación forestal, se utiliza para determinar el índice de inflamabilidad, que determina la influencia de las especies en el riesgo de incendios durante una serie de años (I.C.O.N.A., 1982). Este coeficiente determina la peligrosidad relativa de cada formación forestal a partir de la comparación de la superficie quemada por el fuego en cada formación y la superficie total de esa formación en la estadística forestal. Los valores de este coeficiente han sido determinados por el Servicio de Utilización y Actividades en el Medio Natural de la A.M.A. a partir de estadísticas históricas de los

incendios forestales en Andalucía.

En relación al grado de afectación, todos los tipos de vegetación mencionados presentan los dos valores más extremos (1 y 2), destacándose la clase del alcornoque, con el máximo grado de afectación. Esta formación forestal posee un índice de inflamabilidad moderado (6), y una gran carga de combustible (de 2 a 2,5 Kg/m<sup>2</sup>), lo que aumenta el riesgo de ignición. La clase pinar presenta también los grados de afectación más elevados, aun cuando el coeficiente de inflamabilidad sea bajo (4). Ambas formaciones presentaban durante los trabajos de campo un deterioro muy fuerte, siendo la masa de pinar posteriormente cortada, a causa de su mal estado. Sin embargo, en el caso de los alcornoques, los distintos estudios muestran que la capacidad de rebrote de este árbol le permite renacer tras un incendio, aun cuando todo el follaje de su copa se haya carbonizado (Montoya Oliver, 1989). Sería, por tanto, conveniente, disponer de una serie de imágenes de años posteriores al incendio o tomar medidas con radiómetro que permitieran estudiar la regeneración de este alcornoque.

Sin embargo, a pesar de que en el caso de las clases de pinar y alcornoque, no se pueda establecer una relación clara entre el tipo de vegetación-grado de afectación-carga de combustible-coeficiente de inflamabilidad, sí se puede establecer, por el contrario, en el caso de los tipos de matorral muy denso y matorral arbolado, que presentan cargas de combustible de 3 kg y los máximos índices de inflamabilidad. Por último, el matorral poco denso presenta todos los grados de afectación, teniendo la menor carga de combustible y presentando un comportamiento frente al fuego igual al de un pastizal bajo, con cargas de combustible ligeras, y con una elevada capacidad de ignición, como muestra su elevado coeficiente de inflamabilidad.

A partir de estos datos se concluye que no es posible establecer una relación general entre estos cuatro parámetros a partir de los datos obtenidos para un solo incendio, aunque esta relación se haya verificado para dos clases de vegetación (matorral muy denso y matorral arbolado). Sería más conveniente, por tanto, estudiar estas variables para una serie de incendios y durante una serie de años, a fin de estudiar con una mayor número de datos si es posible establecer esta relación.

## 10. DETERMINACIÓN DE NIVELES DE REGENERACIÓN DE LA VEGETACIÓN

A pesar de disponer de la imagen un año después del incendio, no se pudieron establecer criterios claros para determinar los distintos niveles de regeneración de la vegetación.

Se aplicó en un principio el mismo procedimiento que se había utilizado para determinar los niveles de afectación de la vegetación, utilizando los mismos umbrales de segmentación. Sin embargo, no parecía adecuado efectuar una correlación adecuada entre afectación-regeneración sin haber efectuado antes una corrección radiométrica para ambas imágenes. Por otra parte, sería más conveniente realizar estudios de regeneración durante una serie temporal más lar-

ga, donde se utilizaran mediciones en campo con radiómetro.

Queda, por tanto, abierta, una nueva línea de investigación en la Agencia, en la que se está trabajando actualmente.

## 11. CONCLUSIÓN

La metodología expuesta abre una serie de líneas de investigación en incendios forestales mediante el uso de la Teledetección espacial y los Sistemas de Información Geográfica. Si bien las bases generales del sistema de evaluación de daños causados por incendios han sido establecidas, este sistema puede mejorarse con la incorporación de información sobre la topografía, mediante el uso de un Modelo Digital del Terreno y las correcciones radiométricas que eliminen el efecto atmosférico en las imágenes.

Sin embargo, el establecimiento de una metodología general para la evaluación de superficies incendiadas es de indudable utilidad si se compara la información que dan las estadísticas al uso y las aportadas por el Sistema de Información Ambiental de Andalucía. De hecho, está siendo aplicada en una estadística sobre los incendios más extensos que se han producido en Andalucía durante el verano de 1991. Esta información será posteriormente implementada para determinar un índice de riesgo de incendio en tiempo real, en el que se está actualmente trabajando en la Agencia de

Medio Ambiente.

Por último, mencionaremos algunas de las ventajas fundamentales que se han extraído de este estudio que sobre estadística de incendios que está llevando a cabo la Agencia de Medio Ambiente:

- Referencia cartográfica precisa.
- Resultados de mayor fiabilidad que los obtenidos en campo.
- Obtención de estadísticas para cada formación forestal.
- Actualización de la Base de Datos de Afecciones Territoriales de un Sistema de Información Geográfica como es el SinambA.
- Actualización de las Bases de Datos de Uso del Suelo y Vegetación.
- Distinción de intensidades de afectación dentro de la zona incendiada.
- Seguimiento de la regeneración de la vegetación en las zonas afectadas.
- Determinación de la inflamabilidad de los combustibles forestales.

Todo ello abre las puertas a una línea de trabajo conjunta que aúne los estudios que hasta la fecha se han realizado sobre el comportamiento del fuego y los llevados a cabo por Teledetección, utilizando no sólo las imágenes de satélite, sino también radiosondeos en campo, y combinando su información con la proveniente del Sistema de Información Ambiental de Andalucía (SinambA).

## 11. BIBLIOGRAFIA

- ✓ ASRAR, G. et al. (1989): Estimation of Plant- Canopy Attributes from Spectral Reflectance Measurements (Chapter 7 of *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, John Wiley & Sons).
- ✓ JUNTA DE ANDALUCÍA (Agencia de Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza) (1989): *Informe de la Campaña contra Incendios INFOCA '89*.
- ✓ JUNTA DE ANDALUCÍA (Consejería de Cultura y Medioambiente. Agencia de Medio Ambiente) (1990): Planes Comarcales de Defensa contra incendios forestales: *Parque Natural de la Sierra de Baza*.
- ✓ BARRAGAN, J.A. y MOREIRA, J.M.: SinambA. Sistema de Información Ambiental de Andalucía. *La Planificación del Ecodesarrollo (Junta de Andalucía. Consejería de Cultura y Medio Ambiente. Agencia de Medio Ambiente)*
- ✓ CHUVIECO, E. (1987): Multitemporal Analysis of Thematic Mapper Images. Application to Forest Fire Mapping and Inventory in a Mediterranean Environment (Proceedings of a Workshop on "Earthnet Pilot Project on Landsat-Thematic Mapper Applications". Frascati, Italy, December).
- ✓ CHUVIECO, E. y CONGALTON, R.E. (1988): Mapping and Inventory of Forest Fires from Digital Processing of Thematic Mapper Data (*Geocarto International*, 4, pp.41-53).
- ✓ CHUVIECO, E. y CONGALTON, R.E. (1989): Application of Remote Sensing and Geographical Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping (*Remote Sensing of Environment*, 29, pp.147-159).
- ✓ GUYOT, G. (1990): Optical Properties of Vegetation Canopies (Chapter 2 of *Application of Remote Sensing in Agriculture*, Butterworths, pp.19-43).
- ✓ I.A.R.A. (Instituto Andaluz de Reforma Agraria) (1988): *Estudio sobre Detección de Zonas Incendiadas mediante Teledetección* (Sevilla).
- ✓ I.C.C. (I. Cartogràfic de Catalunya) (1985): Detección de los Incendios Forestales en Catalunya a partir de Imágenes Digitales del Sensor Thematic Mapper del Satélite Landsat-5 (*I Reunión Científica de la Sociedad Española de Teledetección*).
- ✓ I.C.O.N.A. (1982): *Distribución Temporal del Peligro de Incendios Forestales*.
- ✓ I.C.O.N.A. (1982): *Manual de Predicción del Peligro de Incendios Forestales*.
- ✓ I.C.O.N.A. (1982): *Técnicas para la Defensa contra Incendios Forestales* (Monografías, Nº 24).
- ✓ LOPEZ SORIA, S. et al. (1988): An Evaluation of the Utility of NOAA-AVHRR for Monitoring Forest Fires in Spain (Proceedings of the 8th EARSeL Symposium. *Alpine and Mediterranean Areas: A Challenge for Remote Sensing*, Capri).
- ✓ MONTOYA OLIVER, J.M. (1988): *Los Alcornocales* (M.A.P.A.).
- ✓ PRICE (1987): Calibration of Satellite Radiometers and the Comparison of Vegetation Indices (*Remote Sensing of Environment*, Vol.21, pp.15-17).
- ✓ RODRIGUEZ Y SILVA, F. (1990): Analysis and the Influence of Winds on Forecast and Behaviour of the Forest Fires that Take Place in the Natural Park of "Los Alcornocales"(The Corkoaks). Cádiz.Spain (*International Conference on Forest Fire Research*, 1990 Coimbra).