

## SEGUIMIENTO DE LA REGENERACIÓN VEGETAL POST- INCENDIO MEDIANTE EL EMPLEO DEL NDVI.

R. Díaz-Delgado(\*) y X. Pons(\*\*)(\*).

[rdiaz@creaf.uab.es](mailto:rdiaz@creaf.uab.es)

(\*) *CREAF. Facultat de Ciències-Universitat  
Autònoma de Barcelona. Bellaterra, 08193.  
Barcelona. Spain*

(\*\*) *Departament de Geografia. Universitat  
Autònoma de Barcelona. Bellaterra, 08193.  
Barcelona. Spain*

### RESUMEN

En el presente trabajo se presenta una primera aproximación metodológica para evaluar el proceso de regeneración vegetal después del fuego a través de la teledetección. Diez áreas quemadas fueron seleccionadas y las variaciones del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) analizadas a lo largo del periodo posterior al incendio. El objetivo principal del estudio fue reconocer los diferentes patrones de regeneración de cada zona afectada. Varios parámetros, como la precipitación, la litología, la pendiente, la orientación, la estrategia de regeneración etc., fueron empleados para analizar las posibles relaciones con el proceso de restablecimiento. Algunas de estas variables mostraron un efecto significativo sobre el tiempo de regeneración, si bien deben completarse los resultados mediante el aumento de la muestra considerada.

### ABSTRACT

In this paper we present a first approach to evaluate the plant regeneration processes after wildfires. Ten burnt areas were selected and their NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) variations were monitored throughout the post-fire period. The main objective was to recognise the different regeneration patterns of each burnt area. Several variables (such as the amount of rain, lithology, slope, aspect, etc.) were considered in order to analyse their possible relationships with the recovery process. Some of these variables showed a significant effect over the regeneration time, although further analyses seem still needed.

**Palabras clave:** Señal post-incendio, historia de fuegos, NDVI, regeneración.

### INTRODUCCIÓN

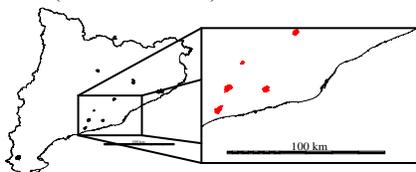
Los incendios en ecosistemas mediterráneos tienen diversos efectos sobre la vegetación como consecuencia de la gran complejidad que presentan las comunidades vegetales y de la interferencia ejercida por el pastoreo, el aclareo y las actividades de quema, aunque también debido a las diferentes respuestas de la vegetación al tipo de intensidad de cada fuego, la estación del año en la que tuvo lugar y la frecuencia de quema (Le Houerou, 1973). Estos elementos y sus combinaciones se conocen como el régimen de incendios de un determinado lugar (Gill 1975). En este sentido, la detección de áreas quemadas posee un valor considerable de cara a determinar la ocurrencia de incendios (Johnson y Gutsell 1994). Diferentes técnicas son empleadas para identificar, datar y describir la historia de fuegos de una región determinada. Entre ellos, la detección de la señal post-incendio generada por el fuego y la dendrocronología han sido bastante empleadas (Minnich 1983; Christensen 1993). Desde hace varias décadas, la teledetección (incluyendo la fotointerpretación) han ayudado a los ecólogos del fuego y gestores a localizar geográficamente tanto incendios antiguos como fuegos activos y por lo tanto obtener la frecuencia y extensión de tales fuegos.

Salvador *et al.* (1997) desarrollaron un método semiautomático para la detección de áreas forestales quemadas en Cataluña durante un periodo de 19 años (1975-93). La metodología se basa en la resta del NDVI (Mather 1987) obtenidas a partir de una serie temporal de imágenes del sensor MSS, embarcado en los satélites Landsat desde 1972. Los resultados fueron contrastados con los inventarios de incendios disponibles de la administración (Díaz-Delgado *et al.* 1997). Una vez delimitados los perímetros de los fuegos, la gran cantidad de imágenes adquiridas permitió efectuar un seguimiento de los cambios del NDVI a lo largo del tiempo en algunas de las áreas quemadas. Algunos científicos han comenzado a emplear el NDVI como indicador de la tasa de recuperación de las comunidades vegetales después del fuego (Viedma *et al.* 1997). La idoneidad del NDVI para este tipo de estudios puede deberse a la respuesta general del índice a la cantidad de biomasa verde presente en la zona independientemente de las especies vegetales que conforman la comunidad (Blackburn y Milton 1995; Gamon *et al.* 1995). Además, la respuesta del NDVI se satura cuando la vegetación alcanza el 100% de recubrimiento, lo que le habilita fundamentalmente, para seguir los estadios iniciales de la recuperación vegetal después de severas perturbaciones como los incendios forestales.

En el presente trabajo se examina la variabilidad de las respuestas de la vegetación al fuego. Para ello se analizan las tasas de recuperación de diferentes comunidades vegetales mediterráneas localizadas en diversas áreas de Cataluña. Este estudio preliminar pretende ajustar varios modelos a las dinámicas de regeneración seguidas mediante la respuesta del NDVI y analizar la influencia de ciertos parámetros ambientales sobre tales dinámicas.

#### Área de estudio y selección de zonas

Cataluña tiene un área de 3 millones de ha de las que dos tercios se clasifican como vegetación "natural" y de la cual un tercio se considera cubierta arbórea (Boada *et al.* 1991).



**Figura 1:** Localización de las áreas quemadas seleccionadas para el estudio de regeneración.

Diez áreas detectadas como quemadas por la metodología citada fueron seleccionadas de las áreas de vegetación natural (ver Figura. 1). Se escogieron distribuidas de forma dispersa atendiendo a diferentes criterios que se exponen a continuación (en orden de importancia): (1) todas las áreas ardieron sólo una vez. (2) Las diez áreas comprenden diferentes substratos litológicos, los cuales están íntimamente vinculados con los procesos de génesis de los suelos (Alcañiz *et al.* 1996). A su vez, el substrato condiciona el tipo de comunidades sucesionales a establecerse sobre él y determina el nivel de exposición a los agentes erosivos (Chandler *et al.* 1983). (3) Fueron distribuidas a lo largo del gradiente de precipitación que aumenta de Sur a Norte y del NO interior al SE (ICC, 1996). Además, algunas variables físicas como la pendiente, la orientación, y la altitud se incluyeron en el análisis.

#### METODOLOGÍA

Un total de 120 imágenes de los satélites Landsat MSS (resolución espacial 79 x 59 m) fueron adquiridas cubriendo el periodo 1975-1993. Se aplicaron las correcciones geométricas y radiométricas a las escenas completas (Pons y Solé, 1994; Palá y Pons, 1995). Debido a las importantes diferencias radiométricas entre imágenes de diferentes décadas, se practicó una normalización final basada en áreas invariantes (Salvador *et al.*,

1997). Las bandas 2 y 4 se emplearon para calcular las imágenes de NDVI. La ecuación 1 muestra la forma de calcular el valor de NDVI para cada píxel (Mather, 1987):

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad (-1 \leq NDVI \leq 1)$$

donde  $\rho$  es la reflectancia de cada píxel en los canales rojo (R) e infrarrojo (IR).

Para conocer los detalles de la metodología de detección de zonas quemadas ver Salvador *et al.* (1997) y Salvador y Pons (1996). En algunos casos las fechas de los incendios no pudieron ser exactamente determinadas y se ofrece el intervalo de tiempo entre las fechas de la imagen anterior y la posterior en las que ocurrió el fuego. El resto de fechas definitivas se obtuvieron de los inventarios de la administración.

Se establecieron zonas testigo adyacentes a cada zona quemada analizada. Estas áreas presentaban similar composición florística de las comunidades vegetales y un comportamiento fenológico previo al fuego correlacionado significativamente con el de las zonas quemadas.

Las medias de los valores de NDVI de las zonas quemadas y las control fueron analizadas a lo largo del tiempo. Además, el cociente entre medias de ambas áreas,  $Q_{NDVI}$ , fue también empleado (ecuación 2).

$$Q_{NDVI} = \frac{NDVI \text{ fuego}}{NDVI \text{ control}} \quad (2)$$

Una vez calculado el  $Q_{NDVI}$ , los valores de todas las imágenes después del fuego se emplearon para el ajuste de un modelo de regresión logarítmico con objeto de determinar las tasas de regeneración:

$$Q_{NDVI} = \alpha + \beta \log(t - \gamma) \quad (3)$$

donde  $Q_{NDVI}$  corresponde al cociente definido en la ecuación 2,  $\alpha$  y  $\beta$  son los coeficientes aditivo y multiplicativo respectivamente,  $t$  es el tiempo transcurrido en días y  $\gamma$  es un término relacionado con el momento del comienzo teórico del proceso de regeneración.

Las variaciones fenológicas del área quemada previas al fuego se emplearon para el cálculo del intervalo de variación típico de cada comunidad sin perturbación. Se utilizaron la media y la SD pre-incendio del  $Q_{NDVI}$ . El periodo mínimo de regeneración disponible en todas las series analizadas, 2544 días después del fuego en las series 4 y 5 (ver Figura 2) fue usado como referencia para la comparación de la dinámica de las 10 áreas estudiadas a partir de la distancia entre el valor de  $Q_{NDVI}$  alcanzado y el valor medio pre-incendio.

Finalmente, ciertas variables consideradas como posibles factores de influencia en la recuperación vegetal fueron analizadas. Pendientes y orientaciones se extrajeron del modelo digital de elevaciones de Cataluña (resolución espacial de 45 m). La precipitación media anual y el régimen de lluvias a partir del Atlas Climàtic de Catalunya (ICC, 1996). La información litológica fue obtenida a través del Mapa Geològic de Catalunya (ICC, 1989). Se efectuó un análisis de correlación entre los niveles de regeneración alcanzados por cada zona a  $t=2544$  y los parámetros mencionados.

## RESULTADOS

La figura 2 muestra los cambios de  $Q_{NDVI}$  en comparación con el valor medio previo al fuego. El área 6 puede considerarse como totalmente recuperada en el periodo estudiado, ya que alcanza el intervalo de variación previo. Las áreas 2 y 4 presentan el mínimo nivel de recuperación en  $t=2544$  días. Por otro lado, después de 2544 días, áreas como la 6, e incluso la 9, se encuentran muy próximas al valor medio previo de  $Q_{NDVI}$ . Se obtuvieron unos altos coeficientes de determinación ( $R^2$ ), lo que sugiere la validez del modelo logarítmico empleado. Sin embargo, no se obtuvo ninguna correlación entre los valores de  $Q_{NDVI}$  a  $t=2544$  días y los parámetros ambientales analizados.

No obstante, resulta posible diferenciar claramente entre las respuestas al incendio. Por ejemplo, el área 2 muestra una muy lenta regeneración (distancia a  $t2544=0.4$ ), debido al tipo de comunidad previa al fuego (un bosque de *Pinus nigra*), cuya estrategia regenerativa es a través de semilla de forma obligada sin capacidad de rebrote. Una respuesta similar se da en el área 4 (distancia a  $t2544=0.47$ ), cubierta previamente por un bosque abierto de *Pinus halepensis*. Comunidades dominadas por alcornoque (área 9, con  $t2544=0.17$  y  $0.07$  respectivamente) se encuentran muy próximas al intervalo previo de variación de NDVI.

## DISCUSIÓN

A pesar de la aparente validez de la técnica empleada, los resultados no muestran una relación entre los parámetros ambientales y la dinámica de regeneración de cada zona estudiada. El pequeño número de la muestra impidió encontrar relaciones bivariantes.

Sin embargo, resulta interesante emplear el intervalo previo de variación estacional en estudios similares ya que sirve de referencia para determinar el nivel esperado de regeneración a alcanzar. Este aspecto puede ofrecer otra perspectiva en estudios basados en crono-secuencias de recubrimiento

después del fuego (Gracia y Sabaté, 1996).

A la vista de los resultados, parece que el uso del NDVI es adecuado para el seguimiento del proceso de regeneración. Los modelos de regresión logarítmica ofrecen buenos ajustes a las diferentes respuestas regenerativas. La comparación de tasas de recuperación entre áreas no pudo ser correlacionada con ningún parámetro ambiental considerado en el estudio por lo que se precisa una ampliación de la muestra.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcañiz, J. M., Serrasolsas, I. y Vallejo, R. 1996. Efectes dels incendis forestals sobre el sòl. In: *Ecologia del foc*, pp. 162-172. Ed. Proa, Barcelona.
- Blackburn, G. A. y Milton, E. J. 1995. Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *International Journal of Remote Sensing* 16: 709-720.
- Boada, M., Calbet, F. y Cañadas, F. 1991. *Arbres de Catalunya*. Generalitat de Catalunya (ed.), Barcelona.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud L. y Williams, D. 1983. *Fire in Forestry. Volume I*. John Wiley & Sons (eds.), New York.
- Christensen, N. L. 1993. Fire Regimes and Ecosystem Dynamics. In: P.J. Crutzen y J. G. Goldammer (eds.). *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric, and Climate Importance of Vegetation Fires*. John Wiley & Sons, New York.
- Díaz-Delgado, R., Salvador, R., Valeriano, J. y Pons, X. 1997. Resultados y valoración estadística de un método automático de detección de superficies forestales quemadas en Cataluña (periodo 1975-1993). In: C. Hernández y J. E. Arias (eds.). *Proceedings del Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 215-218, Santiago de Compostela.
- Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, A. E., Joel, G., Peñuelas, J. y Valentini, R. 1995. Relationships between NDVI, canopy, structure and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications* 5: 28-41.
- Gill, A. M. 1975. Fire and the Australian Flora: a review. *Australian Forestry* 38:4-25.
- Gracia C. y Sabaté, S. 1996. Canvis en l'estructura de la vegetació. In: *Ecologia del foc*, pp. 162-172. Ed. Proa, Barcelona.
- ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya). 1989. *Mapa Geològic de Catalunya*. Escala 1:250.000, Barcelona.
- ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya). 1997. *Atlas Climàtic de Catalunya*. Barcelona.
- Johnson, E. A. y Gutsell S. L. 1994. Fire frequency models, methods and Interpretations. *Advances in Ecological Research* 25:239-287.

Le Houerou, H. N. 1973. Fire and vegetation in Mediterranean basin. *Proceedings of 13<sup>th</sup> Annual Tall Timber Fire Ecology Conference* 13: 237-277.

Mather, P. M. 1987. *Computer processing of remotely sensed images*. John Wiley & Sons (eds.), New York.

Minnich, A. M. 1983. Fire mosaics in Southern California and Northern Baja California. *Science* 219: 1287-1294.

Pons X. y Solé-Sugrañes. L. 1994. A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 48, 191-204.

Palà, V. y Pons, X. 1995. Incorporation of relief into geometric correction based on polynomials. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 7: 935-944.

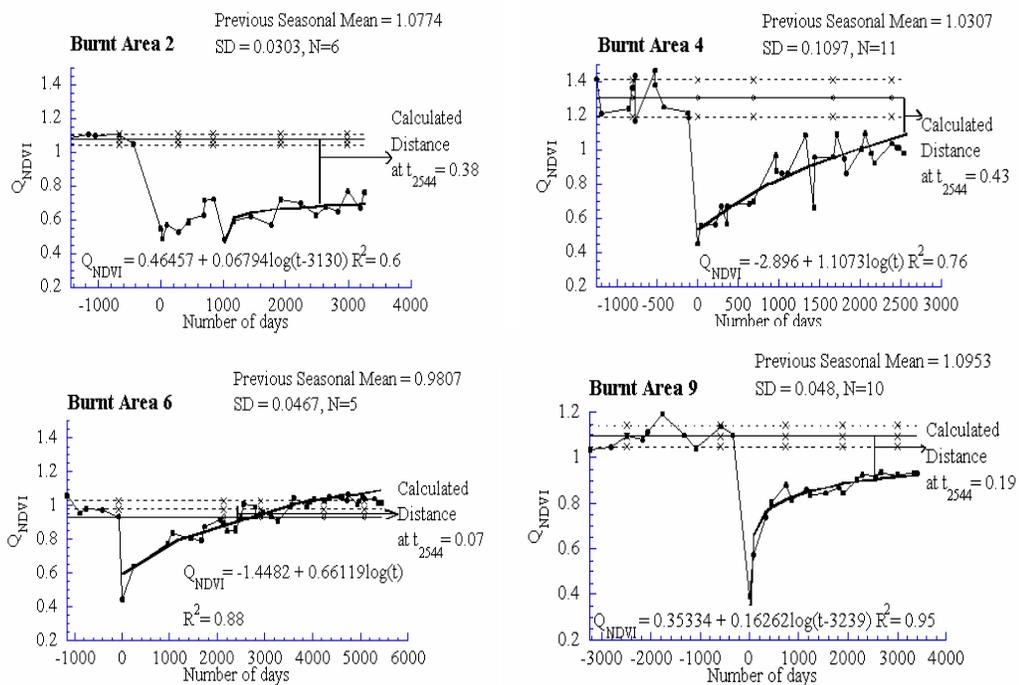
Salvador, R. y Pons, X. 1996. Analysis of the discrimination of burnt sites temporal evolution in a Mediterranean area. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 4: 159-169.

Salvador R., Pons X., Valeriano, J., Romeu J. y Palà V. 1997. Un método de análisis de los incendios ocurridos en Cataluña durante el periodo 1975-1993 mediante imágenes de satélite. In: C. Hernández y J. E. Arias (eds.). *Proceedings del Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 212-214, Santiago de Compostela.

Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D. y García-Haro, J. 1997. Modelling rates of ecosystem recovery after fires by using Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 61: 383-398.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a Francisco Lloret (CREAF) su contribución y supervisión al estudio, al DARP, Generalitat de Catalunya por los datos estadísticos aportados. Este proyecto ha sido financiado por la CICYT AMB94-0881, y el proyecto LUCIFER EC y una beca del Ministerio de Educación y Cultura a Ricardo Díaz-Delgado.



**Figura 2:** Algunas de las zonas analizadas y los cambios de  $Q_{NDVI}$  a lo largo del tiempo. Se muestran también los modelos logarítmicos ajustados a los valores observados en las imágenes post-incendio y la distancia calculada a la media estacional previa.