

INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA REGENERACIÓN VEGETAL DE ÁREAS QUEMADAS

J. E. PARDO PASCUAL, M. J. PORRES DE LA HAZA, A. FDEZ. SARRÍA, L. A. RUIZ FDEZ., L. A.

jpardo@cgf.upv.es

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València Camí de Vera s/n 46022 València

RESUMEN: Se pretende valorar el grado de significación que las variables topoclimáticas (hídricas y térmicas) ejercen en la evolución de la vegetación de áreas mediterráneas semiáridas quemadas. Para ello se estudian los valores de correlación de las curvaturas, insolación potencial e índice de humedad extraídos de MDE (25x25 m) con los NDVI de tres imágenes Landsat. Los resultados evidencian la clara influencia que los factores topográficos ejercen sobre la dinámica de la vegetación.

ABSTRACT: This work tries to evaluate the degree of significance of the hydric and thermal topoclimatic variables over the evolution of the vegetation in burned semiarid Mediterranean areas. The correlation between some features derived from DEM (25x25 m.) like curvatures, potential direct radiation and wetness index, and the NDVI from Landsat TM images are studied. The results show the influence of the topographic factors over the dynamics of vegetation.

Palabras clave: MDT, NDVI, variables topoclimáticas, incendios forestales

INTRODUCCIÓN

La distribución espacial de la vegetación está determinada por múltiples factores relacionados con la dinámica de las biocenosis y por factores ambientales del biotopo, especialmente los climáticos y edáficos. En áreas montañosas, ambos tipos de factores externos se hallan profundamente determinados por la propia topografía del terreno. En los ámbitos mediterráneos semiáridos el desarrollo de la vegetación está profundamente relacionado con la disponibilidad de agua en el suelo, por lo que la configuración del terreno —y las alteraciones microclimáticas que produce— juegan un papel significativo en la recuperación de la vegetación tras sufrir un incendio forestal.

Mediante el empleo de modelos digitales de elevación (MDE) es posible realizar análisis digitales del terreno a partir de los cuáles se deducen una serie de variables topoclimáticas más o menos significativas de la realidad microclimática. Durante la última década se han presentado toda una serie de estudios que demuestran la potencialidad que este tipo de análisis tienen para explicar los procesos geomorfológicos, hidrológicos y bióticos (Moore *et alii.*, 1991; Moore *et alii.*, 1993; Felicísimo, 1994; Florinsky y Kuryakova, 1996; Florinsky, 1998).

En trabajos previos nuestro grupo de trabajo ha tratado asimismo de buscar índices que ayuden a interpretar el proceso de regeneración de la vegetación tras los incendios forestales dentro en ámbito mediterráneo (Ruiz *et alii.*, 1999; Pardo *et alii.*, 1999) y sobre distintas litologías (Pardo *et alii.*, en prensa; Porres *et alii.*, 2000). Los resultados hallados evidenciaban la clara correlación que se establece entre la insolación potencial y la distribución de la vegetación en los lugares quemados. Dichos resultados, sin embargo, muestran una correlación prácticamente nula entre determinadas variables morfométricas que potencialmente son descriptivas de las características hídricas del medio —superficie de curvatura, perfil de curvatura, área específica de cuenca— y la distribución de la vegetación, lo que resulta poco creíble a la luz de las observaciones de campo e incoherente respecto a los resultados obtenidos por otros autores en otras áreas (Moore *et alii.*, 1993; Florinsky y Kuryakova, 1996), por lo que se ha tratado de mejorar la caracterización de las variables topoclimáticas de carácter hídrico.

El objetivo del presente estudio es pues valorar la significación que las variables topoclimáticas ejercen en la distribución de la vegetación en áreas que han sufrido

incendios forestales. Para ello se han correlacionado las variables topoclimáticas deducidas a partir de un MDE con paso de malla de 25 m x 25 m y cota redondeada al metro y los NDVI obtenidos a partir de imágenes Landsat TM. Las correlaciones se han realizado sobre doce sectores que han sufrido distintos incendios forestales. Cada uno de ellos corresponde a un mismo incendio y a una misma litología. Asimismo, se han analizado algunas zonas que no han sufrido incendios para poder comparar las interrelaciones con áreas no quemadas.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para la realización de los análisis se ha partido de dos grupos de fuentes de información. Por una parte tres imágenes TM de Landsat 5 y 7 y por otra el MDE anteriormente descrito procedente del SGE.

Tratamiento de las imágenes de satélite

Se ha partido de tres imágenes: las dos más antiguas corresponden a imágenes de junio de 1987 y 1994. La tercera se tomó en diciembre de 1999. Las tres se han ajustado radiométricamente tomando como base la más antigua, mediante un ajuste de los histogramas a partir de la media y de las desviaciones estándar. Además, se han corregido geoméricamente, y se han remuestreado para conformar píxeles de 25x25m (igualándolos a los del MDT). Asimismo, y para analizar exclusivamente el comportamiento de la vegetación espontánea se ha realizado una clasificación supervisada con la que se han identificado todos aquellas cubiertas que no lo son y se han enmascarado. Sobre las imágenes teledetectadas se han delimitado las áreas quemadas en los sucesivos incendios, partiendo de la información de la C.M.A. de la Generalitat Valenciana y refrendado por la propia interpretación de las imágenes. Debe advertirse que algunos sectores han sido quemados sucesivamente.

Se han discriminado tres tipos de formaciones litológicas: (i) calizas y dolomías, (ii) margocalizas y (iii) formaciones de arcillas, margas y yesos (facies Keuper). Sobre cada área incendiada se han seleccionado cada una de las formaciones litológicas. De esta manera, el análisis se ha realizado sobre áreas quemadas en un mismo momento y con el mismo sustrato geológico.

Se han calculado los NDVI de cada una de las imágenes. Por regla general, se observa un incremento en los NDVI medios conforme la imagen se aleja del momento del incendio. Sin embargo, al comparar las tres imágenes entre sí, se observa que la correspondiente a 1999, tomada en invierno muestra características muy distintas a las otras dos, adquiridas en verano. El grado de correlación entre las dos primeras es bastante elevado (entre 0,6 y 0,8) mientras que respecto a la de invierno

no es muy bajo y, en ciertos casos incluso negativo. Ello puede asociarse a dos posibles causas: (i) al tratarse de una zona montañosa la fuerte desigualdad en la recepción de la radiación solar provoca que los niveles de radiancia procedentes de las áreas de umbría dejan señales muy bajas, y por tanto difícilmente comparables con las de verano; (ii) el estado fenológico de la vegetación —aunque es prácticamente toda ella perennifolia— no se encuentra en la misma situación que a principios del verano. Por todo ello, se ha decidido no tomar los registros invernales en consideración dado que no resultan comparables directamente con los de verano.

Modelos digitales del terreno

A partir del MDE antes señalado se han calculado tres grupos de modelos digitales del terreno: (i) insolación potencial, (ii) las curvaturas, (iii) el índice de humedad. Para el cálculo del primero se ha utilizado un programa propio, las bases del cual quedan expuestas en trabajos anteriores (Ruiz *et alii.*, 1999; Pardo *et alii.*, 1999; Porres y Pardo, 2000).

En las curvaturas se ha modificado el sistema de cálculo empleado hasta este momento. En este trabajo el cálculo del perfil de curvatura (*pfc*) y de la superficie de curvatura (*sc*) se han realizado con el programa ArcFlow incluido como una extensión en ArcView 3.2. Su formulación parte de la definición de la superficie descrita según el polinomio:

$$Z = ax^2 + by^2 + cxy + dx^2 + ey^2 + fxy + gx + hy + i$$

en la que los coeficientes implicados en el cálculo de las curvaturas se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} d &= [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / L^2 \\ e &= [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / L^2 \\ f &= (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4 L^2 \\ g &= (-Z4 + Z6) / 2L \\ h &= (Z2 - Z8) / 2L \end{aligned}$$

Siendo L el paso de malla y Z, la cota de cada vecino. El perfil de curvatura se halla mediante la expresión:

$$pfc = \frac{-2(dh^2 + eg^2 - fgh)}{(g^2 + h^2)}$$

y la superficie de curvatura:

$$sc = \frac{(dg^2 + eh^2 + fgh)}{(g^2 + h^2)}$$

La diferencia respecto a la formulación empleada en trabajos anteriores nuestros radica en el cálculo de cada uno de los coeficientes. Los factores son calculados a partir de las variaciones de las celdas inmediatamente contiguas, y no como promedio de las variaciones en todo el vecindario. La apariencia de las imágenes de curvatura en trabajos anteriores a éste, en los que se empleaban formulaciones descritas por Florinsky y Kuryakova (1996) y Florinsky (1998), era en todos los casos más suaves y promediadas que las obtenidas ahora, por la sencilla razón de que la curvatura atribuida a un píxel se calculaba en función de unos parámetros obtenidos como promedio de todo el vecindario. Partiendo de ambos índices de curvatura se han calculado la curvatura media (*cmec*) como el promedio de ambas y la curvatura total (*ctot*) que resulta de multiplicar *sc* y *pf*.

El índice de humedad (*ih*) se define como $\ln(A_c/tg\beta)$, siendo A_c el área específica que vierte a cada uno de los píxeles de la cuenca y β es la pendiente. Son muchos los trabajos los que han empleado este índice para de-

tecar ámbitos de concentración de humedad (Moore *et alii.*, 1991, Quinn *et alii.*, 1995). Dicho índice puede mejorarse añadiendo un factor que incluya las diferencias de transmisibilidad de los distintos materiales pero en nuestro caso, dado que las mismas no están cuantificadas y los análisis se hacían sobre áreas litológicamente homogéneas esta mejora se ha obviado. Para el cálculo de A_c se ha utilizado la metodología descrita en Porres y Pardo (2000).

Regresión múltiple paso a paso

Una vez obtenidos la imagen de NDVI de 1987 y 1994 y los seis MDT (*sc*, *pf*, *cmec*, *ctot*, *ih* e *inso*) se ha realizado una regresión múltiple paso a paso que ha permitido cuantificar el grado de relación entre los parámetros topoclimáticos y los NDVI de los dos años finalmente considerados así como la mejora que cada variable supone en el grado de correlación total. La mayor parte de los resultados quedan expuestos en la tabla 1.

96a** (90.2 ha) <i>ndvi</i> 87			85-a (4790 ha) <i>ndvi</i> 87			84-a (508 ha) <i>ndvi</i> 87			79n-a (2305 ha) <i>ndvi</i> 87			79s-a (4485 ha) <i>ndvi</i> 87			78-a (321 ha) <i>ndvi</i> 87		
inso	-0.56	0.58	inso	-0.43	0.43	inso	-0.18	0.17	inso	-0.55	0.55	inso	-0.35	0.35	sc	-0.12	0.16
medc	-0.09	0.59	sc	-0.04	0.44	sc	-0.10	0.21	sc	-0.05	0.56	ih	0.02	0.35	inso	-0.08	0.18
ih	-0.05	0.59	pf	0.03	0.44	medc	0.07	0.23	pf	0.05	0.56	totc	0.03	0.35	ih	0.07	0.19
			ih	0.03	0.44	ih	0.07	0.23	ih	0.03	0.56	pf	0.01	0.35	totc	-0.05	0.19
			totc	0.00	0.44	totc	-0.05	0.24	totc	0.02	0.56	sc	-0.01	0.35			
<i>ndvi</i> 87			<i>ndvi</i> 87			<i>ndvi</i> 87			<i>ndvi</i> 87			<i>ndvi</i> 87			<i>ndvi</i> 87		
inso	-0.55	0.56	inso	-0.30	0.30	inso	-0.23	0.23	inso	-0.43	0.42	inso	-0.39	0.39	inso	-0.19	0.19
medc	-0.05	0.56	ih	-0.07	0.31	ih	0.12	0.29	sc	-0.09	0.44	ih	0.04	0.40	sc	-0.16	0.25
totc	-0.03	0.56	pf	0.04	0.32	pf	0.10	0.30	pf	0.04	0.45	pf	0.04	0.40	medc	0.06	0.26
			sc	0.02	0.32	totc	-0.04	0.31	ih	0.04	0.45	sc	-0.02	0.40	ih	0.06	0.27
			medc	0.02	0.32	sc	-0.03	0.31	totc	0.03	0.45	totc	0.01	0.40	totc	-0.03	0.27

85-b* (429 ha) <i>ndvi</i> 87			84-b (180 ha) <i>ndvi</i> 87			79n-b (121 ha) <i>ndvi</i> 87			79s-b (659 ha) <i>ndvi</i> 87			78-b (9.7 ha) <i>ndvi</i> 87		
inso	-0.60	0.60	inso	-0.54	0.55	inso	-0.43	0.43	inso	-0.14	0.14	ih	0.51	0.45
ih	0.10	0.61	pf	0.08	0.56	sc	-0.13	0.45	ih	0.08	0.16	inso	-0.20	0.49
totc	0.02	0.61	ih	0.06	0.57	ih	0.03	0.46	pf	0.03	0.17	totc	-0.08	0.50
medc	0.01	0.61	totc	0.03	0.57	totc	0.02	0.46						
<i>ndvi</i> 94			<i>ndvi</i> 94			<i>ndvi</i> 94			<i>ndvi</i> 94			<i>ndvi</i> 94		
inso	-0.64	0.64	inso	-0.59	0.60	inso	-0.38	0.38	inso	-0.33	0.32	ih	0.50	0.41
ih	0.09	0.65	ih	0.07	0.61	sc	-0.19	0.44	ih	0.07	0.34	inso	-0.36	0.55
sc	-0.05	0.65	pf	0.09	0.61	medc	-0.07	0.45	sc	0.08	0.35	medc	-0.18	0.58
totc	0.03	0.65	medc	-0.04	0.61	ih	0.04	0.45	medc	0.34	0.35	totc	-0.14	0.60
			totc	0.02	0.61	totc	0.03	0.45						

* la indicación *a* hace referencia a área calcárea, la *b*, a margocalizas.

** el sector 96 corresponde a una no quemada

Tabla 1. Grado de ajuste en la regresión múltiple entre los NDVI con las variables topoclimática, se indica el ajuste de cada variable y cómo hace mejorar la correlación total, (entre paréntesis, área considerada).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como puede observarse en la tabla la insolación potencial es el factor que mejor se relaciona con la distribución de la vegetación. Asimismo, se observa que las variables asociadas a curvaturas y el índice de humedad también influyen en la localización de la vegetación, si bien, en casi todos los casos de forma mucho menor. Asimismo, se advierte que las zonas margocalizas (menos permeables) la correlación halladas algo mayor que en las zonas calcáreas.

El proceso seguido ha mostrado algunas dificultades asociadas al uso del NDVI para valorar la densidad de la vegetación. Las enormes variaciones detectadas entre las imágenes correspondientes al solsticio de verano e invierno sugieren la conveniencia de utilizar en análisis de este tipo imágenes de primavera o verano, cuando la vegetación se encuentra más vigorosa y la incidencia de los rayos solares llegan a la superficie con un menor ángulo de inclinación.

Respecto a los resultados obtenidos parece deducirse que el nuevo método de definir las curvaturas en el que no se promedia el conjunto del vecindario, resulta mucho más expresivo a la hora de caracterizar la dinámica de los flujos de agua que siguiendo el propuesto por Florinsky (1998). Asimismo, resulta evidente que el empleo del índice de humedad resulta más adecuado cuando se trata de detectar los puntos de humedad que el simple empleo del área específica de cuenca de cada píxel. Con todo, el grado de correlación que se establece por regla general sigue siendo claramente inferior a lo que se advierte en otros lugares del planeta. En realidad, ello puede obedecer a las propias características del medio, especialmente a la escasa potencia del suelo, resultado a la postre de las condiciones semiáridas y de los frecuentes incendios a los que ha estado sometida la región.

Las variables topoclimáticas empleadas en el estudio pueden dividirse en dos grupos: el primero lo constituye la insolación potencial, con una significación térmica: los lugares más insolados son los que presentan mayores temperaturas, que indirectamente provoca efectos hídricos: a mayor temperatura, mayor evapotranspiración y por tanto, menor disponibilidad de agua. El resto de los parámetros (*sc*, *pf*, *medc*, *totc*, *ih*) tienen una significación hidrológica: evidencian los lugares en que se acumularán las aguas como consecuencia de la existencia de flujos superficiales o subsuperficiales tras lluvias de un cierto nivel. Si las lluvias son poco continuas y las pérdidas por transmisión elevadas los flujos superficiales y subsuperficiales no funcionarán de forma continuada, sino sólo tras las tandas de lluvia y, por tanto, la concentración de humedad en las áreas topográficamente propensas a ello sólo se dará de

forma esporádica. La insolación, por el contrario, es un factor más constante y por ello su significación suele ser mayor.

El único caso en el que los factores hídricos presentan mayor significación que el factor insolación es el de 1978. Significativamente esta zona ocupa una amplia ladera orientada toda ella a sur por lo que son muy pocos los píxeles que quedan con valores de insolación bajos y queda por tanto muy poco contrastado.

En todo caso, se ha de ser consciente que el método propuesto permite reconocer los principales factores explicativos del desarrollo de la vegetación a una escala detallada, no es razonable esperar una explicación completa de la distribución de la vegetación por dos razones: en primer lugar porque hay variaciones microescalares en el tipo de suelo que no quedan reflejados en el mapa litológico y, en segundo lugar, porque existen otros fenómenos asociados a la propia dinámica de la biocenosis —existencia de plagas, acción de los herbívoros, etc.— que con nuestra metodología no se pueden contemplar.

BIBLIOGRAFÍA

- FELICISIMO, A. M. (1994): *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*, Pentalfa Ediciones, Oviedo, 220 pp
- FLORINSKY, I. V. (1998): Combined analyse of the digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigation, *Progress in Physical Geography*, 22, 1, 33-60.
- FLORINSKY, I. V. Y KURYAKOVA, G. A. (1996): Influence of topography on some vegetation cover properties, *Catena* 27, 123-141.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B. and LADSON, A.T. (1991): Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications, *Hydrological Processes*, 5 (1), 7-34.
- MOORE, I. D., NORTON, T. W., WILLIAMS, J.E. (1993): Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes, *Journal of Hydrology*, 150, 717-747.
- PARDO, J. E., FDEZ SARRÍA, A., PORRES, M. J., RUIZ, L. A. (*en prensa*): Análisis of the regeneration processes of the vegetation canopy on different lithologies and their relationship with topoclimatic variables derived from a DEM, *ESSC Congress*, Valencia Marzo 2000.
- PARDO, J. E., RUIZ, L. A., PORRES DE LA HAZA, M. J., FERNÁNDEZ SARRÍA, A. and URBANO, F. (1999): Caracterización de la relación entre la insolación y la regeneración vegetal tras incendios forestales en ámbitos mediterráneos, en *Actas del XVI Congreso de Geógrafos Españoles*. Vol. I, Málaga, 221-232.

- PORRES, M. J. y PARDO, J. (2000): Influence of topoclimatic variables derivated from digital terrain models over the vegetation regeneration process in burned areas, *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, XIX ISPRS Congress, 1162-1177.
- QUINN, P. F., BEVEN, K. J., LAMB, R. (1995): The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the Topmodel framework, *Hydrological Processes*, 9, 161-182.
- RUIZ, L. A., PARDO, J. E., PORRES, M. J. y FDEZ. SARRÍA, A. (1999): Relaciones entre las características de modelos digitales de elevación y texturas aplicadas al análisis de la vegetación, *Teledetección. Avances y Aplicaciones*, AET, Albacete, 76-79.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación 6292 para Grupos Emergentes del Programa de Incentivo a la Investigación de la UPV.