

# Estudio comparativo de los regímenes de fuego en tres espacios naturales del oeste peninsular mediante imágenes Landsat

F. J. Lozano, S. Suárez-Seoane y E. de Luis  
javierl@unileon.es

*Área de Ecología, Fac. CC. Biológicas y Ambientales;  
24071, Campus de Vegazana; Universidad de León, León.*

## RESUMEN

La cartografía de zonas quemadas es una herramienta útil para la caracterización del régimen de fuegos. Mediante imágenes de los sensores Landsat TM y ETM+ se ha generado la cartografía de fuegos de tres espacios naturales de Castilla y León para el período 1992-2002, caracterizándose posteriormente el patrón temporal del régimen de fuegos de cada zona. Se analizaron además diversas metodologías para la detección de las zonas quemadas. Los resultados identificaron al índice espectral NBR como el más adecuado y confirman la problemática derivada de los incendios en dos de los espacios naturales considerados, con alto valores de ocurrencia y recurrencia.

**PALABRAS CLAVE:** cartografía de zonas quemadas, índices espectrales, patrón temporal del régimen de fuegos, recurrencia de incendios .

## ABSTRACT

Fire scars mapping is a useful tool for the characterization of fire regimes. Using Landsat TM and ETM+ imagery we mapped fire scars in three natural parks of Castilla y León for the period 1992-2002 and, subsequently, we characterized the temporal pattern of the fire regimes of each study site. We also assessed several methodologies for the identification of burned scars. Results showed the spectral index NBR as the most suitable for fire scars mapping and confirm the importance of fire events in two of the natural parks, where fire occurrence and recurrence were high.

**KEY WORDS:** fire scars maps, spectral indices, temporal pattern of the fire regime, fire recurrence.

## INTRODUCCIÓN

A pesar de la importancia de los incendios forestales en la Península Ibérica, son relativamente recientes los intentos de cartografiar dichos eventos de una manera sistemática y fiable (Díaz-Delgado et al., 1998; Recondo et al., 2002; Calle et al., 2005). Este tipo de información espacial es de gran valor para la gestión de las zonas quemadas desde dos puntos de vista:

(i) es una fuente de datos importante para la caracterización del régimen de fuegos, tanto en el tiempo como en el espacio, lo que permite incorporar el componente de la historia de fuego a los modelos de probabilidad de ocurrencia (Lozano et al., 2006). Estos modelos identifican las zonas con más riesgo de sufrir incendios y son útiles para la

gestión de las mismas. La probabilidad de que ocurra un incendio está condicionada por las características de la vegetación en un determinado momento (muy influenciadas a su vez por la climatología), la gestión forestal, tanto a nivel público como por parte de los particulares, así como por la historia de fuego acontecida en el pasado (Vélez, 2000).

(ii) es una herramienta útil para el diseño de las posibles medidas de restauración a realizar tras los incendios. La delimitación de zonas quemadas y su integración con información geográfica temática en un SIG redundan en la mejora del proceso de diseño e implementación de medidas de restauración.

La teledetección desde plataformas remotas aporta grandes posibilidades para la generación de cartografías de zonas quemadas. La (i) gran disponibilidad de productos, con sus correspondientes reso-

luciones espectrales, espaciales y temporales, (ii) el menor coste económico del producto final con respecto a otros métodos como la utilización de GPS desde helicópteros o en el terreno (si bien estas técnicas son más fiables y precisas) y (iii) la posibilidad de utilizar métodos parcial o totalmente automáticos (como los productos derivados del proyecto MODIS-Fire) son ventajas de la utilización de la teledetección frente a otras fuentes de datos. Existen ejemplos del uso de imágenes de diversos sensores en la Península Ibérica para (i) la delimitación de uno o varios incendios concretos (Martínez et al., 2002; Heredia et al., 2003; Quintano et al., 2005) y (ii) la elaboración de una cartografía de incendios para un determinado territorio durante un período de tiempo. Con respecto al segundo caso, Martín y Chuvieco (1995) cartografiaron los grandes incendios que ocurrieron en la Península Ibérica durante tres años con imágenes del sensor NOAA-AVHRR utilizando índices espectrales: NDVI, SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), GEMI (Global Environmental Monitoring Index) y IAQ (Índice de Área Quemada). Fernández et al. (1997) abordaron un objetivo similar mediante análisis de regresión y de diferencia temporal de los valores del índice NDVI. Díaz-Delgado et al. (1998) generaron la cartografía de incendios de Cataluña para el período 1975-1998. Su metodología se basa en el estudio del cambio de los valores del índice espectral NDVI calculado con datos de los sensores Landsat MSS y TM. En Asturias, para el período 1991-2001, Recondo et al. (2002) abordaron un objetivo similar mediante un método de detección basado en la diferencia entre pares de imágenes y posterior clasificación supervisada de la imagen de diferencia obtenida. Existen además intentos de puesta en marcha de sistemas en tiempo real de detección, control y posterior delimitación de los fuegos. En esta línea, Calle et al. (2005) utilizaron un análisis de contexto de dos bandas espectrales termales con datos de los sensores MSG y MODIS.

Este tipo de cartografías permiten caracterizar en la zona estudiada el régimen de fuegos (Díaz Delgado, 1998), que comprende la intensidad, tipo, frecuencia, extensión y estacionalidad de los incendios que allí ocurren (Whelan, 1995). El régimen de fuegos tiene una fuerte influencia sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas afectados. Por ello, cambios en el régimen de fuegos, que suelen ser causados por las actividades humanas, comprometen la conservación y sosteni-

bilidad de los ecosistemas (Baker, 1992; Keeley y Fotheringham, 2001).

El objetivo principal de este estudio fue la generación de una cartografía de zonas quemadas y posterior caracterización del patrón temporal del régimen de fuegos en tres espacios naturales del Oeste peninsular para el período 1992-2002, utilizando una serie anual de imágenes de los sensores Landsat TM y ETM+. Además, se abordó, como objetivo secundario, la comparación de varios métodos de identificación de zonas quemadas.

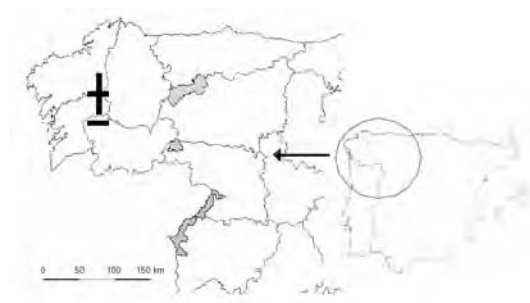
## DATOS Y METODOLOGÍA

### Zonas de estudio

La zonas de estudio comprende tres espacios protegidos de Castilla y León que son, de norte a sur (Figura 1): Espacio Natural de la Sierra de Ancares (99333 ha), Parque Natural del Lago de Sanabria y alrededores (22679 ha) y Parque Natural de Arribes de Duero (106223 ha). En las tres zonas se observa un proceso de abandono de cultivos que homogeneiza el paisaje y aumenta el riesgo de incendios por la acumulación de biomasa asociada. Parte de la población local utiliza el fuego como herramienta para el manejo de la vegetación con fines agrícolas o ganaderos, y es causante de la mayor parte de los incendios. Ancares y Sanabria son zonas montañosas, cuyo paisaje sigue un gradiente altitudinal y está muy influenciado por los incendios recurrentes a lo largo de la época estival, que son su mayor problema de conservación. Los brezales constituyen la matriz del paisaje y la comunidad vegetal más afectada por el fuego. El Parque Natural de Arribes de Duero está formado por un valle encajado, resguardado de los vientos, con mucha insolación y altas temperaturas, junto al que se eleva una penillanura dominada por cultivos de secano, pastos y dehesas. Los fuegos son menos frecuentes que en los otros dos espacios naturales considerados.

### Imágenes y tratamiento

La elección de las imágenes utilizadas en el estudio estuvo marcada por la distribución mensual de los fuegos, más frecuentes y de mayor tamaño en los meses de Julio, Agosto y Septiembre. Para incluir la mayor parte posible de los fuegos ocurridos, la intención inicial fue utilizar imágenes de



**Figura 1:** Zonas de estudio. La figura muestra las tres zonas comprendidas en el estudio. De norte a sur: Espacio Natural de la Sierra de Ancares, Parque Natural del Lago de Sanabria y alrededores y Parque Natural de Arribes de Duero.

mediados-finales de Septiembre. Sin embargo, la presencia de nubes no siempre permitió seguir ese criterio (ver Tabla 1). Además, los bajos valores del ángulo de altura solar a partir de principios-medios de Octubre hicieron desaconsejable la utilización de imágenes de ese período.

El tratamiento de las imágenes comprendió una serie de correcciones iniciales (geométrica, radiométrica, atmosférica y topográfica) y una normalización temporal posterior. La corrección geométrica se llevó a cabo mediante el método polinomial propuesto por Palá y Pons (1995) y se implementó con el programa MiraMon (Pons, 2002). Dicho método tiene en cuenta la topografía de la zona mediante la inclusión de la altitud de cada punto.

Con el fin de disponer de un modelo digital de elevaciones (MDE) fiable y de resolución semejante a las imágenes, se realizó una interpolación a partir de la cartografía digital de escala 1:10000 existente (suministrada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León). Utilizando la ortofotografía digital del año 2000 (resolución espacial 70 cm) se identificó un total de 50 puntos por año fácilmente discernibles en las imágenes a corregir. Dos tercios de los mismos se emplearon para realizar la corrección y el tercio restante para validar los resultados, estableciéndose como máximo valor posible del error medio acumulado la resolución espacial de las imágenes (30 metros). La corrección radiométrica se basó en los algoritmos propuestos por Markham y Barker (1986) y Moran et al. (1992) y la corrección atmosférica en el modelo de transmitancia (COST) propuesto por Chavez (1996). Los valores de transmitancia de la atmósfera para las bandas 5 y 7 utilizados en dicho modelo se obtuvieron a partir de Gilabert et al. (1994), ya que las características atmosféricas de su área de estudio eran similares a las de las zonas aquí consideradas. Finalmente, y debido a la escarpada topografía, se llevó a cabo la corrección topográfica basada en un modelo no-lambertiano, conocido como C-Correction (Teillet et al., 1982; Riaño et al., 2003). Una vez corregidas las imágenes se normalizó radiométricamente toda la serie mediante el método de áreas pseudo-invariantes propuesto por Hall et al. (1991).

## Identificación de zonas quemadas

Para la identificación de las zonas quemadas, se siguieron varias metodologías. La mayor parte de ellas se basan en la comparación temporal de dos imágenes sucesivas y se pueden englobar en dos grupos:

(i) Basadas en índices espectrales: Normalized Difference Vegetation Index o NDVI (Rouse et al., 1973), Normalized Burn Ratio o NBR (Key y Benson, 1999) e Índice de Área Quemada o IAQ (Martín y Chuvieco, 1998). Las dos primeras se basan en la diferencia entre el valor del índice antes y después del incendio, por lo que se denominarán en lo sucesivo dNDVI y dNBR. En cambio, la metodología basada en el índice IAQ no se basa en comparación temporal y utiliza solo una imagen post-incendio.

| Año  | Ancares |        | Sanabria |        | Arribes |        |
|------|---------|--------|----------|--------|---------|--------|
|      | Fecha   | A.E.S. | Fecha    | A.E.S. | Fecha   | A.E.S. |
| 1991 | 4-Ago.  | 53.59  | 4-Ago.   | 53.84  | 4-Ago.  | 54.60  |
| 1992 | 6-Ago.  | 53.05  | 6-Ago.   | 53.31  | 6-Ago.  | 53.92  |
| 1993 | 9-Ago.  | 52.34  | 9-Ago.   | 52.61  | 9-Ago.  | 53.38  |
| 1994 | 9-Junio | 58.27  | 9-Junio  | 58.44  | 9-Junio | 58.98  |
| 1995 | 15-Ago. | 48.32  | 15-Ago.  | 48.54  | 15-Ago. | 49.28  |
| 1996 | 2-Sep.  | 45.86  | 2-Sep.   | 46.20  | 2-Sep.  | 46.91  |
| 1997 | 19-Jul. | 57.30  | 19-Jul.  | 57.53  | 5-Sep.  | 48.14  |
| 1998 | 8-Sep.  | 46.97  | 8-Sep.   | 47.41  | 8-Sep.  | 48.19  |
| 1999 | 1-Jul.  | 62.57  | 1-Jul.   | 62.86  | 18-Ago. | 55.66  |
| 2000 | 5-Sep.  | 49.00  | 5-Sep.   | 49.47  | 5-Sep.  | 50.27  |
| 2001 | 23-Ago. | 52.58  | 23-Ago.  | 52.99  | 23-Ago. | 53.75  |
| 2002 | 11-Sep. | 46.99  | 11-Sep.  | 47.47  | 25-Jul. | 59.97  |

**Tabla 1:** Imágenes utilizadas en el estudio. Se muestra las fechas y los correspondientes ángulos de elevación solar (en grados).

(ii) Basadas en las radiancias espectrales. Método propuesto por Recondo et al. (2002) que sigue tres pasos: (a) diferencia de las imágenes pre y post-incendio, (b) creación de una composición en color con las bandas 4, 5 y 7, (c) clasificación supervisada de la imagen en base a los colores y tonalidades de la composición antes descrita. En los párrafos sucesivos nos referiremos a esta metodología como DIF-COM-CLAS.

Con el fin de simplificar los pasos siguientes, se realizó un análisis preliminar de los tres índices espectrales, reteniéndose aquél con mejores resultados. Se analizaron visualmente varios incendios de verano de 2000 (Tabla 2), evaluando la nitidez y precisión con la que cada índice delimitaba los perímetros de los mismos. Puesto que el índice espectral, que se identificó como más adecuado por el análisis preliminar, tiene valores continuos, es necesario definir un valor umbral que permita discernir los píxeles quemados. Ese valor debe ser estándar para todas las zonas y años, de tal forma que la metodología seguida sea sistemática y objetiva. Se plantearon diversos valores, basados en la bibliografía existente y el análisis preliminar, calculándose para cada uno de ellos la fiabilidad total y los errores de omisión y comisión en la delimitación de las zonas quemadas. Para ello, se utilizaron

sólo contornos de incendios de la zona de la Sierra de Ancares (Tabla 2), ante la escasez de incendios delimitables con precisión en los espacios de Sanabria y Arribes.

Posteriormente, se generaron dos cartografías de zonas quemadas siguiendo los métodos basados en el índice espectral retenido tras el análisis preliminar y DIF-COM-CLAS. Con el fin de evitar errores derivados de pequeños fuegos agrícolas o desbroces, se estableció un tamaño mínimo de detección de 5 ha. Además, se eliminaron, mediante máscaras, aquellos incendios identificados por error en minas, núcleos de población, manchas de agua y grandes desbroces. Como último paso de la metodología se validaron los mapas obtenidos, utilizando otro grupo de polígonos (Tabla 2). También se llevó a cabo una validación no cuantitativa con ayuda de los guardas forestales de la zona, tanto en campo como en gabinete, así como con partes de incendios de la Junta de Castilla y León. Finalmente, la cartografía con mejores resultados fue utilizada para caracterizar el patrón temporal del régimen de fuegos en las zonas para el período de estudio considerado. Se evaluó (i) la dinámica anual de superficie quemada, (ii) la recurrencia para cada espacio en el período 1992-2002 y (iii) la dinámica interanual de la recurrencia.

| Fase del estudio         | Nº polígonos | Fuente                   | Espacio Natural   | Superficie total | Año incendios | Año detección |
|--------------------------|--------------|--------------------------|-------------------|------------------|---------------|---------------|
| Análisis preliminar      | 2            | Dig. Ort. 2000*          | Sierra de Ancares | 66               | 2000          | 2000          |
|                          | 1            | Dig. Ort. 2000*          | Arribes de Duero  | 29               | 2000          | 2000          |
|                          | 1            | Dig. Ort. 2000*          | Lago de Sanabria  | 19               | 2000          | 2000          |
|                          | 2            | Junta de Castilla y León | Lago de Sanabria  | 83               | 2001          | 2001          |
| Cálculo del valor umbral | 5            | Dig. Ort. 2000*          | Sierra de Ancares | 622              | 2000          | 2000          |
|                          | 3            | Dig. Ort. 2000*          | Sierra de Ancares | 394              | 2000          | 2001          |
| Validación               | 8            | Dig. Ort. 1997*          | Sierra de Ancares | 921              | 1997          | 1997          |
|                          | 9            | Dig. Ort. 2000*          | Sierra de Ancares | 3419             | 2000          | 2000          |
|                          | 7            | Dig. Ort. 2000*          | Sierra de Ancares | 1933             | 2000          | 2001          |

\* Dig. Ort.: Digitalización en pantalla sobre ortofotografía digital (zona visible del espectro electromagnético) de Septiembre u Octubre del año correspondiente.

**Tabla 2:** Descripción de los polígonos utilizados en el estudio. Se muestra la fase en la que fueron utilizados, su número y su extensión (en ha), así como el año en que ocurrieron los incendios correspondientes y el año que fueron detectados en la cartografía.

## RESULTADOS

La media de los errores acumulados en la corrección geométrica de las imágenes fue de 20.1 m para las imágenes del sensor TM y de 11.8 m para las del sensor ETM+. Los mejores resultados para este último tienen su explicación en el uso de la banda pancromática. En ningún caso el error medio acumulado superó los 25m.

El análisis visual de la eficacia de los tres índices espectrales concluyó que el índice dNDVI no diferenciaba de manera nítida las áreas quemadas de otras zonas con vegetación escasa (roquedos y pastizales con poca biomasa). Mejor comportamiento mostraron los otros dos índices considerados, IAQ y dNBR, si bien el último discriminaba más nítidamente los contornos, por lo que fue seleccionado para fases sucesivas del estudio. Se plantearon cinco posibles valores para el umbral de detección en base a la bibliografía y los análisis previos para el índice dNBR: 100, 150, 200, 250 y 300 (el valor original se multiplicó por 1000 para facilitar los cálculos y la comprensión de los resultados). El valor umbral 200 fue seleccionado en base a la fiabilidad total, los errores de omisión y comisión (ver Tabla 3) y al criterio de primar bajos errores de comisión.

| Valor Umbral | Fiabilidad total (%) | Comisión (%) | Omisión (%) |
|--------------|----------------------|--------------|-------------|
| 100          | 81.26                | 22.88        | 3.01        |
| 150          | 88.38                | 15.29        | 6.92        |
| 200          | 88.81                | 9.93         | 13.72       |
| 250          | 85.14                | 6.30         | 25.29       |
| 300          | 79.43                | 3.90         | 40.94       |

**Tabla 3:** Determinación del valor umbral óptimo para el índice espectral dNBR. Se muestran expresados en porcentaje la fiabilidad total y los valores de omisión y comisión.

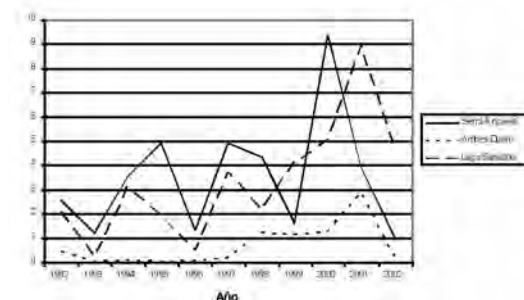
Los resultados de la validación de las cartografías generadas mediante las metodologías dNBR y DIF-COM-CLAS (Tabla 4) fueron aceptables y similares. dNBR fue más fiable y presentó menor error de omisión, por lo que la cartografía final fue generada siguiendo este método. En el caso de Arribes de Duero, el año 1995 presentó dificultades ya que la superficie identificada como quemada fue extraordinariamente grande (casi un 25% del espacio), por lo que ese año no fue considerado en posteriores análisis. La importante diferencia de hume-

dad con respecto al año anterior parece ser la razón de la identificación errónea de dehesas y campos de cultivo como zonas quemadas. De manera semejante, se clasificaron erróneamente como quemados los pastizales de montaña en Ancares los años 1995, 1998 y 2000. Puesto que los pastizales de montaña representan en ese espacio un bajo porcentaje de la superficie quemada en el período de estudio, se optó por eliminar los incendios identificados en esas zonas mediante una máscara definida a partir del Tercer Inventario Forestal Nacional (Junta de Castilla y León, en preparación).

|                      | dNBR  | DIF-COM-CLAS |
|----------------------|-------|--------------|
| Fiabilidad total (%) | 88.39 | 85.22        |
| Error Comisión (%)   | 10.09 | 9.14         |
| Error Omisión (%)    | 14.37 | 18.78        |

**Tabla 4.** Resultados de la validación de los resultados obtenidos al aplicar el índice dNBR y el método de cambio en las radiancias espectrales para la identificación de zonas quemadas.

El espacio de la Sierra de Ancares fue el más afectado por el fuego en el período de estudio (39784 ha, 40% del espacio), seguido por el Parque Natural del Lago de Sanabria donde ardieron 8124 ha (36% del espacio). En Arribes del Duero se quemaron 7579 ha (7% del espacio), una superficie significativamente menor. Estos resultados están en concordancia con el conocimiento previo del régimen de fuegos en cada zona, y dan una idea clara de la problemática situación en Ancares y Sanabria. En cuanto a la dinámica interanual de superficie quemadas (Figura 2), Arribes de Duero apenas



**Figura 2:** Porcentaje de la superficie de cada espacio quemada anualmente. Los datos están relativizados en función del número de días considerados entre dos imágenes consecutivas con el fin de minimizar las diferencias existentes entre las fechas de adquisición de las imágenes utilizadas.



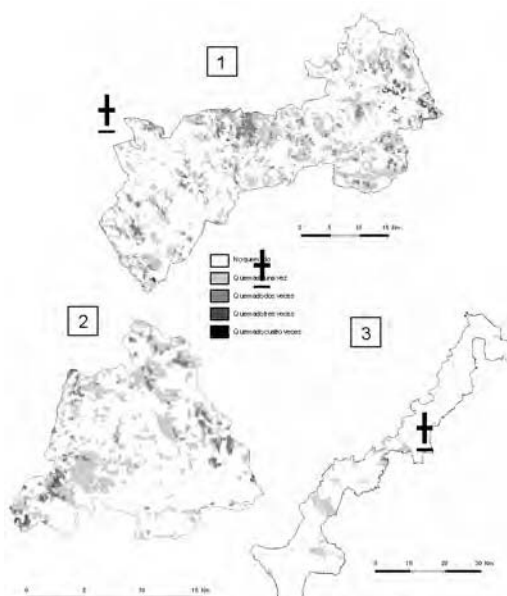
sufrió incendios en la primera mitad del período estudiado, experimentando después un aumento fuerte y significativo que alcanza su máximo en el año 2001, para volver a valores muy bajos en 2002. En cambio, para las zonas de Ancares y Sanabria, existe una dinámica muy variable, si bien se identifica una tendencia al aumento de la superficie quemada y a la existencia de ciclos de tres años (sería necesaria una serie de datos más larga para poder obtener conclusiones más fiables). Los años con mayor superficie quemada en Ancares fueron 1995, 1997 y 2000 mientras que la ocurrencia fue máxima en Sanabria durante los años 2000 a 2002.

A partir de los mapas anuales de ocurrencia de incendios se obtuvo un mapa de recurrencia para cada zona (Figura 3). La diferencia existente entre Arribes y los otros dos espacios también se observó al evaluar la frecuencia de las distintas clases del mapa de recurrencia de incendios. La recurrencia es menor en esa zona y tan sólo un 0.2% (Tabla 5) del parque ardió en dos ocasiones (recurrencia máxima) en la década estudiada. Por el contrario, Ancares y Sanabria obtuvieron datos similares, en torno al 5% de la superficie se quemó en dos ocasiones, el 0.5% en tres y un porcentaje menor ardió

cuatro veces (recurrencia máxima). La Figura 4 muestra el porcentaje de la superficie quemada un cierto año que se vuelve a quemar en años sucesivos. Los resultados identifican dos patrones temporales diferentes: (i) caracterizado por una recurrencia muy baja, se observó en el espacio de Arribes (tras siete años, tan sólo el 2.6% de las zonas afectadas por un incendio volvieron a arder); (ii) caracterizado por un aumento gradual de la probabilidad de recurrencia con el tiempo durante los tres años siguientes a un incendio, seguido por un drástico descenso el cuarto año para volver a repuntar el quinto año y comenzar, entonces, un descenso continuo. Este patrón se observó en Ancares y Sanabria, si bien se aprecian diferencias en el segundo y quinto año. En los siete años posteriores a un incendio, en torno al 18% de los píxeles quemados un año volvieron a arder en Ancares, y el 14% en Sanabria.

| Clase                                    | Ancares | Arribes | Sanabria |
|--|---------|---------|----------|
| No quemado                               | 67.17   | 93.06   | 69.91    |
| C1                                       | 26.62   | 6.74    | 24.90    |
| C2                                       | 5.51    | 0.20    | 4.77     |
| C3                                       | 0.69    | 0.00    | 0.41     |
| C4                                       | 0.02    | 0.00    | 0.01     |
| Total quemado                            |         |         |          |
| $C1+2 \times C2+3 \times C3+4 \times C4$ | 39.78   | 7.14    | 35.70    |

**Tabla 5:** Frecuencia de cada clase de recurrencia (veces que se ha quemado un píxel) en los tres espacios considerados para el período 1992-2002. Se muestran también los porcentajes de la superficie quemada acumulada (teniendo en cuenta la recurrencia de cada clase). Los porcentajes están referidos a la superficie total del espacio.



**Figura 3:** Mapas de recurrencia de los tres espacios naturales considerados en el estudio: Espacio Natural de la Sierra de Ancares (1), Parque Natural del Lago de Sanabria y alrededores (2) y Parque Natural de Arribes de Duero (3). La escala de colores muestra una gradación de tonos de grises desde las zonas no quemadas en blanco hasta las quemadas en 4 ocasiones en negro.

## DISCUSIÓN

### Cartografía de incendios

Las imágenes de los sensores TM y ETM+ son válidas para la generación de cartografías de incendios a escala regional. Las dos metodologías aplicadas obtuvieron buenos resultados en la validación, si bien los mapas de recurrencia parecen subestimar las clases más afectadas por el fuego (Gutiérrez, comunicación personal) debido a las limitaciones propias del método y las fuentes de datos. El método dNBR presentó alta fiabilidad y bajos errores por lo que fue utilizado para generar la cartografía definitiva. Es, además, un método más sistemático que DIF-COM-CLAS, pues este último utiliza una clasificación supervisada que

implica la creación de polígonos de entrenamiento. Esta característica es de suma importancia a la hora de crear productos derivados de una larga serie de datos, ya que permite ahorrar tiempo y, en cierta manera, homogeneiza el procedimiento seguido. No obstante, fue necesario realizar una calibración del método con el fin de definir el valor umbral más adecuado para la zona de estudio. Si bien la base teórica del índice espectral dNBR ya había sido aplicada para estudiar zonas quemadas (López García y Caselles, 1991; White et al., 1996), los primeros autores que definieron este índice como tal (Key y Benson, 1999) establecieron como umbral para la definición de zonas quemadas (Key y Benson, 2002) un valor que conlleva un alto error de comisión en nuestra zona de estudio. Los resultados obtenidos en este trabajo señalan, además, que sería deseable definir diferentes umbrales en función de la vegetación predominante y del tiempo transcurrido entre la ocurrencia del incendio y la toma de la imagen posterior que sirve para su detección. Sin embargo, eso implicaría disponer de gran cantidad de información, difícilmente accesible, y complicaría considerablemente el proceso de generación de la cartografía. La calibración del método es, por tanto, necesaria, y su diseño debe tener en cuenta la información disponible y los objetivos del estudio. El índice espectral dNBR, además de ser útil para la delimitación de incendios (Heredía et al., 2003), tiene como valor añadido su capacidad para estimar la severidad de los incendios, si bien no todos los estudios realizados al respecto concluyen que sea válido para ello. Así, Key y Benson (1999), van Wagendonk et al. (2004) y Cocke et al. (2005) encontraron una alta correlación entre la severidad obtenida por el índice espectral con datos de Landsat ETM+ (junto con AVIRIS en el tercer caso) y la severidad observada en el campo. En cambio, Roy et al. (2006) obtuvieron evidencias de lo contrario utilizando datos de los sensores Landsat y MODIS en zonas de diferentes características.

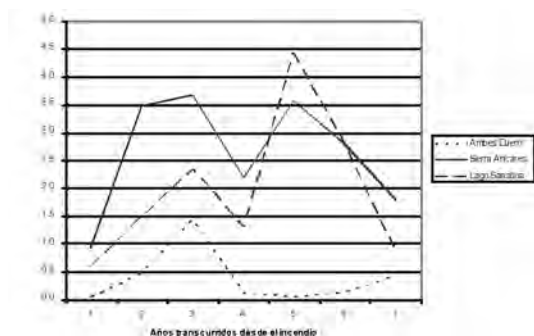
La ortofotografía digital fue una fuente de datos útil para la validación numérica de la cartografía de incendios. A pesar de no aportar tanta exactitud como la información derivada de sistemas GPS o del trabajo de campo, su resolución espacial (70 cm) permite delimitar perímetros con suficiente exactitud y menor coste. Su utilidad es mayor si se dispone de vuelos realizados en el final de la época de quema, pues es más probable encontrar incendios con límites nítidos.

Los resultados de la validación son similares a los obtenidos por Recondo et al. (2002) en Asturias (límitrofe con la Sierra de Ancares) para un período muy similar al aquí estudiado. Sus resultados muestran máximos de superficies quemadas para los veranos de 1995, 1997 y 2000, al igual que se desprende de la cartografía generada en este estudio para la zona de Ancares. Díaz-Delgado et al. (1998) obtuvieron mayores porcentajes de error, en especial para los incendios de menor extensión, si bien su zona y el período de estudio eran considerablemente mayores y su trabajo conllevó el uso de varios sensores con diferentes resoluciones espectrales, además de seguir metodologías diferentes a las aquí presentadas.

## Regímenes de fuego de los espacios naturales

La situación identificada por la cartografía concuerda con lo conocido *a priori* sobre las zonas de estudio. En el período considerado, la historia de fuego de Arribes de Duero estuvo influenciada por el rechazo de parte de la población a su declaración como espacio protegido en 2002, que hizo aumentar significativamente las zonas quemadas desde 1998 a 2001. Otro de los factores que explican esta situación es el abandono de tierras de cultivo, que sigue produciéndose y que conlleva el aumento de biomasa y de la continuidad espacial del combustible vegetal. El régimen de fuegos en esta zona es diferente al de los otros dos espacios considerados, por la menor recurrencia y extensión de las zonas quemadas. No se puede establecer una conclusión fiable sobre la dinámica de la recurrencia entre años, ya que, a pesar de que presenta un importante aumento después de tres años de un evento (Figura 4), este resultado está muy influenciado por una situación particular: dos incendios de grandes proporciones en 1998 y 2001 que afectaron a la misma zona (que representa el 50% del área con recurrencia para esa zona durante el período de estudio).

La similitud que existe entre las zonas de Ancares y Sanabria en vegetación, hábitats, topografía y elementos sociales que promueven la existencia de incendios deriva en similares regímenes de ocurrencia y recurrencia de fuegos. La dinámica de la recurrencia está caracterizada por un ciclo de cinco años, dentro del cual se diferencia otro subciclo de tres años seguido por un importante descenso de la



**Figura 4:** Dinámica interanual de la recurrencia para los siete años siguientes a un incendio. Se representan los porcentajes de la superficie quemada que se vuelve a quemar en años sucesivos.

probabilidad del suceso para el cuarto año. Este descenso puede ser debido a las dinámicas de regeneración vegetal post-incendio en la matriz del paisaje vegetal (brezal en ambos casos) y su percepción por parte de la población local, causante de la mayor parte de los incendios, que interpreta el estado de la vegetación para tomar la decisión de iniciar las quemaduras. Esa interpretación, basada en la cultura agrícola y ganadera de cada zona, parece ser la causa de las diferencias en el régimen de recurrencia en Ancares y Sanabria, en especial en lo correspondiente al segundo año tras una quema. A pesar de las similitudes entre las dos zonas, se han encontrado importantes diferencias en las superficies quemadas cada año. Particularidades locales parecen estar también detrás de las superficies relativas quemadas cada año en ambos espacios (Figura 3). En Ancares este parámetro sigue aproximadamente una dinámica trianual en la que un año con escasa superficie quemada es seguido por dos que superan significativamente al anterior. Se puede describir una dinámica similar en Sanabria para el período 1992-1998, pero a partir de este año se produce un aumento sostenido. Existe una relación entre la pluviometría estacional de un cierto año y la ocurrencia de incendios, si bien se han identificado excepciones. Así, los años con alta pluviometría en primavera, que favorece el aumento de biomasa, y lluvias escasas en verano conllevan un alto riesgo de incendio. Una situación de estas características tuvo lugar en Sanabria en 2001. En el caso de la Sierra de Ancares, se alcanzaron máximos en años secos, 1995 y 2000, pero en 1999, igualmente poco lluvioso, ardió una superficie significativamente menor que la media, probablemente

debido a que Septiembre fue más lluvioso de lo habitual.

Los resultados obtenidos podrían mejorarse si se pudiera disponer de más datos, en concreto de (i) imágenes tomadas en las mismas fechas o muy similares, cada año, que han de coincidir con el final de la principal temporada de quema y (ii) imágenes obtenidas en primavera. Esto permitiría delimitar con mayor precisión los incendios acontecidos en otoño e invierno y sería útil para mitigar posibles diferencias en la pluviometría entre años consecutivos, que derivan en errores en el producto final.

### Aplicaciones a la gestión del territorio

Cartografías de este tipo son una gran herramienta para el ámbito de la gestión del territorio por parte de las administraciones, tanto a nivel global para un mejor diseño de las políticas a seguir como a nivel local a la hora de implementar dichas políticas en los espacios naturales. En el ámbito de la investigación son igualmente muy válidas como fuente de datos para estudiar el patrón espacial de los incendios, así como sus causas y efectos ecológicos. Además, siguiendo la metodología dNBR, cabe la posibilidad de generar un producto que estime de la severidad de los eventos a partir de los valores del índice espectral. Para ello, sería necesario disponer de datos de campo que permitiesen identificar valores umbral del índice y validar el producto. Por último, se pueden derivar modelos espaciales que caractericen la vegetación, mejoren la identificación de zonas con riesgo de incendio y aporten información sobre la regeneración de las zonas afectadas. Además de estas potencialidades, hay que añadir la ventaja que supone su bajo precio, al ser comparado con otros métodos, a la hora de cartografiar fuegos en zonas de gran extensión o con complicada orografía.

### CONCLUSIONES

Los métodos de identificación de zonas quemadas considerados obtuvieron buenos resultados. El índice dNBR resultó ser el más adecuado. Para su aplicación fue necesario realizar una calibración del método con datos obtenidos de ortofotografías aéreas de alta resolución espacial. La elección de la



fecha de adquisición de las imágenes es un factor crítico a la hora de realizar este tipo de estudios.

Gracias a la cartografía generada fue posible describir el patrón espacial y temporal de los incendios en cada zona. Desde el punto de vista científico, este tipo de mapas son de gran utilidad para conocer el funcionamiento del sistema natural que rige la ocurrencia y recurrencia de incendios. Desde el punto de vista de la gestión del medio, son de gran interés como herramienta para identificar las zonas afectadas por los fuegos, caracterizar la dinámica del régimen de fuegos y delimitar las zonas con mayor recurrencia y, por tanto, riesgo.

Los resultados obtenidos diferencian claramente al espacio de Arribes de Duero de los otros dos considerados, en cuanto a la extensión y recurrencia de los eventos, y ponen de manifiesto la urgente necesidad de afrontar el problema de los incendios en Sanabria y Ancares para preservar su patrimonio natural.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, mediante el proyecto de investigación REN2002-04463-C02-01. Los autores agradecen la colaboración prestada por Dr. Díaz-Delgado (CSIC- Estación Biológica de Doñana), por Edyta Wozniak (INDUROT) y por el personal de los parques naturales del Lago de Sanabria y alrededores y de Arribes de Duero, así como del Espacio Natural de la Sierra de Ancares. Igualmente queremos agradecer a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León la información suministrada.

## BIBLIOGRAFÍA

- BAKER, W. L., 1992. Effects of Settlement and Fire Suppression on Landscape Structure. *Ecology*, 73, 1879-1887.
- CALLE, A., CASANOVA, J. L. y ROMO, A., 2005. An integrated system for fire detection and monitoring, in real time, using MSG and MODIS data. En De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. & Chuvieco, E. (Eds.), *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*, 153-156. Universidad de Zaragoza.
- CHAVEZ, P. S., JR., 1996. Image-based atmospheric corrections- revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9): 1025-1036.
- COCKE, A. E., FULÉ, P. Z. y CROUSE, J. E., 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 189-198.
- DÍAZ-DELGADO, R., SALVADOR, R., VALERIANO, J. y PONS, X., 1998. Detección de superficies forestales quemadas en Cataluña mediante imágenes de satélite durante el período 1975-1995. Aplicación para la caracterización del régimen de incendios y los procesos de regeneración de la vegetación. *Serie Geográfica*, 7: 129-138.
- FERNÁNDEZ, A., ILLERA, P. y CASANOVA, J. L., 1997. Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*, 60(2): 153-162.
- GILABERT, M.A., CONESE, C. y MASELLI, F., 1994. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 2065-2086.
- HALL, F.G., STREBEL, D.E., NICKESON, J.E. Y GOETZ, S.J., 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35:11-27.
- HEREDIA LACLAUSTRA, A., MARTÍNEZ SÁNCHEZ, S., CHUVIECO SALINERO, E., PIÑEROS, W. y QUINTERO, E., 2003. Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 3: 216-234.
- KEELEY, JON E. & FOTHERINGHAM, C. J. (2001) Historic Fire Regime in Southern California shrublands. *Conservation Biology*, 15 (6), 1536-1548.
- KEY, C. H. y BENSON, N. C., 1999. Measuring and remote sensing of burn severity. In L. F. Neuenschwander, & K. C. Ryan (Eds.), *Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop*, vol. II (p. 284). Moscow, ID: University of Idaho and International Association of Wildland Fire.

- KEY, C. H. y BENSON, N. C., 2002. Remote sensing measure of severity, the normalized burn ratio. *Fire effects monitoring and inventory protocol, Landscape Assessment*. Systems for Environmental Management and USDA Fire Sciences Laboratory, Rocky Mountain Research Station.
- LÓPEZ GARCÍA, M. J. y CASELLES, V., 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 1, 31-37.
- LOZANO, F. J., SUÁREZ-SEOANE, S. y LUIS, E., 2006. Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modeling. *Remote Sensing of the Environment*, in press.
- MARKHAM, B. L. y BARKER, J. L., 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. *EOSAT Landsat Technical Notes* (1) 3-8.
- MARTÍN, M. P. y CHUVIECO, E., 1995. Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios a partir de imágenes de satélite. *Ecología*, 9: 9-21.
- MARTÍN, M. P. y CHUVIECO, E. 1998. Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica*, 7: 109-128.
- MARTÍNEZ, B., MELIÁ, J., SAN-MIGUEL-AYANZ, J. y BARBOSA, P., 2002, An optimized burned area detection method based on the GESAVI. En Viegas X. (ed.) *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, 2002 Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.
- MORAN, M. S., JACKSON, R. D., SLATER, P. N. Y TEILLET, P. M., 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41: 169-184.
- QUINTANO, C., FERNÁNDEZ-MANSO, O., FERNÁNDEZ-MANSO, A. y SHIMABUKURO Y. E., 2005. Mapping burned areas and estimating fire severity by means of spectral mixture and object oriented image analysis from an unitemporal perspective. En De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. & Chuvieco, E. (Eds.), *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*, 193-197. Universidad de Zaragoza.
- PALÁ, V. y PONS, X., 1995. Incorporation of relief into geometric correction based on polynomials. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61 (7), 935-944.
- PONS, X., 2002. *MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing software*. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra. ISBN: 84-931323-5-7.
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J. y AGUADO, I., 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol 41, No. 5: 1056-1061.
- RECONDO GONZÁLEZ, C., PÉREZ MORAN-DEIRA, C.S. y WOZNIAK, E., 2002. Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el período 1991-2001 a partir de imágenes Landsat TM. *Revista de Teledetección*, 18: 47-55.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. y DEERING, D. W., 1973 Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Third ERTS Symposium, NASA SP-351, vol. 1*, pp.309-317.
- ROY, D.P., BOSCHETTI, L. y TRIGG, S., 2006. Remote Sensing of Fire Severity: Assessing the performance of the Normalized Burn Ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3:112-116.
- TEILLET, P.M., GUINDON, B., y GOODE-NOUGH, D.G., 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing* Vol 8: 84-106.
- VAN WAGTENDONK, J. W., ROOT, R.R. y KEY, C. H., 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of the Environment*, 92: 397-408.
- VÉLEZ, R., 2000. Los incendios forestales en la Cuenca Mediterránea. En Vélez, R. (Ed.), *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. 3.1-3.15. McGraw Hill. ISBN: 8448127420.
- WHELAN, R. J., *The ecology of fire*. Cambridge studies in ecology. Cambridge University Press. ISBN 0521328721.
- WHITE, J. D., RYAN, K. C., KEY, C. C. y RUNNING, S. W., 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6, 125-136.