

# Aplicación de escenas Landsat a la asignación de grados de afectación producidos por incendios forestales

S. Escuin, P. Fernández y R. M. Navarro.

*Departamento de Ingeniería Forestal.*

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Córdoba.*

## RESUMEN

Después de la ocurrencia de un incendio forestal, los gestores requieren una rápida y completa evaluación de los daños ambientales y económicos, para lo que se hace necesaria una descripción territorial del impacto del fuego.

En este trabajo, se han analizado varios métodos para la asignación de grados de afectación producidos por un incendio forestal (sin afectar, moderado y extremo). Todos ellos se basan en la aplicación de una clasificación supervisada de escenas Landsat, empleando el algoritmo de máxima verosimilitud. Se han analizado las mejoras reflejadas en los resultados cuando se llevan a cabo algunos procesos como son: correcciones radiométricas y atmosféricas, inclusión de diferencias normalizadas entre bandas, inclusión de información derivada del modelo digital de elevaciones e inclusión de una escena anterior al incendio. Se han estudiado cuatro incendios ocurridos en Andalucía entre los años 1995 y 2000.

La cartografía generada constituye una información útil de cara a la planificación de actividades dirigidas a la recuperación de la zona afectada.

**PALABRAS CLAVE:** incendios forestales, grados de afectación, teledetección, Landsat.

## ABSTRACT

After a forest fire, the forest managers need a complete and fast assessment on the environmental and financial damages. Thus, a territorial description of the fire impact becomes necessary.

On this study, different methods to discriminate three fire damage intensity levels (no damage, moderate, extreme), are discussed. All of them are based on the supervised classification of Landsat post-fire scene using the maximum likelihood algorithm but they include different inputs in the classification process. The improvements on the results, when some processes are carried out (such radiometric and atmospheric corrections, including normalized band differences, digital terrain model information or a pre-fire scene together with the post-fire scene), are analyzed. Four wildfires occurred in Andalucía between 1995 and 2000 have been studied.

Fire damage cartography generated can be the basis of a management restoration plan of a burned area.

**KEY WORDS:** wildfires, fire damage levels, remote sensing, Landsat.

## INTRODUCCIÓN

La dinámica del fuego es un aspecto importante de los ecosistemas mediterráneos y su estudio una tarea fundamental para los responsables de la administración forestal. Después de la ocurrencia del fuego, los gestores requieren una rápida y completa evaluación de los daños ambientales y económicos, para lo que se hace necesaria una descripción territorial del impacto del fuego. Esta descripción de grados de afectación, complementada con otras fuentes, como por ejemplo, un mapa de vegetación previa, puede ser de gran utilidad a la hora de tomar

decisiones encaminadas a conseguir la recuperación de áreas afectadas.

Los incendios forestales provocan una serie de cambios físicos (reducción o desaparición de la cobertura vegetal, cambios de color en la superficie, etc.) que se reflejan en la respuesta espectral de las cubiertas vegetales (Pereira y Seltzer, 1993). Sobre esta base, se han desarrollado numerosos trabajos en los que la teledetección, y más concretamente las escenas Landsat, se utilizan para cartografiar zonas quemadas (Chuvieco y Congalton, 1988; López y Caselles, 1991; Cochrane y Souza, 1998; Salvador *et al.*, 2000) e incluso para diferenciar grados de afectación dentro del área recorrida por el fuego

(Khusla y Ripple, 1998; Lobo *et al.*, 1998; Díaz-Delgado y Pons, 1999; Key y Benson, 1999). La fiabilidad alcanzada en la discriminación de superficies quemadas, aplicando distintas técnicas de clasificación es muy alta (superior al 90%) mientras que los resultados obtenidos en la discriminación de grados de afectación han sido muy variables dependiendo del número de grados de afectación considerados. Así, Rogan y Franklin (2001b) en una amplia revisión de trabajos en los que se discriminan grados de afectación por incendio recogen una fiabilidad media del 64% en trabajos en los que se consideraron tres grados, mientras que en los trabajos que se consideraron 5 grados de afectación ésta se reduce a un 38%.

Transformar el potencial que ofrecen estas técnicas en soluciones operativas requiere de un esfuerzo de investigación y desarrollo, así como la capacidad de los usuarios para adaptarse a estas nuevas tecnologías, para lo cual es necesario un estrecha colaboración entre usuarios y las personas y organismos encargados de generar esta información.

En este contexto se suscribe, en octubre de 1995, el convenio “Evaluación de los grados de afectación producidos por un incendio y regeneración posterior de la vegetación. Aplicación de imágenes Landsat-TM a su caracterización y seguimiento” entre el Servicio de Evaluación de Recursos

Naturales (Consejería de Medio Ambiente-Junta de Andalucía) y el Departamento de Ingeniería Forestal (ETSI Agrónomos y de Montes-Universidad de Córdoba) que ha permitido llevar a cabo la elaboración de cartografía de grados de afectación y de cartografía de propuestas restauradoras para los grandes incendios forestales (aquéllos cuya superficie recorrida por el fuego superó las 200 Ha) ocurridos entre los años 1995 y 2001 en Andalucía (ver Tabla 1).

La metodología seguida en el análisis de cada incendio se resume en el esquema que muestra la Figura 1 (Navarro *et al.*, 1995; Navarro *et al.* 1997; Navarro *et al.*, 1998; Navarro *et al.*, 2001)



Figura 1. Esquema metodológico para el estudio de grandes incendios.

Incendio	Superficie	Año
Aznalcóllar (Sevilla-Huelva)	2584 Ha	1995
Casares (Málaga)	2365 Ha	1995
Los Barrios (Cádiz)	937 Ha	1997
El Ronquillo (Huelva)	300 Ha	1998
Álajar (Huelva)	298 Ha	1999
Iznalloz (Granada)	325 Ha	1999
Ojén (Málaga)	302 Ha	1999
Sierra Cázulas (Granada)	2522 Ha	1999
Lucar (Almería)	318 Ha	2000
Lujar (Granada)	1280 Ha	2000
Quesada (Jaén)	206 Ha	2000
Los Barrios (Cádiz)	224 Ha	2001
Ojén (Málaga)	406 Ha	2001
Mijas (Málaga)	734 Ha	2001
Cazorla (Jaén)	951 Ha	2001
Pinos Genil (Granada)	315 Ha	2001
Nerva (Huelva)	600 Ha	2001
Sta. Barbara Casa (Huelva)	330 Ha	2001

Tabla 1. Relación de incendios ocurridos en Andalucía estudiados desde 1995.

La obtención de cartografía de daños se ha llevado a cabo a partir de la información de una escena Landsat TM/ETM posterior al incendio y del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) siguiendo diversos caminos en las sucesivas campañas mejorando la metodología empleada que consistía, en un principio, en la segmentación de índices de vegetación, y que finalmente en la aplicación de técnicas de clasificación supervisada, más concretamente el algoritmo de máxima verosimilitud.

Durante el estudio de los incendios ocurridos a lo largo de las distintas campañas surgieron una serie de cuestiones acerca de cómo podría mejorarse la discriminación de grados de afectación mediante clasificación supervisada: ¿Hasta qué punto influyen en los resultados las correcciones radiométricas y atmosféricas? ¿Cómo se puede incluir el efecto de la topografía en el proceso de clasificación? ¿Mejora la clasificación si además de las bandas de reflectividad incluimos en el proceso cocientes normalizados entre bandas? ¿Cómo afecta a los resultados el incluir una escena anterior al incendio en el

proceso? Algunas de estas cuestiones han sido abordadas, en parte, en trabajos anteriores.

La información física (la reflectividad) está incluida en los niveles digitales sólo de un modo relativo, es decir, está circunscrita a cada banda de la imagen y no sirve para llevar a cabo comparaciones entre fechas ni entre bandas diferentes (Chuvieco, 1996). De ello se deduce que es más apropiado trabajar con reflectividad aparente o reflectividad corregida atmosféricamente cuando en un análisis introducimos varias bandas o diferencias entre las mismas. En cualquier caso, otros autores afirman que en muchas aplicaciones, como la clasificación de una escena mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, las correcciones atmosféricas tienen muy poco efecto (Song *et al.*, 2001).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974) así como la diferencia normalizada entre las bandas 4 y 7 (NBR) ha sido utilizada en varios trabajos tanto para discriminar zonas quemadas de no quemadas como para discriminar grados de afectación (Navarro, 1991; Caselles y López, 1991; Key y Benson, 1999).

La inclusión de una escena anterior a la ocurrencia del incendio junta a una posterior en los procesos de discriminación de zonas quemadas y grados de afectación ha ofrecido resultados variables; en los

trabajos de Khusla y Ripple (1998) la inclusión de una escena anterior al incendio no mejora los resultados mientras que en los trabajos de Key y Benson (1999) considerar la diferencia entre escenas pre-incendio y post-incendio sí mejoró los resultados.

A partir de estos planteamientos el presente trabajo ha establecido los siguientes objetivos:

1. Analizar qué influencia tienen, en la discriminación de grados de afectación mediante clasificación supervisada de escenas Landsat, las correcciones radiométricas y atmosféricas previas, la inclusión de cocientes entre bandas o de la banda de iluminación derivada del DEM y la inclusión de una escena previa al incendio.

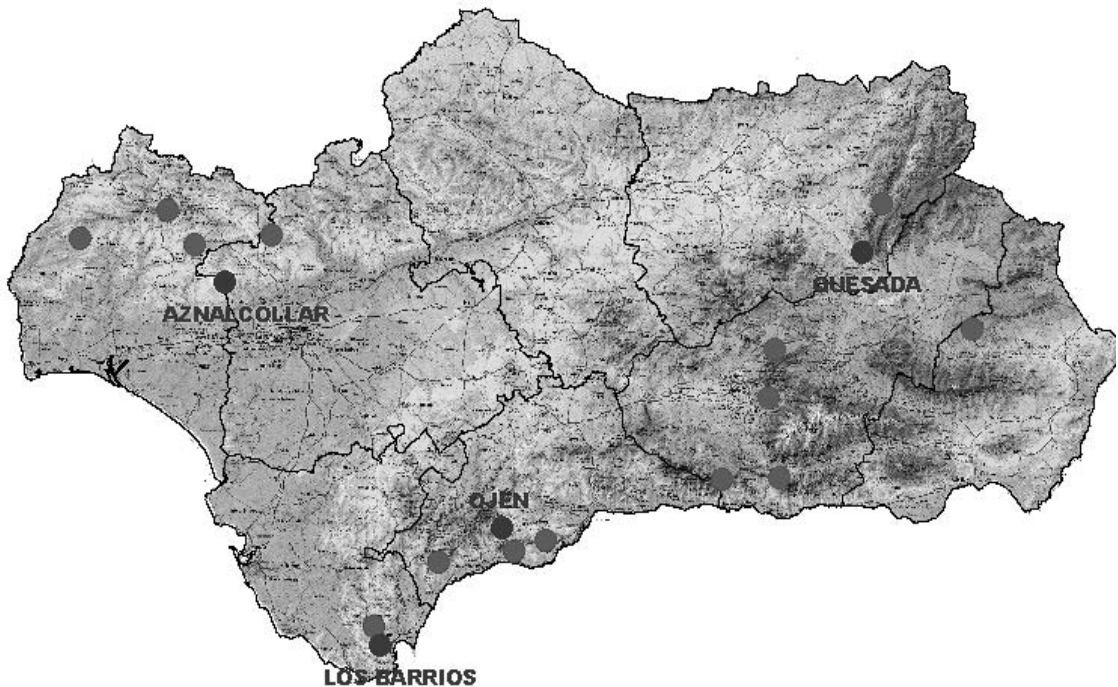
2. Estudiar la influencia de los tipos de vegetación en los resultados obtenidos en la asignación de grados de afectación.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Zonas de estudio

Se han estudiado cuatro incendios ocurridos en Andalucía entre los años 1995 y 2000 (Figura 2):

Aznalcóllar (Sevilla), ocurrido en mayo de 1995. Afectó a 2584 Ha ocupadas, principalmente, por



**Figura 2.** Localización de los distintos incendios estudiados (se destacan en azul los 4 seleccionados para este trabajo).

masas de pino piñonero (*Pinus pinea*) y alcornocal (*Quercus suber*) y en menor medida a zonas de matorral serial (principalmente *Cistus* spp., *Erica* spp. y *Halimium* spp.) y eucaliptal (*Eucalyptus* spp.) y pino negral (*Pinus pinaster*).

Los Barrios (Cádiz), ocurrido en agosto de 1997 y que recorrió 937 Ha. La vegetación afectada fue muy diversa: alcornoques (*Quercus suber*), pinares de pino negral (*Pinus pinaster*), eucaliptal (*Eucalyptus globulus*), masas mixtas (eucaliptal-alcornocal-pinar), zonas de alcornocal adhesionado, vegetación de ribera, zonas de mancha y matorrales seriales (*Erica* spp., *Cistus* spp.).

Ojén (Málaga), ocurrido en septiembre de 1999, recorriendo 406 Ha, principalmente de masas de matorral serial con pinar disperso de pino carrasco (*Pinus halepensis*), con una alta presencia de afloramientos rocosos), en menor medida a mancha, masas de *Pinus radiata* y masas mixtas (*Pinus halepensis* y *Quercus suber*).

Quesada (Jaén), ocurrido en agosto del año 2000 recorriendo 206 Ha y afectando a masas de pino carrasco (*Pinus halepensis*).

### Material y procesado previo

Para llevar a cabo este trabajo se han utilizado las 6 bandas de reflectividad de 4 escenas Landsat TM/ETM posteriores a cada incendio. Además para el estudio de los incendios de Aznalcóllar y los Barrios se emplearon dos escenas anteriores a la ocurrencia de los mismos, procurando que fuesen de la misma época que las escenas posteriores con el objeto de minimizar los efectos debidos a diferencias fenológicas y distintas condiciones de iluminación (ver Tabla 2).

Las escenas fueron corregidas por el método de puntos de control, tomando como referencia cartografía topográfica a escala 1:10.000. Se ha tratado de utilizar, para cada incendio, una escena posterior al mismo con fecha lo más cercana posible a su ocurrencia.

Además se ha utilizado el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de Andalucía de resolución de 20m x 20m que, para este trabajo, se remuestreó a un tamaño de píxel igual al de las escenas Landsat, 30m x 30m.

### Criterios metodológicos propuestos

La discriminación de grados de afectación se ha llevado a cabo mediante técnicas de clasificación supervisada analizando qué información y de qué forma es conveniente introducirla para obtener unos resultados más fiables. Los casos de estudio considerados se han basado en los criterios metodológicos que se exponen a continuación.

#### Caso 1. Aplicación de correcciones radiométricas y atmosféricas.

Se han estudiado qué diferencias se reflejan en los resultados, si en lugar de introducir en la clasificación las 6 bandas de reflectividad de una escena posterior al incendio con los niveles digitales originales, aplicamos las siguientes correcciones radiométricas y atmosféricas. Se han analizado los siguientes casos:

- Caso 1.1. Inclusión en la clasificación de las bandas 1-5 y 7 (niveles digitales, ND) de la escena posterior al incendio.
- Caso 1.2. Inclusión en la clasificación de las bandas 1-5 y 7 (reflectividad aparente) de la escena posterior al incendio. La reflectividad aparente para la banda k ( $r_k^*$ ) o reflectividad en el techo de la atmósfera vendría dada por la siguiente expresión:

$$\rho_k^* = L_k d^2 \pi / E_k \cos\theta_s$$

Donde,

- $L_k$ : radiancia captada por el sensor para la banda k.

Incendio	Escenas anteriores al incendio	Escenas posteriores al incendio
Aznalcóllar (30 mayo 1995)	20 julio 1994	5 junio 1995
Los Barrios (11 agosto 1997)	17 septiembre 1995	9 octubre 1997
Ojén (12 septiembre 1999)	-----	29 septiembre 1999
Quesada (12 agosto 2000)	-----	31 agosto 2000

Tabla 2. Relación de escenas Landsat empleadas.



- d: factor corrector de la distancia tierra-sol que depende del día del año.
- $E_k$ : irradiancia solar para la banda k.
- $\cos\theta_s$ : ángulo cenital solar (complementario del ángulo de elevación solar, que se recoge en el fichero de cabecera de la escena).
- Caso 1.3. Inclusión en la clasificación de las bandas 1-5 y 7 (reflectividad corregida atmosféricamente) de la escena posterior al incendio. Para llevar a cabo la corrección atmosférica se ha aplicado el método COST (Chavez, 1996).

Según este método la reflectividad corregida atmosféricamente ( $r_k$ ) viene dada por:

$$\rho_k = (L_k - L_{\text{haze},k})^2 \pi / E_k \cos^2\theta_s$$

Donde,  $L_{\text{sen},k}$ , d,  $E_{0,k}$ ,  $\cos\theta_s$  tienen igual significado que en la fórmula (1) y:

- $L_{\text{haze},k} = L_{\text{min},k} - L_{1\%,k}$
- $L_{\text{min},k} = a_{0,k} + a_{1,k} \text{ND}_{k,\text{min}}$ , con  $\text{ND}_{k,\text{min}}$  el nivel digital mínimo para la banda k.
- $L_{1\%,k} = 0,01 E_k \cos^2\theta_s / d^2 p$

#### Caso 2. Inclusión de diferencias normalizadas entre bandas

Para ver si la inclusión de diferencias normalizadas entre bandas, además de las 6 bandas de reflectividad, mejora los resultados de la asignación de daños, se han estudiado los siguientes casos:

- Caso 2.1. Inclusión del índice NDVI (banda4-banda3)/(banda4+banda3) junto a las bandas 1-5 y 7 de la escena posterior al incendio.
- Caso 2.2. Inclusión del índice NBR (banda4-banda7)/(banda4+banda7) junto a las bandas 1-5 y 7 de la escena posterior al incendio.

Los valores de estos índices varían entre -1 y +1; para este trabajo se ha aplicado un reescalado de los mismos de acuerdo a la expresión  $100*(\text{NDVI} \text{ ó } \text{NBR}) + 100$ .

Dado que el valor de los índices será diferente si utilizamos niveles digitales, valores de reflectividad aparente o reflectividad corregida atmosféricamente, los dos casos anteriores se estudiarán partiendo tanto de niveles digitales, como de valores de reflectividad aparente y de valores de reflectividad corregida atmosféricamente.

#### Caso 3. Inclusión de información relativa a la topografía y a las condiciones de iluminación de la escena

En este caso (3) se incluyó la banda de iluminación que se generó calculando para cada pixel, el coseno del ángulo de incidencia a partir del modelo digital de elevaciones y los ángulos de elevación y azimut solar. El valor de la iluminación oscila teóricamente entre -1 y + 1. A todos los valores negativos se les asignó el valor 0, equivalente a las condiciones de mínima iluminación. Esta banda se puede introducir directamente en una clasificación multibanda considerándose, de esta forma, el efecto que la iluminación puede producir en los valores de reflectividad de cada pixel (Chuvieco, 1996). Para este trabajo los valores de iluminación se reescalaron entre 0 y 100.

#### Caso 4. Inclusión de información previa al incendio

En este caso se optó por incluir en el proceso de clasificación una las bandas de reflectividad de una escena anterior al incendio junto con las bandas de una escena posterior. En el momento en que se decide llevar a cabo un estudio en el que se vayan a emplear imágenes de distintas fechas, la utilización de niveles digitales debe descartarse. Existen dos posibles caminos a seguir: transformar a reflectividad corregida atmosféricamente los ND de las dos escenas, anterior y posterior al incendio, o transformar a reflectividad aparente ambas y normalizar una de ellas frente a la otra (Caselles y López, 1998). En este trabajo nos hemos decantado por este último camino, por su sencillez y los buenos resultados obtenidos en otros trabajos (Lobo *et al.*, 1998; Key y Benson, 1999).

### Fases de entrenamiento, clasificación y estimación de la fiabilidad

#### Información de campo

En este trabajo se decidió considerar tres grados de afectación con el objeto de obtener una cartografía más fiable (Navarro *et al* 1998; Álvarez 1999, Rogan y Franklin 2001b). Los grados de afectación a discriminar han sido los siguientes (ver Figuras 3 y 4):

*Sin afectar*: No se aprecia ningún tipo de daños por incendio sobre la vegetación.



Figura 3. Daños moderados sobre pinar.

*Moderado:* El sotobosque o el estrato arbóreo han sido afectados pero sin llegar a destruir la totalidad de la vegetación (fracciones de copas sin afectar o pies sin afectar mezclados con pies afectados total o parcialmente). En el caso de arbustados y matorrales, la vegetación ha sido afectada parcialmente, normalmente por rodales.

*Extremo:* El fuego ha destruido el estrato arbóreo. Se conservan restos de follaje quemado en la copa o éstas aparecen carbonizadas, totalmente destruidas. En el caso de arbustados y matorrales, el fuego ha destruido totalmente la vegetación.

Como se ha dicho, se han aplicado técnicas de clasificación supervisada, para lo cual es necesario disponer de información sobre la clase a la cual pertenecen una serie de parcelas, que en la escena se corresponden con un conjunto de píxeles, información que permite entrenar el algoritmo de clasificación y validar los resultados.

Se ha partido de la información de campo que se recogió en las semanas posteriores a la ocurrencia de cada incendio y donde se detallaba la localización de una serie de parcelas (de alrededor de 1 Ha) y el grado de afectación que presentaba la vegetación en cada una de ellas. Esta información ha sido la base de la selección de píxeles tanto para la fase de entrenamiento como de validación.



Figura 4. Daños extremos sobre pinar

#### *Entrenamiento y clasificación*

Para la fase de entrenamiento se han seleccionado el mismo número de *parcelas de entrenamiento* con nivel de daños *moderado* y *extremo* (10 para Aznalcóllar y Ojén, y 9 en Quesada y los Barrios). Para representar la clase *sin afectar* no siempre ha sido factible localizar un número suficiente de parcelas en el interior del perímetro, por ello se ha optado por escoger parcelas localizadas fuera del perímetro. En cualquier caso, dado que este grupo de píxeles presentaba una alta variabilidad espectral dentro de las escenas a clasificar se ha decidido seleccionar visualmente sobre las escenas tres grupos de parcelas: parcelas *sin afectar-con escasa vegetación o sin ella* (superficies “brillantes”), parcelas *sin afectar-zonas en sombra* y parcelas *sin afectar-con vegetación*. Para caracterizar estas clases se seleccionaron el mismo número de parcelas que para las clases *moderado* y *extremo*. Las parcelas se correspondían en la escena Landsat con una ventana de 3x3 píxeles, con lo que para la fase de entrenamiento disponemos de 90 *píxeles de entrenamiento* por clase, para los incendios de Aznalcóllar y Ojén, y 81 *píxeles de entrenamiento* por clase para los incendios de los Barrios y Quesada.

Para cada uno de los casos y para cada incendio se ha analizado la separabilidad entre clases mediante el cálculo de la distancia de Jeffries-Matusita (Swain y Davis, 1978) que puede oscilar entre 0 (no hay separabilidad entre clases) y 1414 (separabilidad máxima).

En un primer término se ha clasificado, mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, la escena original teniendo en cuenta las cinco clases mencionadas aunque, en la cartografía final, las clases *sin afectar* aparecen agrupadas en una sola clase.

*Estimación de la fiabilidad*

La validación de las clasificaciones se llevó a cabo con 120 píxeles de validación, por incendio (40 por cada una de las clases: *sin afectar, moderado, extremo*), diferentes a los que se han empleado en el entrenamiento, elaborando matrices de error y calculando así la fiabilidad global como el porcentaje de píxeles de validación cuya clase ha sido bien asignada respecto al número total de píxeles de validación (se considera que la clase de un píxel es la clase de la mayoría de píxeles de una ventana 3x3 alrededor del mismo o lo que es lo mismo la clase del píxel después de aplicar un filtro de mayoría 3x3 a la imagen clasificada). Además de la fiabilidad global se han calculado para cada caso los intervalos de confianza de la misma para un 95% de probabilidad de acuerdo a la fórmula (Chuvieco, 1996):

$$\text{Fiabilidad real} = \text{Fiabilidad global} \pm 1,96 * ((pq)/n)^{0,5}$$

Siendo p el porcentaje de aciertos, q el porcentaje de fallos y n el número de píxeles correspondientes a las parcelas de validación.

## RESULTADOS

En la Tabla 3 se recogen los valores de la distancia de Jeffries-Matusita para los casos estudiados, así como el valor medio y mínimo para todas las clases. Para cada caso, además, se recoge la fiabilidad global de la clasificación final y los intervalos de confianza calculado para un 95% de probabilidad.

*Caso 1. Aplicación de correcciones radiométricas y atmosféricas*

La transformación de niveles digitales a reflectividad aparente o la reflectividad corregida atmosféricamente no ha supuesto en ningún caso una mejora de la separabilidad entre clases y/o la fiabilidad de la cartografía final (ver casos 1.1., 1.2. y 1.3. en Tabla 3).

*Caso 2. Inclusión de diferencias normalizadas entre bandas*

Si se observa, en primer lugar, los valores de separabilidad y fiabilidad para los casos en los que se han introducido además de las 6 bandas de reflectividad los índices NDVI y NBR, trabajando con números digitales (casos 2.1.1. y 2.2.1.) y los comparamos con los resultados obtenidos al introducir únicamente las 6 bandas (casos 1.1.) podemos decir que, en general, introducir cualquiera de los índices mejora la separabilidad. En cuanto a la fiabilidad global no se observan mejoras significativas. No se aprecia una diferencia evidente entre el efecto de incluir uno u otro índice.

Caso	J-M (separabilidad media-separabilidad mínima)				Fiabilidad % (Intervalos de confianza)			
	Aznalcóllar	Barrios	Ojén	Quesada	Aznalcóllar	Barrios	Ojén	Quesada
1.1.- 6 bandas (niveles digitales)	1378-1096	1378-1224	1371-1229	1372-1235	90,83 +/- 5,16	89,17 +/- 5,56	89,17 +/- 5,56	100,00
1.2.- 6 bandas (reflectividad aparente)	1378-1096	1378-1224	1371-1229	1372-1235	90,83 +/- 5,16	89,17 +/- 5,56	89,17 +/- 5,56	100,00
1.3.- 6 bandas (reflectividad corregida)	1378-1096	1378-1224	1371-1229	1372-1235	90,83 +/- 5,16	89,17 +/- 5,56	89,17 +/- 5,56	100,00
2.1.1.- 6 bandas y NDVI (niveles digitales)	1393-1222	1398-1328	1396-1296	1395-1306	90,83 +/- 5,16	90,83 +/- 5,16	89,17 +/- 5,16	100,00
2.1.2.- 6 bandas y NDVI (reflectividad aparente)	1393-1221	1398-1327	1396-1296	1393-1290	90,83 +/- 5,16	90,83 +/- 5,16	90,00 +/- 5,37	100,00
2.1.3.- 6 bandas y NDVI (reflectividad corregida)	1391-1200	1398-1326	1396-1291	1391-1279	88,33 +/- 5,74	90,00 +/- 5,37	90,00 +/- 5,37	100,00
2.2.1.- 6 bandas y NBR (niveles digitales)	1392-1217	1398-1325	1394-1264	1398-1357	90,83 +/- 5,16	90,83 +/- 5,16	90,00 +/- 5,37	99,17 +/- 1,62
2.2.2.- 6 bandas y NBR (reflectividad aparente)	1393-1218	1398-1325	1394-1264	1395-1352	90,83 +/- 5,16	90,83 +/- 5,16	90,00 +/- 5,37	99,17 +/- 1,62
2.2.3.- 6 bandas y NBR (reflectividad corregida)	1393-1226	1398-1326	1395-1281	1394-1317	90,83 +/- 5,16	90,83 +/- 5,16	90,00 +/- 5,37	100,00
3.- 6 bandas y banda de iluminación	1381-1117	1383-1244	1379-1276	1396-1337	90,83 +/- 5,16	91,67 +/- 4,94	89,17 +/- 5,56	100,00
4.- 12 bandas (escenas pre-incendio y post-incendio)	1396-1242	1400-1323	-----	-----	92,50 +/- 4,71	94,17 +/- 4,19	-----	-----

**Tabla 3.** Separabilidad y fiabilidad global para los casos propuestos (intervalos de confianza calculados para una probabilidad del 95%)

Si observamos los resultados obtenidos cuando se trabajan con valores de reflectividad aparente o corregida en vez de trabajar con niveles digitales (casos 2.1.2., 2.1.3., 2.2.2., 2.2.3.) vemos que la separabilidad presenta valores muy parecidos, por lo general ligeramente peores o iguales (excepto para el caso 2.2.3. en el que se observan ligeras mejoras respecto al caso 2.2.1 en tres de los cuatro incendios). Los valores de fiabilidad se mantienen en la mayoría de los casos iguales que al trabajar con niveles digitales o sufren ligeras variaciones (menores al 1%). De todo esto se deduce que aún introduciendo diferencias normalizadas entre bandas en el proceso de clasificación, no se produce una mejora en los resultados que justifique la transformación de ND a reflectividad aparente o corregida.

### Caso 3. Inclusión de información relativa a la topografía y a las condiciones de iluminación de la escena

Si observamos los resultados que se han obtenido al incluir junto a las 6 bandas de reflectividad (niveles digitales) la banda de iluminación (Tabla 3) podemos apreciar que la separabilidad mejora respecto al caso 1.1. en los 4 incendios. En cualquier caso la fiabilidad de nuevo se mantiene u ofrece una mejora en cualquier caso no significativa.

### Caso 4. Inclusión de información previa al incendio

La inclusión de información previa al incendio solamente se ha llevado a cabo en dos incendios: Aznalcóllar y los Barrios. Fijándonos en primer lugar en los resultados obtenidos observamos que la separabilidad (media y mínima) mejora todos los casos expuestos anteriormente en el incendio de Aznalcóllar. En el incendio de los Barrios aunque la separabilidad mínima entre clases no es mejor que todas las anteriores, la separabilidad media sí lo es. La fiabilidad global de la cartografía final es superior a la de todos los casos estudiados anteriormente (en los dos incendios la fiabilidad es más de un 2% mayor que el mejor de los casos anteriores) sin embargo no se puede decir que sea significativamente mayor a la vista de los valores de los intervalos de confianza.

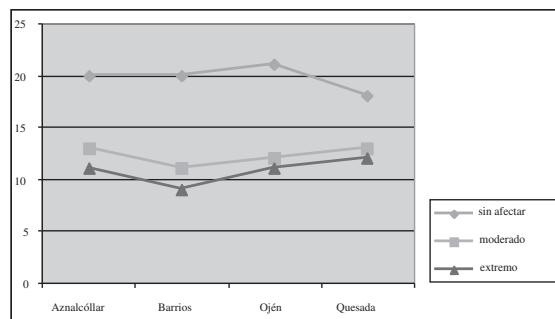
## DISCUSIÓN

Al analizar los resultados para los distintos casos generados según los diferentes criterios metodoló-

gicos propuestos cabe destacar, en primer lugar, el hecho de que las correcciones radiométricas y atmosféricas no modificaron los resultados respecto a aquéllos obtenidos cuando se trabajó con niveles digitales, lo que viene a confirmar las observaciones que algunos autores hacen acerca del poco efecto que suponen las correcciones atmosféricas y radiométricas en la clasificación de una escena mediante el algoritmo de la máxima verosimilitud (Song *et al.* 2001).

En cualquier caso, la transformación a valores de reflectividad sí es interesante de cara a interpretar las firmas espectrales de los píxeles de entrenamiento de cada clase y poder comparar los cuatro incendios e incluso con otros trabajos.

Se ha podido observar, tal como recogen otros autores, que el efecto del fuego está especialmente reflejado en un descenso de la reflectividad en la región del infrarrojo cercano (banda 4). López y Caselles (1991) recogen un descenso de la reflectividad aparente en la banda 4, en zonas quemadas (incendio de Buñol, 1984) respecto a zonas de referencia, de un 6% (de 18% a 12%); Frederiksen *et al.* (en Chuvieco 1997) recogen, para sus zonas de estudio, descensos que oscilan entre un 11% y un 15%. Si analizamos los valores medios de reflectividad aparente de los grupos de *píxeles de entrenamiento* (vegetación sin afectar, daños moderados, daños extremos) en los cuatro incendios objeto de este trabajo, podemos observar un comportamiento espectral análogo al descrito por estos autores (Figura 5) con descensos medios que oscilaron, en los píxeles de afectación moderada y extrema, entre un 9% y un 13%, valores que se encuentran dentro del intervalo definido por Chuvieco (1997) para zonas quemadas (entre 6% y un 15%).

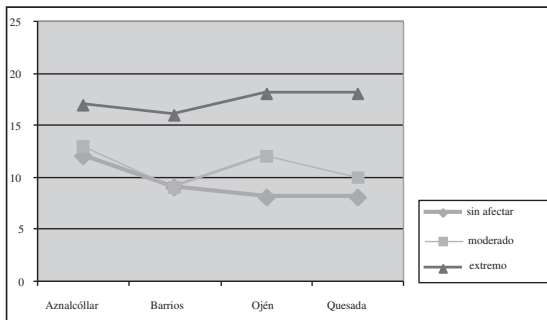


\* **Figura 5.** Valores medios de reflectividad de la banda 4 para los distintos grados de afectación

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color



La respuesta espectral de áreas incendiadas en la zona del infrarrojo medio (bandas 5 y 7) no es tan clara como en el infrarrojo cercano, siendo variable en función del tipo de vegetación afectada, aunque en incendios producidos en zonas templadas se suele observar un incremento de la reflectividad en esta región del espectro (Chuvieco, 1997). En los cuatro incendios estudiados, los valores de reflectividad en la banda 5 no tienen una tendencia clara dependiendo del nivel de afectación. En la banda 7, se ha observado, para los píxeles con nivel de daño moderado, unos valores ligeramente mayores que en los píxeles sin afectar en tres de los cuatro incendios (ver Figura 6) mientras que los píxeles con nivel de daños extremo sí reflejan un incremento claro en la banda 7. Parece, a la vista de los resultados, que la banda 7 presenta un potencial importante en la separación de grados de afectación.



\* **Figura 6.** Valores medios de reflectividad de la banda 4 para los distintos grados de afectación

En el espectro visible no se ha observado ninguna tendencia común a los cuatro incendios.

En cuanto al resto de los criterios metodológicos analizados cabe destacar que, si bien se observan mayores valores en la separabilidad de las distintas clases al incluir alguno de los cocientes entre bandas propuestos o la banda de iluminación, en lo que a fiabilidad global de la cartografía obtenida se refiere, vemos que las diferencias entre los casos para un mismo incendio son muy pequeñas y en ningún caso significativas. La separabilidad y la fiabilidad global aumentan en mayor grado cuando se incluyen en la clasificación las bandas de una escena anterior al incendio.

Si comparamos los distintos incendios estudiados, vemos que hay tres incendios, Aznaicóllar, Barrios y Ojén, que no muestran diferencias significativas

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

para ninguno de los casos propuestos (la fiabilidad global 89% y 91%, salvo en los casos en que se incluyen la escena anterior al incendio donde llega alcanzar un 94%). Sin embargo Quesada ofrece claramente resultados mejores, la fiabilidad global esta por encima del 99% en todos los casos propuestos. Si analizamos el tipo de vegetación afectada en los cuatro incendios, cabe destacar la homogeneidad del incendio de Quesada (masas de pino carrasco) frente a la heterogeneidad de los otros tres (donde se mezclan distintas especies arbóreas, distintos tipos de formaciones de matorral, masas adhesionadas). Esto nos lleva a afirmar que la complejidad de la vegetación afectada influye en la fiabilidad global de la cartografía de grados de afectación generada.

## CONCLUSIONES

Podemos concluir que la clasificación supervisada de una escena posterior al incendio aplicando el algoritmo de máxima verosimilitud para la discriminación de tres grados de afectación (sin afectar, moderado, extremo) ofrece unos resultados suficientemente fiables (especialmente en incendios con una vegetación previa homogénea) incluso sin llevar a cabo ninguna corrección radiométrica ni atmosférica y obviando el efecto de la topografía.

La elaboración de una cartografía de grados de afectación según la metodología descrita, es un primer paso hacia la integración de la teledetección como herramienta de apoyo al gestor en la restauración post-incendio; ofrece resultados fiables y es más operativa (rápida y con coste relativamente bajo) que otros métodos tradicionales (inventario en campo o fotointerpretación).

La asimilación de un fenómeno continuo, como es el nivel de afectación, a una clasificación discreta de únicamente tres grados de afectación, puede parecer en exceso simplista pero en absoluto carente del valor para el gestor. Ésta pone a su disposición una información fiable sobre superficies no afectadas en el interior del perímetro del incendio sobre las que no será necesario actuar y que pueden ser fuente de semillas de cara a la regeneración de las zonas circundantes; por otra parte define las zonas “de afectación moderada” donde probablemente las cortas y podas sanitarias sean las actuaciones prioritarias; finalmente quedan delimitadas las zonas “de afectación extrema” donde las actuaciones serán muy variables dependiendo de la respuesta al fuego de las especies afectadas y de la madurez de las masas.

En definitiva la cartografía de 3 grados de afectación junto con una cartografía de vegetación previa, y la potencialidad que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica SIG para combinar éstas y otras cartografías de la zona (suelos, pendientes, vegetación potencial) pueden ser la base para una primera zonificación del área afectada por el fuego y una planificación de su restauración.

Sin embargo, es cierto que en la cartografía generada, la clase "afectación moderada" se están incluyendo muchas y diversas situaciones que sería deseable detallar: afectación por rodales, pies sin afectar entremezclados con pies totalmente quemados, copas afectadas parcialmente en muy distintos grados, zonas de transición entre vegetación sin afectar y vegetación con afectación extrema, etc. Todas estas situaciones ocurren "dentro" del pixel de la escena Landsat, por tanto, para una adecuada caracterización de las mismas será necesario trabajar con imágenes de mayor resolución espacial o bien aplicar técnicas sub-pixel como el análisis de mezclas espectrales siguiendo la línea de algunos trabajos recientes (Caetano, 1994; Díaz-Delgado y Pons 1999; Rogan y Frankin, 2001a y 2001b). Por otra parte, a la hora de definir una leyenda con mayor nivel de detalle, será necesario tener en cuenta las distintas formaciones vegetales previas al incendio. Profundizar en estas cuestiones es el objeto de una segunda fase de este trabajo que actualmente se encuentra en proceso de realización.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del convenio específico de colaboración "Evaluación de los grados de afectación producidos por un incendio y regeneración posterior de la vegetación. Aplicación de imágenes Landsat-TM a su caracterización y seguimiento" entre el Servicio de Evaluación de Recursos Naturales (Consejería de Medio Ambiente-Junta de Andalucía) y el Departamento de Ingeniería Forestal (ETSI Agrónomos y de Montes-Universidad de Córdoba).

## BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ ALBARRÁN, A. 1999. Cartografía de daños producidos por incendio forestal mediante técnicas de teledetección espacial. Propuestas de análisis. *Memoria del Proyecto Fin de Carrera.*

- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba.
- CAETANO, M., MERTES, L., y PEREIRA J. M. 1994. Using spectral mixing for fire severity mapping. En: *Proceedings of the second International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal.
- CASELLES, V. y LÓPEZ GARCÍA, M. J. 1989. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*. 10:1127-1134.
- CHÁVEZ P. S., (1996). Imaged-Based Atmospheric Corrections. Revised and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 9.
- CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp. Madrid.
- CHUVIECO, E. 1997. *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares.
- CHUVIECO, E. y CONGALTON, R. G. 1988. Mapping and inventory forest fires from digital processing of TM data. *Geocarto International*. 84:41-53.
- COCHRANE, M.A. y SOUZA, C. M. 1998. Linear mixture model classification of burned forests in the Eastern Amazon. *International Journal Remote Sensing*. 17:3433-3440.
- DÍAZ-DELGADO, R. y PONS, X. 1999. Empleo de imágenes de teledetección para el análisis de los niveles de severidad causados por el fuego. *Revista de Teledetección*. 12:63-68.
- KEY, C. H. y BENSON, N. C. 1999. THE Normalized Burn Ratio, a Landsat TM radiometric index for burn severity. URL: <http://nrmsc.usgs.gov/research/nbr.htm>.
- KHUSLA, J. D. y RIPPLE, W. J. 1998. Assessing wildfire effects with Landsat Thematic Mapper Data. *International Journal of Remote Sensing*. 13:2493-2507.
- LOBO, A., PINEDA, N., NAVARRO-CERRILLO, R. M., FERNÁNDEZ-REBOLLO, P., SALAS-CABRERA, F. J., FERNÁNDEZ-TURIEL, J. L., y FERNÁNDEZ-PALACIOS, A. 1998. Mapping forest fire impact from Landsat-TM imagery. En: *Proceedings of EUROPTO Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology*, Barcelona, pp.340-347.
- LÓPEZ, M. J y CASELLES, V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*. 1:31-37.

- NAVARRO CERRILLO, R. M., FERNÁNDEZ REBOLLO, P. y ESCUIN ROYO S. 2001. Evaluación de daños producidos por incendios forestales mediante imágenes satélite. Propuesta de restauración. En: *III Congreso Forestal Español. Granada*. Mesa 6:482-487.,
- NAVARRO CERRILLO, R. M., NAVARRO MEZQUITA, C. y AVELLANAS OAR, B., 1995. Regeneración de la vegetación después de un incendio. Aplicación de imágenes Landsat-TM a su caracterización y seguimiento. En: *Actas de la Reunión del Grupo de Selvicultura Mediterránea. Córdoba*. 3:35-46.
- NAVARRO CERRILLO, R. M., NAVARRO MEZQUITA, C., SALAS CABRERA, F. J., GONZÁLEZ DUGO, M. P. y FERNÁNDEZ REBOLLO, P., 1997. Evaluación de daños producidos por un incendio y regeneración posterior de la vegetación. Aplicación de imágenes Landsat-TM a su caracterización y seguimiento. En: *Congreso Forestal Hispano Luso, Pamplona*. 5:313-318.
- NAVARRO CERRILLO, R. M., NAVARRO MEZQUITA, C., SALAS-CABRERA, F. J., GONZÁLEZ-DUGO, M. P., FERNÁNDEZ REBOLLO, P. y RODRIGUEZ-SILVA, F. 1998a. Evaluación de grados de afectación producidos por un incendio. Aplicación de imágenes Landsat-TM a su caracterización y seguimiento. *Mapping*. 44:37-47. Madrid.
- NAVARRO MEZQUITA, C. 1991. Uso de las imágenes LANDSAT-TM en un sistema de evaluación de daños causados por incendios forestales. *IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Sevilla*.
- PEREIRA, M. C. y SETZER, A. W. 1993. Spectral characteristics of fire scars in Landsat TM images of Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*. 11:2061-2078.
- ROGAN, J. y FRANKLIN J. 2001a. Mapping wildfire burn severity in Southern California using spectral mixture analysis. En: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS 01)*, Sidney, Australia.
- ROGAN, J. y FRANKLIN J. 2001b. Mapping wildfire severity in Southern California forests and shrublands using Enhanced Thematic Mapper Imagery. *Geocarto International*. 16 (4).
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. y HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC. Type III. Final Report. Greenbelt. MD. pp 371.
- SALVADOR, R. J., VALERIANO, PONS X. y DÍAZ-DELGADO, R. 2000. Semi-automatic methodology to detect fire scars in shrubs and evergreen forests with Landsat MSS time series. *International Journal of Remote Sensing*. 21. (4):655-671.
- SONG, C., WOODCOCK, C .E., SETO, K. C., LENNEY, M. P. y MACOMBER, S. A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data. When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*. 75:230-244.
- SWAIN, P. H. y DAVIS, S. M. 1978. *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. Mc Graw Hill Book Company (Ed.). New York.

# NOTICIAS

La revista de Teledetección insertará figuras EN COLOR, acompañando los textos de los artículos seleccionados.

Mediante esta decisión, se vuelve a recuperar uno de los objetivos iniciales de la revista. Parecía una necesidad obvia incluir los resultados gráficos en color para alcanzar mayor calidad de este instrumento de comunicación entre los miembros de la comunidad científica española que trabaja en Teledetección.

Por tanto, desde estas páginas se anima de nuevo a todos aquellos profesionales involucrados en estudios científicos o técnicos de Teledetección a que envíen sus trabajos a la revista, considerando esta nueva posibilidad.

Seguimos trabajando en la mejora de calidad de la revista. Serán bienvenidas todas aquellas sugerencias que permitan alcanzar ese objetivo.