

RELACIONES ENTRE IMÁGENES DE SATÉLITE E ÍNDICES METEOROLÓGICOS DEL PELIGRO DE INCENDIO

Inmaculada Aguado y Emilio Chuvieco (*)

(*) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Colegios, 2 - 28801 Alcalá de Henares

ABSTRACT: Traditional methods of fire danger estimation rely on meteorological indices, which account for the basic variables of fire ignition and propagation. These indices present some problems for operational fire management, since many times meteorological data are not available on forested areas and spatial interpolation techniques are not very suitable in areas of complex terrain. Satellite imagery provides a more direct and intensive spatial sampling of vegetation conditions, and therefore they could be a solid alternative for fire danger estimation. This paper presents temporal and spatial correlations of satellite-derived variables and meteorological danger indices for the Andalucía region. Canadian and Spanish meteorological indices have been tested. High correlations have been observed between satellite data and those components of meteorological danger indices, which account for the longer trends in vegetation moisture status, specially the Canadian Drought Code.

INTRODUCCIÓN

La predicción del peligro de incendios se ha basado en índices meteorológicos que tratan de estimar las condiciones críticas de la vegetación de cara al inicio o propagación del fuego. Con ser de gran interés, estos índices plantean dos problemas: en primer lugar, se asume que reflejan adecuadamente el estado hídrico del combustible; en segundo, que recogen la variación espacial de las condiciones de riesgo. Ambas suposiciones pueden ser poco certeras. Por un lado, la respuesta de la vegetación a los cambios atmosféricos no es equiparable entre especies, por lo que el estado hídrico variará notablemente entre tipos de combustible. Esto ha hecho limitar la validez de los índices meteorológicos a los sustratos de vegetación muerta en el sotobosque, siendo más livianamente estimada la vegetación viva. Por otro lado, la interpolación espacial de estos índices plantea notables problemas, ya que las estaciones meteorológicas no suelen localizarse óptimamente para aplicaciones forestales.

Con estos planteamientos el empleo de imágenes de satélite resulta una alternativa de gran interés en la generación de índices sintéticos de peligro. Por un lado, una imagen facilita un muestreo espacial bastante detallado (frente a la densidad media de estaciones meteorológicas). Por otro, se está recogiendo información clave sobre el estado de la vegetación viva. El problema, como es lógico, es establecer con precisión las relaciones entre la señal recogida por el sensor y el estado hídrico del combustible. Diversos autores han planteado el empleo de imágenes de satélite en la determinación del peligro de incendio (López et al., 1991; Chuvieco y Martín, 1994), pero resulta más complejo establecer relaciones numéricas entre estas imágenes y el contenido de humedad de las plantas. El problema más importante es aislar el componente hídrico en la reflectividad global de la planta; los intentos a partir de los índices de vegetación han mostrado buenos resultados, especialmente en zonas de pradera (Sadowski y Westover, 1986; Paltridge y Barber, 1988; Chladil y Nunez, 1995), aunque algunas experiencias en ámbitos de matorral también parecen ofrecer resultados esperanzadores (Alonso et al., 1996). En cualquier caso, se han detectado mejores correlaciones para una variedad del índice de vegetación, que tenga en cuenta el infrarrojo medio en lugar del rojo (este es el denominado, *Moisture Stress Index*, MSI: Rock et al., 1986), ya que esa banda es más sensible al contenido de humedad en la planta.

El segundo enfoque parte de estimar el estrés hídrico a partir de la evapotranspiración de la planta, relacionando su medida actual con la potencial. Los modelos planteados para determinar condiciones de riesgo de incendio se basan principalmente en las diferencias observadas entre la temperatura del suelo (obtenida a partir de imágenes NOAA-AVHRR) y la del aire (procedente de observatorios meteorológicos). Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor también la evapotranspiración, asumiendo una cobertura

vegetal constante (Vidal et al., 1994; Vidal y Devaux-Ros, 1995; Desbois y Vidal, 1996).

OBJETIVOS

Este trabajo presenta algunos resultados del proyecto *Mínerve-2*, que pretendía obtener un índice sintético de peligro de incendio a partir de variables obtenidas por teledetección y de los índices meteorológicos de peligro. El trabajo se ha desarrollado a lo largo de dos campañas estivales (1994 y 1995), sobre la comunidad autónoma de Andalucía.

MÉTODOS

Entre los objetivos del proyecto *Mínerve* figuraba la obtención de correlaciones múltiples con la incidencia del fuego y el contenido de humedad de la vegetación, por lo que se procedió a una campaña de recogida de muestras en campo durante los veranos de 1994 y 1995, y a una compilación de las estadísticas de incendios para esas dos temporadas. Sin embargo, los resultados que se presentan aquí se cifan exclusivamente a la relación entre índices meteorológicos e imágenes de satélite. En cuanto a los datos meteorológicos, se seleccionaron todas las estaciones automáticas disponibles en las proximidades de áreas forestales. Lamentablemente, las carencias en esta fuente son abundantes, tanto por la recogida, como por la disponibilidad de los datos. Finalmente, se han podido utilizar 18 estaciones, distribuidas mas o menos homogéneamente en Andalucía (figura 1).

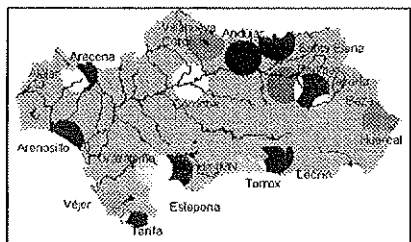


Figura 1: Areas de influencia para las estaciones meteorológicas

Los datos provenientes de las estaciones meteorológicas fueron depurados con un programa redactado para dBase III, e introducidos en hojas de cálculo. Entre los índices que se emplean en la prevención del peligro de incendios, hemos seleccionado únicamente dos, el FWI canadiense (Van Wagner, 1987) y la Probabilidad de Ignición (PI), tomada del índice español (ICONA, 1993).

El primero se ha demostrado de gran utilidad para estimar condiciones de riesgo propias de los países europeos mediterráneos (Viegas et al., 1994), mientras el segundo resulta de fácil cálculo y está adaptado también a nuestras condiciones. Se han calculado también los sub-índices del sistema canadiense: el *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC) que estima la humedad de los combustibles finos muertos, el *Duff Moisture Code* (DMC), que se dirige a estimar la humedad de la capa de suelo mas superficial, y el *Drought Code* (DC), que se centra en las capas más profundas. Estos códigos se actualizan diariamente añadiendo o restando un factor de humedad en función de las precipitaciones diarias; los sub-índices, por tanto, son dependientes de los valores del día anterior y presente. Estos códigos de humedad del combustible se unen para formar dos índices intermedios, el ISI (*Initial Spread Index*), que representa un valor numérico de propagación del incendio a partir del FFMC y del viento, y el BUI (*Build Up index*) que combina el DMC y el DC, y expresa una valoración del total de combustible dispuesto para la ignición. El índice final FWI, combina el ISI y BUI y es una medida relativa de la intensidad potencial de propagación del incendio en un combustible estándar. Debido a que en el cálculo del FWI intervienen varios aspectos el resultado debe ser utilizado como una medida general del peligro de incendio (Van Wagner, 1987).

Los índices se calcularon para el período comprendido entre el 1 de febrero y el 30 de septiembre de 1994 y 1995. El cálculo se realizó a partir del dato de las 14,30 (coincidente con el paso del satélite y con el máximo riesgo) para la temperatura, humedad del aire y viento, y del correspondiente a las 24 horas precedentes en el caso de la precipitación. Los índices canadienses se calcularon con un programa en Basic cedido por el profesor Domingos X. Viegas.

Finalmente, el procesamiento de imágenes de satélite se ha restringido a las adquiridas por el sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA, ya que es el único actualmente disponible con la resolución espacial y temporal adecuada para este objetivo. Para 1994 se utilizaron un total de 72 imágenes en 1994 (NOAA-11) y 115 en 1995 (NOAA-14). Si bien el estudio se centraba en los meses de verano, se adquirieron también imágenes de la última decena de Marzo, Abril, Mayo y Junio, con objeto de contar con una medida de las condiciones de máximo vigor vegetal. Para ambos años se eligió la pasada del mediodía (en torno a las 14,30 horas). Las

imágenes se capturaron en la estación universitaria de Valladolid, que también se encargó de la corrección geométrica y la calibración de las bandas.

A partir de los datos de radiancia y temperatura de brillo de las imágenes NOAA-AVHRR, se generaron las siguientes variables derivadas: Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), Verdor, Decrementos acumulados de NDVI, Temperatura de superficie (TS), Diferencia entre temperatura del suelo y del aire y Cociente entre NDVI y TS. Para la correlación con los índices meteorológicos se ha extraído el valor mediano de una ventana de 3 x 3 píxeles en torno a cada estación meteorológica. Para verificar que esos píxeles recogieran coberturas forestales (arbolado, matorral o pastizales), se empleo la cartografía CORINE de Andalucía.

RESULTADOS

La tabla 1 presenta los índices de correlación obtenidos entre las variables derivadas de satélite y los índices meteorológicos de peligro para cinco estaciones representativas del área de estudio. Hemos seleccionado tres de interior (Baza, Sta. Elena y Villanueva de Córdoba) y dos de costa (Arenosillo y Tarifa), por recoger una amplia variedad de condiciones climáticas y biogeográficas, con predominio de matorral (Baza y Arenosillo), bosque (Sta. Elena) y pastizales (Villanueva y Tarifa). Como puede observarse, el ajuste entre los índices meteorológicos y las variables de satélite es bastante bueno, lo que indica que los índices generados a partir de las imágenes son buenos predictores del riesgo potencial de incendio. Los signos son coherentes con lo esperado en todas las estaciones que hemos considerado (las 18 disponibles).

En cuanto al índice final FWI, la correlación es mucho mejor para las estaciones de interior que para las costeras. Mientras en las tres de interior presentadas en la tabla 1, los índices son coherentes con todas las variables de satélite, en las estaciones de costa sólo Arenosillo presenta unos valores altos, mientras Tarifa ofrece coeficientes bastante bajos con todas las variables de satélite. Similar tendencia muestran otras estaciones no incluidas en las tablas, como Alajar, Ronda y Grazalema. En la práctica totalidad de las estaciones, el índice canadiense FWI resulta mejor correlacionado

con las variables de satélite que la PI. Respecto a los subíndices del sistema canadiense, los mejor relacionados son el DMC y, sobre todo, el DC, que muestran menor dependencia del viento, el factor meteorológico más dinámico, y tienen un período de retorno más largo, por tanto más acorde con la respuesta de la vegetación sana a los cambios atmosféricos. Incluso en las estaciones en donde la correlación con el FWI es relativamente pobre, como ocurre con Tarifa, el DC ofrece valores de ajuste muy buenos.

Tabla 1: Correlación de Pearson entre los índices de peligro meteorológicos y los derivados de imágenes de satélite (datos de 1994)

TARIFA	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI	PI
ndvi	-0.24	-0.19	-0.90	0.06	-0.48	-0.11	-0.39
verdor	-0.27	-0.22	-0.90	0.06	-0.51	-0.11	-0.47
arvi	-0.02	0.12	-0.94	0.14	-0.30	0.07	-0.04
ts	0.18	0.27	0.91	-0.35	0.53	-0.17	0.30
ts-ta	-0.03	0.09	0.72	-0.43	0.32	-0.33	0.02
ndvi/tsup	-0.27	-0.25	-0.91	0.11	-0.53	-0.07	-0.44
ARENOSILLO							
ndvi	-0.73	-0.58	-0.55	-0.77	-0.58	-0.76	-0.35
verdor	-0.47	-0.70	-0.73	-0.57	-0.71	-0.68	-0.07
arvi	-0.71	-0.42	-0.40	-0.72	-0.42	-0.68	-0.38
ts	0.35	0.85	0.84	0.38	0.86	0.60	-0.09
ts-ta	-0.29	0.44	0.40	-0.27	0.43	-0.05	-0.60
ndvi/tsup	-0.61	-0.84	-0.83	-0.66	-0.85	-0.80	-0.21
BAZA							
Ndvi	-0.63	-0.57	-0.58	-0.45	-0.61	-0.57	-0.35
Verdor	-0.69	-0.44	-0.74	-0.44	-0.52	-0.60	-0.43
arvi	-0.77	-0.77	-0.67	-0.71	-0.81	-0.84	-0.58
ts	0.66	0.35	0.90	0.44	0.47	0.60	0.39
ts-ta	-0.27	-0.38	0.23	-0.49	-0.31	-0.36	-0.54
ndvi/tsup	-0.84	-0.53	-0.95	-0.59	-0.63	-0.76	-0.54
STA. ELENA							
ndvi	-0.64	-0.56	-0.54	-0.63	-0.55	-0.61	0.02
verdor	-0.77	-0.69	-0.68	-0.76	-0.68	-0.76	-0.34
arvi	-0.31	-0.23	-0.18	-0.31	-0.22	-0.26	0.41
ts	0.80	0.95	0.94	0.74	0.94	0.78	0.46
ts-ta	-0.12	0.40	0.33	-0.23	0.40	-0.20	-0.51
ndvi/tsup	-0.82	-0.87	-0.86	-0.79	-0.86	-0.82	-0.41
VILLANUEVA							
ndvi	-0.82	-0.84	-0.87	-0.78	-0.84	-0.92	-0.58
verdor	-0.68	-0.87	-0.87	-0.74	-0.86	-0.88	-0.37
arvi	-0.78	-0.83	-0.83	-0.75	-0.82	-0.90	-0.42
ts	0.79	0.83	0.85	0.72	0.83	0.86	0.57
ts-ta	0.02	0.67	0.65	-0.04	0.67	0.17	-0.21
ndvi/tsup	-0.73	-0.85	-0.87	-0.74	-0.85	-0.88	-0.48

Analizando por variables de satélite, las mejor relacionadas con los índices meteorológicos son las derivadas de la temperatura de superficie, aunque habitualmente no existe una gran diferencia entre ellas. La que manifiesta un comportamiento más errático es la diferencia entre temperatura de superficie y del aire, probablemente debido al desfase entre la hora de adquisición de la imagen y de la temperatura del aire elegida como referencia.

Las tendencias son similares para los datos de 1995. Sigue manteniéndose una buena correlación entre el DMC y DC con las variables de satélite, especialmente con las derivadas de índices de vegetación, y resulta baja con el FPMC, si bien en ese año se observan correlaciones más altas que en 1994 para la temperatura de superficie.

CONCLUSIONES

En las estaciones analizadas, la correlación temporal entre los índices meteorológicos de peligro y diversas variables generadas a partir de imágenes NOAA-AVHRR muestran tendencias muy similares y coherentes, especialmente con los componentes de estos índices que valoran las tendencias de la vegetación a largo plazo. Esto hace prever el posible empleo de las imágenes de satélite para complementar los índices meteorológicos actualmente utilizados, incorporando con más detalle el componente de riesgo asociado a la vegetación viva.

REFERENCIAS

ALONSO, M., CAMARASA A., CHUVIECO E., COCERO, D., KYUN, I.A., MARTIN M.P. y SALAS F. J. (1996). Estimating Temporal Dynamics of Fuel Moisture Content of Mediterranean Species from NOAA-AVHRR data, *EARS&L Advances in Remote Sensing*, vol. 4/4, pp. 9-24.

CHLADIL, M.A. y NUNEZ, M. (1995). Assessing grassland moisture and biomass in Tasmania. The application of remote sensing and empirical models for a cloudy environment. *International Journal of Wildland Fire*, 5:165-171.

CHUVIECO E. y MARTIN P. M. (1994). Global Fire mapping and Fire Danger Estimation Using AVHRR Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60: 563-570.

DESBOIS N. y VIDAL A. (1996). Real Time monitoring of vegetation flammability using NOAA-AVHRR thermal infrared data. *EARS&L Journal Advance in Remote sensing*, vol. 4/ 4, pp. 25-32.

ICONA (1993): Manual de operaciones contra incendios forestales, Madrid, Autor.

LÓPEZ S., GONZÁLEZ F., LLOP R. Y CUEVAS M. (1991). An evaluation of the utility of NOAA-AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1841-1851.

PALTRIDGE G. W. y BARBER J.(1988). Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA - AVHRR data. *Remote Sens. Environ.*, 25: 381-394.

ROCK, B.N., VOGELMANN, J.E., WILLIAMS, D.L., VOGELMANN, A.F. y HOSHIZAKI, T. (1986): Remote detection of forest damage, *Bioscience*, vol. 36, pp. 439-445.

SADOWSKI, F.G. y WESTOVER, D.E. (1986): Monitoring the fire-danger hazard of Nebraska rangelands with AVHRR data, en *Proc. 10th Canadian Symp. on Remote Sensing*, Edmonton, pp. 355-363.

VAN WAGNER, C.E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index system, Canada Forest Service, Ottawa.

VIDAL A. y DEVAUX-ROS C. (1995). Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index . *Agr. and Forest Meteo.*, 77: 207-224.

VIDAL A., PINGLO F., DURAND H., DEVAUX-ROS C., y MAILLET A. (1994). Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forests from NOAA thermal IR. *Remote Sensing of Environment*, 49: 296-303.

VIEGAS, D.X., SOL, B., BOVIO, G., NOSENZO, A. y FERREIRA, A. (1994): Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe, *Proc. 2nd Int. Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. 571-190.