



Teledetección Humedales y espacios protegidos

**Libro de actas
del XVI Congreso de la Asociación
Española de Teledetección**

Editores:

Javier M^a Bustamante Díaz
Ricardo Díaz-Delgado
David Aragonés Borrego
Isabel Afán Asencio
Diego García

Créditos

- © Editores:
Javier M^a Bustamante Díaz
Ricardo Díaz-Delgado
David Aragonés Borrego
Isabel Afán Asencio
Diego García
 - © De los textos y las imágenes, sus autores
 - © Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD), Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Asociación Española de Teledetección.
Avd. Américo Vespucio. Isla de La Cartuja. 41092 Sevilla (Spain)
- Maquetación: Cortijo y Asociados
- ISBN: 978-84-608-1726-0
- Año de edición 2015

Variación temporal del comportamiento espectral y la composición química en el dosel arbóreo de una dehesa

Rosario González-Cascón⁽¹⁾, Javier Pacheco-Labrador⁽²⁾ y Pilar Martín⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Medio Ambiente, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Ctra. Coruña, Km. 7,5, 28040 Madrid. Email: cascon@inia.es

⁽²⁾ Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental, Instituto de Economía, Geografía y Demografía, Centro de Ciencias Humanas y Sociales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), C/Albasanz 26-28, 28037 Madrid. Emails: javier.pacheco@cchs.csic.es, mpilar.martin@cchs.csic.es

Resumen: En el contexto de los proyectos BIOSPEC y FLUXPEC (<http://www.lineas.cchs.csic.es/fluxpec/>), se han realizado mediciones espectrales y de variables biofísicas a nivel de hoja en el dosel arbóreo de una dehesa de encina (*Quercus ilex*) durante cuatro periodos vegetativos. Se han llevado a cabo mediciones de reflectividad bi-cónica de hoja intacta, LMA, contenido de agua, nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, y Zn) y pigmentos. Las mediciones espectrales se han relacionado con las variables biofísicas mediante análisis de regresión múltiple stepwise y regresión de mínimos cuadrados parciales. Estos análisis han permitido identificar las bandas espectrales que explican la evolución de las variables biofísicas y estimar los contenidos de nutrientes a lo largo del proceso de maduración de las hojas en la copa. Se han obtenido estimaciones significativas para la mayoría de las variables foliares estudiadas. Las longitudes de onda con mayor contribución aparecen en la zona del eje rojo, el SWIR y la región verde del visible.

Palabras clave: *Quercus ilex*, factor de reflectividad bi-cónico de hoja intacta, nutrientes foliares, pigmentos

Temporal variation of the spectral behaviour and chemical composition inside the canopy of a dehesa formation

Abstract: In the context of the BIOSPEC and FLUXPEC projects (<http://www.lineas.cchs.csic.es/fluxpec/>), spectral and biophysical variables measurements at leaf level have been conducted in the tree canopy of a holm oak dehesa (*Quercus ilex*) ecosystem during four vegetative periods. Measurements of bi-conical reflectance factor of intact leaf (ASD Fieldspec 3® spectroradiometer), LMA, water content, nutrient (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, and Zn) and pigments were performed. The spectral measurements were related to biophysical variables by stepwise regression and partial least squares regression analyses. These analyses allowed the identification of the spectral bands that best explain the evolution of the biophysical variables and the estimation of the nutrient contents during the leaf maturation process. Significant estimates of the majority of the variables studied were obtained. Wavelengths in the red edge, SWIR and the green region produced the highest contributions.

Keywords: *bi-conical reflectance factor of intact leaves, foliar nutrients, chlorophyll, Quercus ilex*

1. INTRODUCCIÓN

La relación entre la respuesta espectral y la estructura y composición química de las hojas ha permitido desarrollar modelos predictivos para la estimación de variables foliares en especies forestales (Richardson & Reeves, 2005, Asner *et al.* 2011, Serbin *et al.* 2014). Estudios previos sobre las relaciones entre la concentración de foliar de bioelementos y datos espectrales de campo en hoja intacta de *Quercus ilex* se han centrado principalmente en el nitrógeno debido a su relevancia en la actividad fotosintética de la copa y, por tanto, en la producción primaria neta de los ecosistemas (Ourcival *et al.*, 1999, Pacheco-Labrador *et al.* 2014). En estos estudios, las correlaciones más altas se localizan en la zona del visible, con máximos en el “eje rojo”, seguidos por un segundo máximo en la región del verde. Las concentraciones de pigmentos foliares, el contenido de agua y la estructura y morfología de la hoja son los principales factores que conforman los espectros de hoja fresca (Ourcival *et al.* 1999). Junto con los bioelementos más relacionados con la actividad fotosintética como el

N, Mg ó Mn, algunos elementos directamente relacionados con las propiedades estructurales de la hoja como el C o el Ca (con la rigidez de la pared celular) o el K (responsable de la turgencia foliar) podrían explicar parte de la variabilidad de los cambios en la reflectividad durante los procesos de desarrollo y maduración de la hoja.

El objetivo de este trabajo es explorar la variabilidad temporal del contenido de nutrientes y el comportamiento espectral de hojas esclerófilas intactas durante el período vegetativo para evaluar la capacidad de la espectroscopia foliar en la estimación del contenido de elementos a nivel de copa. Para ello, las variables espectrales y biofísicas se han relacionado mediante análisis de regresión múltiple stepwise (SWR) y regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) con el propósito de identificar las bandas espectrales que expliquen mejor la dinámica temporal de las variables biofísicas y los contenidos de nutrientes a lo largo del proceso de maduración de las hojas en la copa.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las mediciones se han llevado a cabo en el área de estudio del proyecto FLUXPEC (<http://www.lineas.cchs.csic.es/fluxpec/>) localizada en una dehesa de encina en Las Majadas del Tiétar (Cáceres) con uso ganadero intensivo. Esta dehesa presenta una cobertura arbórea media del 20%, y clima mediterráneo (572 mm de precipitación media anual y 16,7°C de temperatura media) (Figura 1). En la dehesa se encuentran instaladas tres torres de mediciones de flujos de agua y carbono por el sistema eddy-covariance (EC) incluidas en la red Fluxnet (<http://fluxnet.ornl.gov/site/440>). Las parcelas de seguimiento permanente se encuentran situadas en un radio de 500 m en torno a una de las torres EC. Durante el primer año de nuestro estudio se llevó a cabo un muestreo mensual en 10 encinas adultas, iniciándose el muestreo en abril de 2009. A partir del segundo año se seleccionaron 5 de ellas, representativas de los parámetros biofísicos estudiados. En el segundo año se mantuvo el muestreo mensual, reduciéndose la frecuencia de muestreo en los años posteriores a un muestreo estacional en los principales momentos del periodo vegetativo.



Figura 1. Localización del área de estudio en Las Majadas del Tiétar (Cáceres)

2.1. Mediciones en campo

En cada muestreo se adquirieron espectros de hoja intacta en 24 hojas/árbol: 12 de ellas del año en curso y 12 de años previos, obtenidas de los 4 cuadrantes de cada copa (tercio superior e inferior, orientación norte y sur). En cada hoja se midió el factor de reflectividad bi-cónico (BCRF) mediante un espectroradiómetro ASD Fieldspec 3® equipado con un Plant Probe y un Leaf Clip (www.asdi.com). Con anterioridad a las medidas radiométricas y en las mismas hojas, se realizaron mediciones de clorofila con el medidor Spad-502 (<http://www.konicaminolta.com>). Para finalizar se midió el peso fresco de todas las hojas muestreadas en cada árbol.

2.2. Análisis de laboratorio

En el laboratorio se determinó el peso seco a 65°C de las muestras obtenidas en campo. El área foliar se estimó mediante clasificación de las muestras escaneadas con una rutina del programa PCI (www.pcigeomatics.com). Para cada día de muestreo se generó una muestra foliar compuesta con material de todos los árboles muestreados para cada edad de hoja (año en curso y de años previos), en la que se llevaron a cabo los análisis foliares. En las

muestras foliares molidas y secas se determinó el contenido C y N por combustión seca en un analizador LECO modelo CN2000. Para el análisis del contenido de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, y Zn en hoja se llevó a cabo una digestión foliar con ácido nítrico en un sistema de digestión por microondas (Milestone, MLS 1200). La determinación de los nutrientes se llevó a cabo por ICP-OES en un equipo Perkin-Elmer, modelo Optima 2000. La clorofila se cuantificó mediante una ecuación de calibración de los valores medidos con Spad y realizada con extracciones de DMSO en caliente seguidas de medición espectrofotométrica, utilizando las ecuaciones de Wellburn (1994).

3. RESULTADOS

3.1. Variación temporal del comportamiento espectral y del contenido de nutrientes

El BCRF correspondiente a las hojas del brote anual presenta una tendencia decreciente a lo largo del periodo vegetativo en la región del visible y eje rojo con algunos máximos parciales en el periodo estival, que

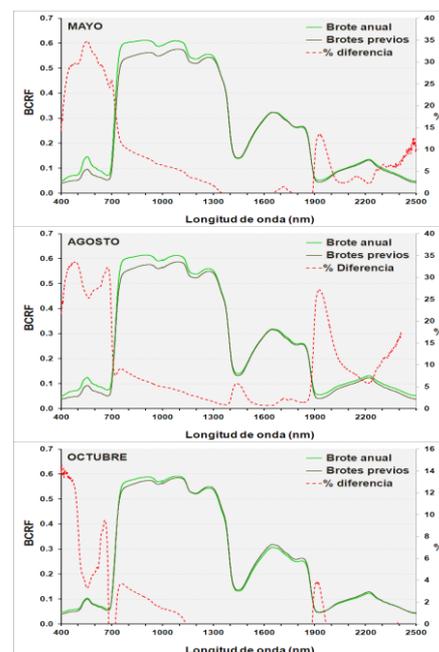


Figura 2. Evolución del BCRF de hoja intacta a lo largo del periodo vegetativo para las dos clases de edad de hoja en la copa ($N=60$ hojas/muestreo) y diferencia relativa de BCRF entre clases de edad de hoja

tienen lugar cuando el contenido de humedad foliar alcanza valores mínimos. En la región del infrarrojo cercano (NIR) se detecta sólo esta tendencia decreciente al final del periodo estival (Figura 2). Los rangos máximos de variación de BCRF en las hojas del año a lo largo del periodo vegetativo se localizaron en la región del eje rojo.

Las diferencias entre los espectros foliares para las dos clases de edad de hoja presentes en la copa (brote anual y previos) durante todo el periodo vegetativo son

significativas ($\alpha < 0,001$) en la región del visible (400-694 nm) y del NIR (730-1139 nm).

El patrón decreciente de reflectividad que tiene lugar durante el proceso de maduración y esclerofilización de la hoja, estuvo acompañado de un aumento en el área foliar específica, en el contenido de pigmentos foliares, y en las concentraciones foliares en peso seco de los elementos N, Ca, Mn y Fe, junto a una drástica disminución del K foliar. Otros nutrientes como el C, P, Mg y Zn sufren poca variación a lo largo del período vegetativo, sin una tendencia clara. Las hojas de años previos en la copa mantienen bastante estables las concentraciones de pigmentos y nutrientes alcanzadas al final del primer año de vida. Se encontraron diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) en las concentraciones foliares de nutrientes (en peso seco) entre las dos clases de edad de hoja a lo largo de todo el período vegetativo para los elementos N, P, K, Ca, Mn y Fe. Los contenidos foliares de nutrientes por unidad de superficie en las hojas del año en curso, presentan todos una tendencia creciente a lo largo del período vegetativo con excepción del K (decreciente) y el P que apenas varía. Las hojas de años anteriores, como ocurre también en su composición en peso seco, apenas sufren alteración en su composición química a lo largo del año.

3.2. Correlación entre variables foliares y datos espectrales

Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson a lo largo del dominio óptico para las concentraciones foliares expresadas en peso seco (g/kg a 65°C), por unidad de superficie en peso fresco (g/m²) y por unidad de superficie en peso seco (g/m² a 65°C). Las correlaciones más altas entre las variables estudiadas y la reflectividad se encontraron al analizar las variables expresadas en peso por unidad de superficie (g/m², 65°C). Estas últimas presentan correlaciones máximas en la región del visible (con un pico centrado en 550 nm), y del eje rojo (712-718 nm) para todas las variables estudiadas (Figura 3). K es el único nutriente que presenta correlaciones elevadas y positivas a lo largo de todo el dominio óptico con excepción de las dos zonas características de absorción de agua en el SWIR. Los coeficientes de correlación máximos corresponden a las concentraciones de N (R=-0,92), clorofila (R=-0,89), K (R=0,83), Mn (R=-0,79), C (R=0,76), Ca (R=0,68) y Fe (R=-0,65).

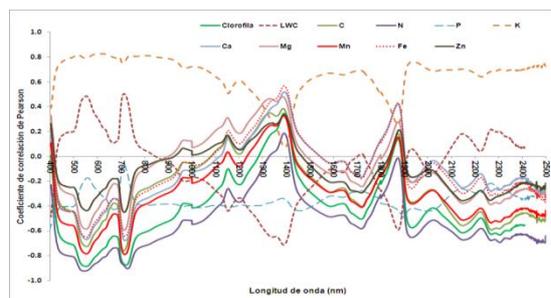


Figura 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables foliares y los valores de BCRF espectral a lo largo del período vegetativo

3.3. Estimación de variables foliares

Para las 11 variables estudiadas la regresión PLSR ofreció coeficientes de determinación superiores a la regresión SWR, con excepción del K y LMA (Tabla 1 y 2).

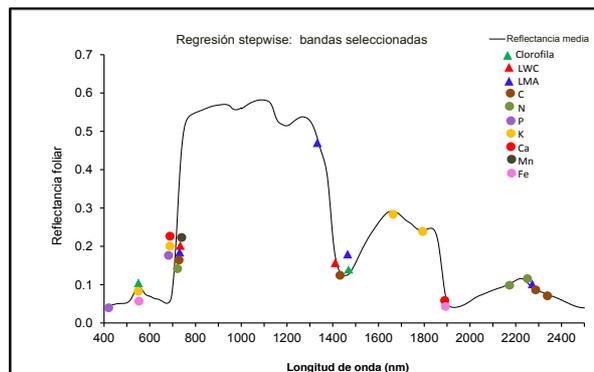


Figura 4. Bandas seleccionadas en la regresión stepwise para cada una de las variables bioquímicas estudiadas

Tabla 1. R², error cuadrático medio relativo (RRMSE) y RRMSE normalizado (NRMSE) para las variables bioquímicas estimadas por PLSR.

Variable	R ² %	RRMSE %	NRMSE %
K	0,97	5,3	4,2
Clorofila	0,96	3,6	5,8
Mn	0,93	8,3	8,3
LMA	0,90	4,2	8,1
LWC	0,89	4,7	7,8
Fe	0,85	11,3	11,9
P	0,84	10,4	8,7
Ca	0,76	13,0	13,9
N	0,71	6,0	12,8
Mg	0,60	7,0	17,1
Zn	0,54	11,7	17,9
C	0,34	1,2	23,0

Tabla 2. R², error cuadrático medio relativo (RRMSE) y RRMSE normalizado (NRMSE) para las variables bioquímicas estimadas por el método SWR.

Variable	R ² %	RRMSE %	NRMSE %
K	0,99	3,1	2,4
LMA	0,95	2,9	5,6
Clorofila	0,82	8,5	13,7
Fe	0,78	13,7	14,4
Ca	0,68	15,5	16,7
P	0,40	20,8	17,4
N	0,22	12,1	26,0
Mn	0,11	37,4	37,4
LWC	0,09	14,9	24,6
C	0,03	4,6	90,6

Mediante PLSR, se obtuvieron coeficientes de determinación superiores a 70% para todas las variables estudiadas a excepción de los elementos Mg, Zn y C. El error de calibración fue en general inferior en las regresiones PLSR con excepción del contenido en K (R²=0,99 %, RRMSE 3,1%) y LMA (R²=0,95, RRMSE 2,9%). Con la regresión SWR se obtuvieron modelos significativos ($\alpha < 0,05$) para todas las variables excepto para los contenidos foliares de Zn y Mg. En la figura 4 se

recogen las bandas seleccionadas en la regresión SWR para cada variable estimada. Aunque hay bandas seleccionadas a lo largo de todo el dominio óptico, un gran número se encuentra en la zona del eje rojo y en el SWIR.

4. DISCUSIÓN

Las mediciones de BCRF de hoja intacta capturaron los cambios morfológicos y bioquímicos que tienen lugar durante el proceso de maduración y esclerofilización de las hojas de encina. Las regiones espectrales más sensibles a las transformaciones durante el proceso de evolución de las hojas en la copa fueron el eje rojo, especialmente las bandas en el rango 700-721 nm, la región verde en el visible centrada en la banda de 550 nm y el SWIR. En estas bandas se encontraron las variaciones mayores entre clases de edad de las hojas y las correlaciones más altas con las variables estudiadas. La diversidad recogida a lo largo del período de muestreo debida a la variación interanual, inter-árbol y en el grado de maduración de las hojas, ha permitido desarrollar modelos significativos para todas las variables estudiadas con excepción de los contenidos foliares de Zn, Mg y C cuya variabilidad fue menor. La regresión PLSR ha proporcionado mejores estimaciones al utilizar el espectro completo para construir los modelos de predicción frente al método SWR.

El coeficiente de determinación obtenido para N foliar ($R^2=0,71$) es muy similar a los obtenidos en otros estudios con espectros de hoja intacta en especies forestales (Ourcival *et al.*, 1999, Asner *et al.* 2009). Mejoras en este ajuste para la estimación de N se alcanzaron mediante el pre-procesamiento de los espectros calculando la segunda derivada ($R^2= 0,95$ en Ourcival y Rambal, 1999) o trabajando con muestras foliares homogeneizadas molidas y secas ($R^2=0,97$ en Serbin *et al.* 2014).

Los ajustes obtenidos para los restantes macronutrientes (P, K, Ca y Mg) han sido superiores a los obtenidos por Richardson & Reeves (2005) en material foliar molido y seco en varias especies de coníferas. Las transformaciones que tienen lugar durante el proceso de maduración de las hojas de encina (engrosamiento de la epidermis, cutícula, y parénquima en empalizada, formación de tricomas), que van acompañadas por cambios en su composición química (incremento de componentes estructurales, ceras, contenido en proteína, carbohidratos, pigmentos y minerales) originan cambios de reflectividad foliar que permiten la estimación de contenidos foliares de nutrientes y pigmentos en las hojas intactas.

La determinación de estos parámetros foliares contribuirá a su estimación a nivel de copa y finalmente al escalado a nivel de ecosistema.

5. BIBLIOGRAFÍA

Asner, G.P., Martin, R.E., Ford, A.J., Metcalfe, D.J. & Liddell, M.J. 2009. *Leaf chemical and spectral diversity in Australian tropical forests*. Ecological Applications 19, 236-253.

Asner, G.P., Martin, R.E., Knapp, D.E., Tupayachi, R., Anderson, C., Carranza, L., Martínez, P., Houcheime, M., Sinca, F. & Weiss, P. 2011. *Spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests*. Remote Sensing of Environment 115, 3587-3598.

Ourcival, J.M., Joffre, R. & Rambal, S. 1999. *Exploring the relationships between reflectance and anatomical and biochemical properties in Quercus ilex leaves*. New Phytologist. 143,351-364

Pacheco-Labrador, J., González-Cascón, R., Martín, M.P. & Riaño, D. 2014. *Understanding the optical responses of leaf nitrogen in Mediterranean Holm oak (Quercus ilex) using field spectroscopy*. Int.J.Appl.Earth Obs.Geoinf. 26 (2014) 105–118

Richardson, A.D. & Reeves, J.B., 2005. *Quantitative reflectance spectroscopy as an alternative to traditional wet lab analysis of foliar chemistry: near-infrared and mid-infrared calibrations compared*. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 35, 1122-1130.

Serbin, S.P., Singh, A., McNeil, B.E., Kingdon, C.C. & Townsend, P.A. 2014. *Spectroscopic determination of leaf morphological and biochemical traits for northern temperate and boreal tree species*. Ecological Applications 24, 1651-1669

Wellburn, A. R. (1994). *The spectral determination of chlorophyll a and chlorophyll b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution*. Journal of Plant Physiology 144(3): 307-313