

Combinación de NDVI y temperatura de superficie para la estimación del contenido de humedad de los combustibles en la valoración del peligro de incendios forestales

D. Cocero y E. Chuvieco
david.cocero@uah.es

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. C/ Colegios 2. 28801, Alcalá de Henares, Madrid

RESUMEN

En este trabajo se presenta un método operativo en el que se emplean imágenes de teledetección para estimar el contenido de humedad de la vegetación en diversas especies mediterráneas. Los resultados muestran relaciones bastante consistentes, lo que hace posible su aplicación operativa por parte de los servicios forestales encargados de la lucha contra los incendios.

PALABRAS CLAVE: Teledetección, incendios forestales, humedad de la vegetación, NOAA-AVHRR.

ABSTRACT

This paper presents an operative method in which remote sensing images are used to estimate fuel moisture content from several Mediterranean species. The results show consistent relationships that will enable fire-fighting authorities to apply this method.

INTRODUCCIÓN

La reducción de los severos impactos medioambientales causados por los incendios forestales requiere de mejores medios a la hora de estimar las condiciones de peligro de incendio. La mayor parte de las investigaciones que utilizan las técnicas de teledetección en las aplicaciones sobre incendios forestales se han centrado en detectar fuegos activos, usando principalmente imágenes del infrarrojo medio (Ahern *et alii.* 2001, Martín *et alii.* 1999). En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre cartografía de áreas quemadas, a escalas locales y globales (Barbosa *et alii.* 1999, Koutsias *et alii.* 1999). Sin embargo, no son tan abundantes los trabajos encaminados al estudio de la fase anterior al momento en el que se produce un incendio, período que es crítico para poder utilizar correctamente los recursos dedicados a la supresión del fuego, para reducir las posibles igniciones y para mitigar la propagación de los incendios. Dentro de este ámbito, las herramientas que nos proporciona la teledetección pueden ser de gran ayuda para rea-

lizar una caracterización de los combustibles forestales, en lo que se refiere a las cargas de biomasa y a sus propiedades estructurales (normalmente definidas mediante los tipos de combustible: Deeming 1975, Riaño *et alii.* 2002), por un lado, y a su estado hídrico, por el otro. El estudio de este último apartado será la base de nuestro trabajo.

Varios autores han demostrado que la cantidad de agua contenida en los tejidos de las plantas es una variable crítica en los modelos de ignición y de propagación del fuego (Van Wagner 1967, Viney 1991). En la bibliografía sobre peligro de incendios forestales, el contenido de agua se expresa normalmente como "Fuel Moisture Content" (FMC), que se define como el porcentaje de humedad sobre el peso seco de la muestra:

$$FMC = \left(\frac{Ph - Ps}{Ps} \right) * 100$$

donde Ph es el peso húmedo y Ps el peso seco de la misma muestra. Esta variable se obtiene principalmente a través de trabajo de campo, usando méto-

dos gravimétricos (las muestras húmedas se secan en una estufa a 60 o 100°C: Viegas *et alii.* 1992), pudiéndose referir el FMC a especies vivas o muertas. El último caso es el que está más relacionado con la ignición de un incendio, puesto que los combustibles muertos están generalmente más secos que los combustibles vivos. Sin embargo, el FMC de las plantas vivas también es un factor crítico en los modelos de propagación del fuego, puesto que son ellas las que proporcionan la carga de biomasa más alta para propagar los incendios. En este trabajo, nosotros nos centraremos en la estimación del FMC para especies vivas, puesto que el dosel vegetal normalmente impide la visión mediante sensores remotos de los materiales muertos que quedan en el suelo del bosque.

La estimación del FMC mediante teledetección ha sido llevada a cabo con éxito para especies herbáceas con datos NOAA-AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer*) usando series multitemporales de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), pero no ha sido tan satisfactoria para matorrales y arbolado (Ceccato *et alii.* 2001, Chuvieco *et alii.* 1999, Leblon 2001, Paltridge y Barber 1988). Además, recientemente diversos modelos físicos han demostrado que el NDVI no es un buen indicador del FMC, puesto que está severamente influenciado por otras variables que no están relacionadas con el contenido de agua (Ceccato *et alii.* 2001, Ceccato *et alii.* 2002). Asimismo, estos estudios han mostrado que el FMC no puede estimarse directamente a partir de medidas de reflectividad, sino que debe usarse el “*Equivalent Water Thickness*” (EWT: contenido de agua por superficie de la hoja), que está directamente relacionado con la absorción de agua en las longitudes de onda del infrarrojo medio de onda corta (SWIR). Sin embargo, el EWT es bastante complejo de medir de manera operativa en el campo, lo que no ocurre con el FMC, a lo que hay que añadir que el EWT no se emplea en la bibliografía sobre incendios forestales, lo que hace muy difícil su utilización en la estimación del peligro de incendio. De cualquier modo, asumiendo una relación constante entre el área y el peso de la hoja dentro de cada especie, el FMC puede estimarse mediante medidas de reflectividad cuando la estimación se restringe a esa especie.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es presentar un método empírico que se pueda emplear por los gestores en la lucha contra los incendios forestales para estimar el FMC de los pastizales y de las especies arbustivas mediterráneas basándonos en un análisis multitemporal de datos NOAA-AVHRR. El método está fundado en medidas de FMC realizadas en el campo durante varios años, y se basa en compuestos multitemporales de NDVI y de temperatura de superficie (TS). Las ecuaciones obtenidas en el área de estudio original se han verificado en varias regiones españolas con especies similares, proporcionando una buena estimación del FMC, por lo que pensamos que es posible su aplicación operativa por los servicios forestales encargados de combatir los incendios.

MÉTODOS

Se han llevado a cabo mediciones de FMC en campo desde principios de abril hasta finales de septiembre entre los años 1996 y 2001 en el Parque Nacional de Cabañeros, con el fin de calcular el modelo (datos de 1996 a 1999) y validarlo (datos del 2000 y del 2001). Además, se recogieron muestras de vegetación con el mismo protocolo en otras regiones de España durante el año 2001. Las parcelas están bastante distantes de la localización original del estudio (figura 1), y poseen elevaciones diferentes. Sin embargo, presentan especies similares, que forman parte del ecosistema mediterráneo. En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos para pasto y para *Cistus ladanifer*, uno de los arbustos más extensamente extendidos por la cuenca mediterránea.

Las muestras de vegetación recogidas en el campo estaban compuestas por las hojas y por las ramillas laterales y terminales en el caso de la jara, mientras que se extrajo la planta entera (excepto las raíces) para las especies herbáceas. Se recogían tres muestras por especie y parcela cada 8 días entre las 12 y las 16 horas GMT, calculándose los valores medios de FMC por cada día y parcela.

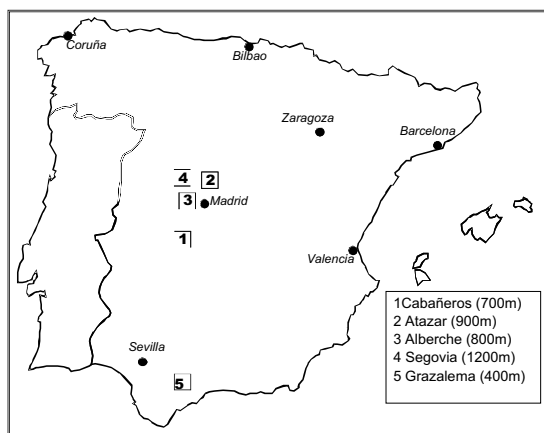


Figura 1. Localización de las parcelas utilizadas en el estudio.

Las imágenes NOAA-AVHRR empleadas en el trabajo fueron adquiridas por la estación receptora HRPT de la Universidad de Alcalá. La conversión de los valores digitales brutos a reflectividades se basó en los coeficientes NOAA (incluyendo los ratios de degradación), mientras que el cálculo de la temperatura de superficie está basada en los métodos propuestos por Coll y Caselles (1997). La corrección geométrica se basó en modelos orbitales y el ajuste multitemporal se realizó mediante puntos de control manuales y correlación automática. Los datos diarios se sintetizaron en compuestos de ocho días usando los valores máximos de NDVI, y extrayendo de cada compuesto el valor de la mediana de una ventana de 3x3 píxeles para correlacionarlo con las medidas de campo.

Los ajustes empíricos se basaron en análisis de regresión lineal. El modelo se calculó a partir de 88 observaciones para cada especie (pastizal y *Cistus ladanifer*) adquiridas durante cuatro años (1996 a 1999), abarcando las condiciones de primavera y verano. Las variables independientes consideradas fueron el NDVI (puesto que la disminución del contenido de agua influye también en la actividad clorofílica en las plantas herbáceas) y la TS (basándonos en las relaciones probadas entre proporciones de evapotranspiración y temperatura de la planta). Adicionalmente, se incluyó una variable temporal basada en el día Juliano (DJ), con el fin de tener en cuenta las tendencias estacionales en el FMC.

RESULTADOS

Las condiciones tan diversas, tanto fisiológicas como de valores de FMC, de los pastizales y de las especies arbustivas aconsejaron calcular dos ecuaciones empíricas diferentes:

$$\text{FMC pasto} = 155,439 + 452,43 * \text{NDVI} - 1,627 * \text{TS} - 0,747 * \text{DJ}$$

para los pastizales, con un coeficiente de determinación (r^2) de 0,652 ($p < 0,001$), y

$$\text{FMC jara} = 188,553 + 74,168 * \text{NDVI} - 2,011 * \text{TS} - 0,221 * \text{DJ}$$

para *Cistus ladanifer*, con un $r = 0,623$ ($p < 0,001$). En ambos casos, el NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, la TS es la temperatura de superficie y DJ es el día juliano.

La validación de estas ecuaciones se realizó con otros periodos (años 2000-2001) en el mismo área de estudio (Cabañeros), y en localizaciones adicionales (Sierras de Segovia y Ávila, áreas del río Alberche y del Embalse de El Atazar en Madrid, Sierra de Grazalema en Cádiz) con buenos resultados en todos los casos. Las figuras 2 y 3 muestran los valores observados y predichos para ambos tipos de vegetación en las diferentes regiones estudiadas.

Los coeficientes de determinación obtenidos fueron de 0,85 para los pastizales y de 0,74 para *Cistus ladanifer*, mezclando los datos de tres regiones diferentes. Los datos del Alberche-Atazar, Segovia-Ávila y Cabañeros se incluyeron para los pastizales, y los de Cabañeros, Grazalema y Alberche-Atazar para *Cistus ladanifer*. A pesar de estar situadas a muchos kilómetros unas de otras, el modelo muestra una capacidad de predicción similar en las diferentes zonas de estudio.

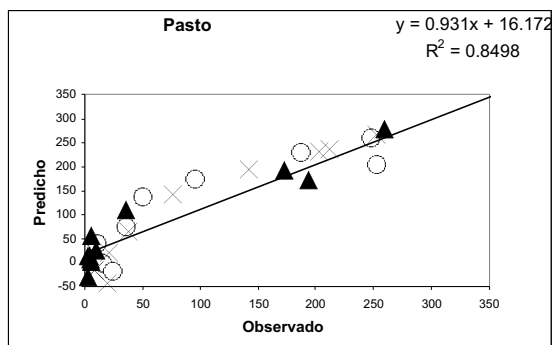


Figura 2. Valores observados y predichos para los pastizales: Δ Cabañeros; \circ Alberche-Atazar; \times Segovia-Ávila.

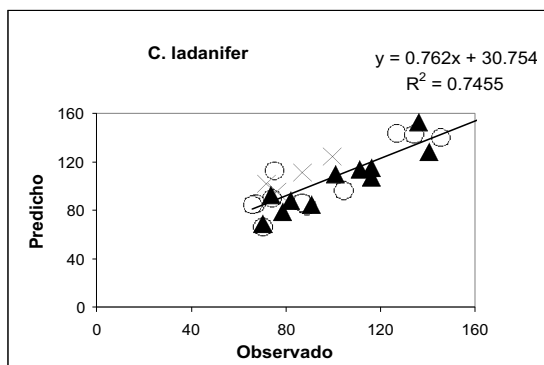


Figura 3. Valores observados y predichos para *Cistus ladanifer*. Δ Cabañeros; \circ Alberche-Atazar; \times Grazales.

DISCUSIÓN

El modelo empírico generado a partir del NDVI, la TS y el día juliano muestra un poder de predicción consistente para estimar el FMC de los pastizales y de *Cistus ladanifer*, especie típica de arbusculo mediterráneo. El modelo se validó en parcelas localizadas a varios cientos de kilómetros las unas de las otras, y con rangos de elevación diferentes. Por consiguiente, estimamos que el modelo podría servir como base para ser utilizado en escenarios operativos por los servicios forestales que se encargan de la lucha contra los incendios

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología a través del proyecto FIRERISK (AGL2000-0842-C04-01), y por la Comisión de la Unión Europea a través de los proyectos MEGAFIRES, INFLAME Y CONTROL-FIRE-SAT. No hubiera sido posible llevarlo a cabo sin el trabajo de campo realizado por los miembros del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, del Instituto de Economía y Geografía del CSIC y del Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba. Asimismo, las autoridades del Parque Nacional de Cabañeros nos han dado todas las facilidades para llevar a cabo el trabajo de campo.

BIBLIOGRAFÍA

AHERN, F. J., GOLDAMMER, J. G. y JUSTICE, C. O. 2001. *Global and regional vegetation fire moni-*

toring from space: planning a coordinated international effort. SPB Academic Publishing. La Haya. BARBOSA, P. M., GRÉGOIRE, J. M. y PEREIRA, J. M. C. 1999. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*, no.69: 253-263.

CECCATO, P., FLASSE, S., TARANTOLA, S., JACQUEMOUD, S. y GRÉGOIRE, J. M. 2001. *Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain.* *Remote Sensing of Environment*, no. 77: 22-33.

CECCATO, P., GOBRON, N., FLASSE, S., PINTY, B. y TARANTOLA, S. 2002. *Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach.* *Remote Sensing of Environment*, no. 82: 188-197.

CHUVIECO, E., DESHAYES, M., STACH, N., COCERO, D. y RIAÑO, D. 1999. *Short-term fire risk foliage moisture content estimation from satellite data.* En *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, editado por E. Chuvieco. Springer-Verlag. Berlin. pp. 17-38.

COLL, C. y CASELLES, V. 1997. *A global split-window algorithm for land surface temperature from AVHRR data: validation and algorithm comparison.* *Journal of Geophysical Research*, no. 102B14: 16697-16713.

DEEMING, J. E. 1975. *Fuel models in the national fire danger rating system.* *Journal of Forestry*, no. 73: 347-350.

KOUTSIAS, N., KARTERIS, M., FERNÁNDEZ, A., NAVARRO, C., JURADO, J., NAVARRO, R. y LOBO, A. 1999. *Burnt land mapping at local scale.* En *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, editado por E. Chuvieco. Springer-Verlag. Berlin. pp. 123-138.

LEBLON, B. 2001. *Forest wildfire hazard monitoring using remote sensing: a review.* *Remote Sensing Reviews*, no. 20: 1-57.

MARTÍN, M.P., CECCATO, P., FLASSE, S. y DOWNEY, I. 1999. *Fire detection and fire growth monitoring using satellite data.* En *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, editado por E. Chuvieco. Springer-Verlag. Berlin. pp. 101-122.

PALTRIDGE, G.W. y BARBER, J. 1988. *Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data.* *Remote Sensing of Environment*, no. 25: 381-394.

RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J., PALACIOS-ORUETA, A. y BASTARRICA, A. 2002.

- Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems.* Canadian Journal of Forest Research, no. 32: 1301-1315.
- VAN WAGNER, C.E. 1967. *Seasonal variation in moisture content of Eastern Canadian tree foliage and the possible effect on crown fires.* Departmental Publ. n° 1204, Forestry Branch, Canada.
- VIEGAS, D. X., VIEGAS, T. P. y FERREIRA, A. D. 1992. *Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal.* International Journal of Wildland Fire, no. 2: 69-85.
- VINEY, N. R. 1991. *A review of fine fuel moisture modelling.* International Journal of Wildland Fire, no. 1: 215-234.

