

ESTRUCTURA DE FORMACIONES ARBOLADAS EN RELACIÓN A PATRONES ESPECTRALES DERIVADOS DE UNA IMAGEN DE MEDIA RESOLUCIÓN LANDSAT ETM EN EL NORTE DE CÁCERES

Antonio Vázquez de la Cueva y Otilio Sánchez Palomares

Centro de Investigación Forestal, CIFOR-INIA, Ctra. de A Coruña km 7, 28040, Madrid,
vazquez@inia.es; otilio@inia.es

Resumen

La creciente disponibilidad de datos derivados de satélites de observación de la tierra impulsa la búsqueda de aplicaciones relativas, entre otros ámbitos, a la caracterización de atributos de la vegetación. La identificación de relaciones estadísticas entre variables estructurales de interés ecológico y/o selvícola en formaciones arboladas y la respuesta espectral obtenida en imágenes de satélite, permitiría la identificación y cartografía en grandes áreas de atributos que, por otros procedimientos, serían más difíciles de obtener. No obstante las relaciones descritas en la literatura son frecuentemente dependientes de la cubierta vegetal estudiada, de los rangos de variación en los atributos estructurales y de cómo éstos se relacionan con cambios en las reflectancias captadas. Además, el tipo de sensor utilizado tiene una incidencia determinante en los resultados obtenidos.

En este trabajo se ha empleado una imagen Landsat ETM para evaluar las relaciones entre variables estructurales obtenidas de parcelas del Tercer Inventario Forestal Nacional y la información derivada de la imagen. Los análisis se han realizado en tres tipos de vegetación dominados por *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. pyrenaica* mediante procedimientos multivariantes basados en ordenaciones canónicas. Los resultados ilustran de manera gráfica las relaciones entre los dos conjuntos de datos y muestran la dependencia del tipo de especie considerada.

Palabras clave: Estructura de la vegetación, análisis canónicos, RDA.

INTRODUCCIÓN

Los bosques constituyen sistemas tridimensionales en los que su estructura biofísica puede jugar un papel determinante en su diversidad y funcionalidad (SPIES, 1998). La posibilidad de derivar a partir de datos procedentes de imágenes de satélite una información espacial detallada, y por tanto cartografiable, de las características estructurales de formaciones arboladas, resultaría de gran utilidad en la toma de decisiones y en la planificación de actividades de gestión. Entre los procedimientos habituales para la obtención de la información mencionada a partir de imágenes de satélite, se encuentra la identificación de relaciones estadísticas empíricas entre los distintos conjuntos de datos que permitiesen la elaboración de modelos. No obstante las relaciones descritas en la literatura son frecuentemente dependientes de la cubierta vegetal estudiada, de los rangos de variación en los atributos estructurales y de cómo éstos se relacionan con cambios en las reflectancias captadas. Además, el tipo de sensor utilizado tiene una incidencia determinante en los resultados obtenidos. Por otra parte, trabajos recientes (MALLINIS *et al.*, 2004) ponen de manifiesto que los resultados obtenidos son en ocasiones incluso contradictorios en función del tipo de sistema analizado.

Este trabajo se centra en la evaluación de las relaciones existentes entre atributos estructurales de distintas formaciones vegetales, evaluados a partir de datos derivados de los muestreos realizados en las parcelas del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN-3) y un conjunto de variables derivadas de la información procedente de la imagen y de la topografía del terreno. Dada la gran cantidad de variables involucradas, se ha optado por emplear procedimientos de análisis multivariantes. Estas técnicas permiten la evaluación conjunta de las interrelaciones entre dos conjuntos de datos (TER BRAAK, 1986; COHEN *et al.*, 2003). En concreto, se ha empleado una ordenación canónica basada en métodos lineales que permite analizar y visualizar de manera gráfica las relaciones entre dos

conjuntos de datos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El trabajo se ha llevado a cabo en una zona de unos 100 x 90 km localizada en la porción occidental del Sistema Central abarcando parte de las provincias de Cáceres, Salamanca y Ávila. Se incluyen comarcas tan representativas como La Vera, Jerte, Valle de Ambroz, Tierra de Granadilla, Hurdes y Batuecas. Las características bioclimáticas de la región de estudio son bastante variadas como ilustra el hecho de que el rango altitudinal sea de más de 2300 m, de 226 a 2547 m.

Los datos de campo se han obtenido de parcelas levantadas en el transcurso del IFN-3, realizado en las provincias implicadas a finales de 2001 y principios de 2002, es decir casi coetáneas con la fecha de la imagen empleada.

Las variables elaboradas a partir de los datos del IFN-3 han sido:

- Área basimétrica (ABas), expresada en $m^2 ha^{-1}$.
- Densidad de pies (DensP), expresada en número de pies mayores ha^{-1} .
- Altura de la masa (AltMx, m). Se ha empleado el valor máximo por parcela.
- Fracción de cabida cubierta total de la vegetación (Fcc_To), estimada en el campo y expresada en porcentaje.
- Fracción de cabida cubierta total de la vegetación arbórea (Fcc_Ar): estimada en el campo para las copas de la vegetación arbórea.

Las parcelas analizadas son las mayoritariamente monoespecíficas (con más del 90% del área basimétrica asignado a una de las especies) de las tres especies principales, en cuanto al número de parcelas, presentes en la zona de estudio. Estas especies han sido *Quercus pyrenaica*, *Q. ilex* y *Pinus pinaster*. El conjunto de parcelas empleado es el resultante de la eliminación, para cada uno de las tres especies y para las 5 variables analizadas de las parcelas con “outliers” y valores extremos en sus distribuciones de valores.

Imagen de satélite

Se ha empleado una imagen Landsat ETM libre de nubes de fecha 16 de junio de 2002. El procedimiento de corrección geométrica se basó en el método de ortocorrección implementado en el GIS MiraMon (PONS, 2002). Este mismo software se empleó en la normalización topográfica y en la corrección radiométrica.

La información derivada de la imagen ha estado formada por las siguientes variables: las reflectancias de las 6 bandas espectrales disponibles por separado (Vis_1, Vis_2 y Vis_3 en la región del espectro visible, IFC_4 en el infrarrojo cercano y IFM_5 y IFM_7 en el infrarrojo medio), el NDVI (Índice de vegetación normalizado) calculado como $(Banda\ 4 - Banda\ 3) / (Banda\ 4 + Banda\ 3)$ y los tres componentes derivados de la transformación “Tasseled Cap”: brillo, verdor y humedad (TC_1, TC_2 y TC_3 respectivamente) (JENSEN, 1986).

Por otra parte se han calculado a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) empleado en la corrección de la imagen otras variables: las condiciones de iluminación (definido por el coseno del ángulo de incidencia entre la posición del sol y la normal del terreno), la elevación, la orientación y la pendiente de cada parcela. En todas las variables, los valores asociados a cada parcela se han obtenido como la mediana de los 9 píxeles (3x3) circundantes a la posición teórica de la parcela.

Procedimiento de análisis

La evaluación de las relaciones entre las características de las parcelas (variables de respuesta) y el comportamiento espectral derivado de la imagen (variables explicativas) se ha puesto de manifiesto

por medio de análisis de ordenación canónica. Se ha empleado un análisis de gradiente directo basado en métodos lineares. En este análisis los ejes canónicos obtenidos están forzados (constreñidos) a ser una combinación lineal de las variables explicativas. Este procedimiento se denomina análisis de redundancia (RDA) (RAO, 1984). Se han seleccionado “biplots” de correlación para evaluar las relaciones entre los dos conjuntos de datos, de esta manera los diagramas de correlación permiten la visualización de las correlaciones entre las variables de los dos conjuntos de datos (TER BRAAK, 1994). Los análisis multivariantes se han llevado a cabo con el programa CANOCO 4.5 (TER BRAAK & SMILAUER, 2002).

Las variables de respuesta han sido las 5 variables elaboradas a partir de los datos de las parcelas del IFN-3 mientras que las variables explicativas han sido 14 (10 derivadas de la imagen y 4 ilustrativas de la posición topográfica de la parcela). Para simplificar el análisis se han seleccionado en cada análisis 5 variables explicativas de las 14 disponibles. La selección se ha basado en el método “forward selection” implementado en el programa empleado y validado mediante test de Monte Carlo. Se han realizado un análisis para cada uno de los tres tipos de vegetación. Los “biplots” obtenidos (Figura 1) muestran las correlaciones entre las variables explicativas (información de la imagen y del terreno) y las variables de respuesta (caracterización de la estructura de la vegetación).

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los valores medios y la desviación estándar de las parcelas correspondientes a las tres especies seleccionadas y las cinco variables analizadas. En la Tabla 2 se muestran los valores propios (eigenvalues) y la significación estadística de los dos primeros ejes canónicos resultantes de cada uno de los tres RDA que se representan en los “biplots” de la Figura 1. El primer eje ha resultado significativo en la ordenación realizada para *P. pinaster* y *Q. ilex* con valores próximos a 18% de varianza explicada en ambos casos. Para *Q. pyrenaica* el primer eje no ha resultado significativo y presenta un valor próximo a 5%. Los dos ejes en conjunto han sido significativos en las tres ordenaciones (Tabla 2). En este trabajo se muestran únicamente las ordenaciones resultantes de las 5 variables explicativas más importantes y que fueron seleccionadas de las 14 variables iniciales.

El “biplot” obtenido en la ordenación de las parcelas de *P. pinaster* (Figura 1a) muestra que el primer eje está definido por TC_3 por un lado y por IFM_7 y la pendiente por otro lado. La densidad de pies se correlaciona positivamente con TC_3 mientras las demás variables (Fcc_Ar, Fcc_To y AltMx), muy correlacionadas entre sí, se relacionan con IFM_7 y con la Pendiente. El segundo eje ha estado definido fundamentalmente por la elevación. El área basimétrica se ha correlacionado positivamente con esta variable.

En la ordenación de *Q. ilex* (“biplot” de la Figura 1b), en general, han sido otras las variables explicativas seleccionadas. Así, el primer eje está definido por un lado por el NDVI y la elevación. La densidad de pies ha sido la variable de respuesta más correlacionada con ellas. En sentido contrario han sido TC_1 y Vis_1 las variables explicativas que definen éste primer eje. Las variables de respuesta área basimétrica, Fcc total y la altura de la masa, también muy correlacionadas entre sí, son las más relacionadas con las variables explicativas. La mayor contribución al segundo eje ha sido por parte de la variable iluminación. Correlacionada negativamente con ésta variable ha estado la Fcc de la cubierta arbolada.

Las variables explicativas que más han contribuido a la ordenación de las parcelas de *Q. pyrenaica* han sido la elevación y el NDVI por un lado y el IFM_5 por otro. Todas estas variables han contribuido también de manera importante al segundo eje. Esta ordenación ha sido la única para la que el primer eje no ha resultado significativo. Este hecho se pone de manifiesto en la escasa longitud de los vectores asociados a las variables de respuesta y su proximidad al centro de la ordenación como muestra el “biplot” (Figura 1c).

De las variables fisiográficas, la elevación es la única variable explicativa que aparece en las tres ordenaciones. La pendiente ha estado implicada únicamente en la ordenación de *P. pinaster* y la iluminación en la de *Q. ilex*. De las variables derivadas de la información de la imagen, la reflectancia en la región del visible ha estado representada también en las tres ordenaciones: Vis_1 (azul) en *P. pinaster* y *Q. ilex* y Vis_2 (verde) en *Q. pyrenaica*. Las reflectancias en los infrarrojos medios se han seleccionado en dos de las tres ordenaciones: la banda 7 (IFM_7) en *P. pinaster* y la banda 5 (IFM_5) en *Q. pyrenaica*. En cuanto a las transformaciones obtenidas a partir de las bandas originales, el índice de vegetación (NDVI) ha sido de las más importantes en los dos *Quercus* pero no en *Pinus*. En cuanto a los tres componentes derivados de la transformación “Tasseled Cap”, en cada una de las ordenaciones ha sido seleccionado en las primeras posiciones uno distinto.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La elevación ha sido una de las variables más importantes en las ordenaciones efectuadas. Una posible interpretación es que son las variaciones en la cubierta vegetal asociadas a un mismo tipo especie dominante, y reflejadas por la elevación a la que se encuentra la parcela, las que han condicionado la ordenación. En ocasiones su importancia ha sido mayor a la de la información derivada de la imagen en las ordenaciones obtenidas. Este hecho sugeriría la necesidad de acotar los rangos de variación en los tipos de vegetación para incrementar el potencial de información espacial que se puede derivar de la imagen (FRANKLIN *et al.*, 2003).

En la presente aproximación, del conjunto de parcelas muestreadas se han excluido únicamente las que presentaban “outliers” y valores extremos para cada variable y tipo de vegetación. Esto implica que para cada uno de los tipos de vegetación las parcelas corresponden a localizaciones repartidas por toda la zona de estudio lo que puede implicar ecosistemas y paisajes distintos. Este hecho implica que aunque compartiendo la misma especie principal, el sotobosque puede presentar características muy diferentes condicionando los resultados (PURH & DONOGHUE, 2004). Por otra parte, análisis previos han mostrado el papel determinante que tiene la selección efectuada en las parcelas en la confección de un modelo empírico que relacione atributos de la vegetación medidos en campo frente a la información proporcionada por imágenes de satélite.

Hay que considerar también que en bosques relativamente abiertos, los efectos espectrales dominantes pueden estar relacionados con el sotobosque y con los componentes variables de sombras debidos a los diferentes tamaños, formas y configuraciones de las copas (RAUTIANEN *et al.*, 2004). Trabajos previos han señalado que en situaciones homogéneas en cuanto a su composición específica, la estructura de los bosques y la topografía, se han obtenido buenos resultados en la estimación de diversos atributos de la vegetación (EKSTRAND, 1994). Por otra parte, la situación es más cambiante en situaciones más heterogéneas asociadas frecuentemente a climas mediterráneos como mostraron (SALVADOR y PONS, 1998) y como se ilustra también en este trabajo. Estos resultados refuerzan la necesidad de profundizar en la influencia que tienen el tipo de especie y su estructura arbórea en la respuesta espectral que presentan. Por último, mencionar la utilidad del procedimiento empleado para ilustrar las relaciones entre las distintas variables.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a un contrato Ramón y Cajal (Ministerio de Educación y Ciencia) parcialmente financiado con fondos FEDER. Se agradecen las facilidades prestadas por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Medio Ambiente).

Referencias

- COHEN, W.B.; MAIERSPERGER, T.K.; GOWER, S.T. & TURNER, D.P.; 2003; An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment* 44:561-571.
- EKSTRAND, S; 1994; Assessment of forest damage with Landsat TM. Correction for varying forest stands characteristics. *Remote Sensing of Environment*. 47: 291-302.
- FRANKLIN, S.E.; HALL, R.J.; SMITH, L. & GERYLO, G.R.; 2003; Discrimination of conifer height, age and crown closure classes using Landsat-5 TM imagery in the Canadian Northwest Territories. *Int. J. Remote Sensing* 24(9):1823-1834.
- JENSEN, J.R.; 1986; *Introductory Digital Image Processing*, Prentice-Hall, New Jersey.
- MALLINIS, G.; KOUTSIAS, N.; MAKRAS, A. & KARTERIS, M.; 2004; Forest parameters estimation in a European mediterranean landscape using remotely sensed data. *Forest Science* 50(4): 450-460.
- PONS, X.; 2002; "MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing software", CREA, UAB, Bellaterra.
- PUHR, C.B. & DONOGHUE, D.N.M.; 2000. Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland. *Int. J. Remote Sensing* 21 (4): 633-646.
- RAO, C.R.;1984; The use and interpretation of principal components analysis and applied research. *Sankhya* 26: 329-358.
- RAUTIAINEN, M.; STENBERG, P.; NILSON, T.; KUUSK, A; 2004; The effect of crown shape on the reflectance of coniferous stands. *Remote Sensing of Environment* 89: 41-52
- SALVADOR, R. & PONS, X.; 1998; On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. *Forest Ecology and Management* 104: 193-208.
- SPIES, T.A.; 1998; Forest structure: a key to the ecosystem. *Northwest Science* 72 (2): 34-39.
- TER BRAAK, C.J.F. & SMILAUER, P. ; 2002; *CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows*. User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power (Ithaca, NY), 500 pp.
- TER BRAAK, C.J.F.; 1986; Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67: 1167-1179.
- TER BRAAK, C.J.F.; 1994; Canonical community ordination. Part I: basic theory and linear methods. *Ecoscience* 1: 127-140.

Tabla 1. Valores medios y desviación estándar para las cinco variables descriptoras de la vegetación arbórea en las parcelas. El número de parcelas implicadas (que son las empleadas en los análisis multivariantes) es de 115 para *P. pinaster*, 78 para *Q. ilex* y 198 para *Q. pyrenaica*.

	<i>Pinus pinaster</i>		<i>Quercus ilex</i>		<i>Quercus pyrenaica</i>	
	Media	Dev. st.	Media	Dev. st.	Media	Dev. st.
Fcc_To	94,7	5,9	91,8	9,2	95,4	6,3
Fcc_Ar	66,1	13,0	33,7	12,6	65,4	17,4
Abas	21,4	11,3	6,0	2,7	12,6	6,3
DensP	535,5	343,2	69,8	56,2	644,7	454,8
AltMx	13,2	3,1	7,8	1,0	12,2	3,1

Tabla 2. Valores propios (eigenvalues) y significación de los ejes canónicos 1 y 2 a partir de los test de Monte Carlo efectuados en los tres análisis RDA.

	Primer eje canónico (eigenvalue)	F-ratio	P-valor	Ejes canónicos 1 y 2	F-ratio	P-valor
<i>P. pinaster</i>	0,178	23,539	0,0020	0,201	5,471	0,0020
<i>Q. ilex</i>	0,183	16,169	0,0020	0,233	4,373	0,0020
<i>Q. pyrenaica</i>	0,049	9,378	0,0580	0,063	2,452	0,0240

Figura 1. Diagramas de ordenación (“biplots”) basados en correlaciones obtenidos para las parcelas correspondientes a *P. pinaster* (a), *Q. ilex* (b) y *Q. pyrenaica* (c) en los RDA efectuados. Las variables de respuesta (características de las parcelas) están representadas como vectores con líneas finas y los nombres de las variables en cursiva. Como vectores con líneas más gruesas se representan las 5 variables explicativas (información de la imagen y topográfica) seleccionadas. Cada vector señala la dirección de máximo incremento en los valores de la variable correspondiente, mientras que los ángulos entre vectores indican la correlación entre variables.

