

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA JARA (*Cistus ladanifer*) A PARTIR RADIOMETRÍA DE LABORATORIO

David Riaño, Patrick Vaughan y Emilio Chuvieco

gargamel@sol.geogra.alcala.es

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

RESUMEN

Se analizan espectros de laboratorio correspondientes a hojas de jara (*Cistus ladanifer*), en el rango de 0,4 a 2,5 μm para distintos contenidos de humedad (FMC). La reflectividad disminuye en el infrarrojo cercano (IRC), debido no sólo a la pérdida de humedad sino también a la pérdida de cobertura, mientras que en el infrarrojo medio (IRM) la reflectividad no aumenta todo lo que debería por la pérdida de humedad sino que se ve enmascarada por la disminución en cobertura.

Palabras clave: Humedad, jara, reflectividad, teledetección.

SUMMARY

Spectral measurements in the range of 0.4 to 2.5 μm were acquired in the laboratory for leaves of rock rose (*Cistus ladanifer*), a typical Mediterranean species, with different moisture contents (FMC). Reflectivity decreases in the near infrared, due not only to moisture loss, but also the vegetation shrinkage, whereas in the mid infrared reflectivity does not increase as expected (considering its moisture loss), but rather, the effect is diminished because of the green cover reduction.

Key words: Moisture content, rock rose, reflectivity, remote sensing.

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LAS PLANTAS A PARTIR DE LA TELEDETECCIÓN

El contenido de agua en las plantas es uno de los aspectos críticos de su desarrollo fisiológico y resulta un parámetro clave para determinar condiciones de estrés hídrico. La estimación de esta variable mediante teledetección resulta de gran utilidad para la predicción de rendimientos agrícolas, abordar estimaciones de evapotranspiración regional

y determinar condiciones de riesgo de incendios, entre otros. La humedad disponible en la planta influye directamente en el crecimiento celular, la transpiración y la fotosíntesis.

Para que dicha estimación sea posible, resulta preciso estudiar con detalle los efectos del agua en la reflectividad de la hoja y de la planta, de cara a aislar las bandas más sensibles a la observación remota y determinar niveles de afectación críticos.

Algunos de los cambios que experimentan las plantas por variaciones de su FMC, son perceptibles mediante sensores remotos, ya que implican una modificación de la radiancia reflejada o emitida por la planta. La falta de agua implica modificaciones en el color de las hojas o en su morfología, como el rizado y enrollado o la caída de las hojas, así como en su temperatura. El problema estriba en si esas modificaciones del comportamiento espectral de la planta son suficientemente nítidas, de tal forma que permitan discriminar el contenido de agua de otros factores, como la contribución del suelo, de la morfología de la planta o de la atmósfera. Sobre este punto ha habido diversas posturas en los últimos años. Algunos autores concluyen que el contenido de agua no supone una modificación sensible de la reflectividad (Hunt y Rock, 1989; Cohen, 1991b), mientras otros obtienen buenas correlaciones en estudios empíricos (Westman y Price, 1988; Cibula *et al.*, 1992). Sí parece haber mayor acuerdo sobre el efecto de la humedad en la temperatura de las hojas (Jackson, 1986; Moran *et al.*, 1994).

RANGOS ESPECTRALES ASOCIADOS CON EL CONTENIDO DE AGUA

Brevemente se analiza el efecto de la variación en el contenido de humedad sobre la respuesta espectral de distintas especies.

Visible (VIS): Como es sabido, las hojas absorben la mayor parte de la energía incidente en las bandas visibles (0,4 – 0,7 μm). La baja reflectividad en el azul y el rojo se atribuye normalmente a la absorción por la clorofila y otros pigmentos accesorios. La clorofila, los carotenos y las xantofilas absorben radiación a 0,445 μm , pero sólo la clorofila absorbe en el rojo (alrededor de 0,645 μm) (Gates *et al.*, 1965). El pico del verde se produce por una carencia relativa de absorción por estos pigmentos, lo que proporciona el color verde de las plantas que percibe nuestra vista. Este efecto puede estar enmascarado por el agua (Thomas *et al.*, 1971), debido a que la reflectividad en el VIS es más alta, entre otras

razones por la dispersión Rayleigh (Gates, 1980). Es decir, la pérdida de agua provoca la actuación de dos factores en direcciones contrarias, aumenta la reflectividad, por un lado, por la pérdida de funcionalidad de la clorofila y disminuye, por otro, al disminuir el propio contenido de humedad. Según dominan unos u otros factores, por el tipo de estudio y por el tipo de hoja, se produce una tendencia u otra, aunque lo más normal es un ligero aumento (Everitt y Nixon, 1986; Carter, 1991) o el mantenimiento prácticamente constante de la reflectividad con la pérdida de la humedad (Bowman, 1989; Hunt y Rock, 1989).

Infrarrojo cercano (IRC): La alta reflectividad de la vegetación en esta banda del espectro se ha asociado tradicionalmente al estado de vigor de la planta, la proporción de cobertura verde y su buen estado foliar. Al modificarse el contenido de agua de la planta se producen dos efectos que, si bien son patentes en las demás bandas del óptico, aquí son especialmente cruciales. Por un lado, las modificaciones en la reflectividad debidas al propio contenido de agua; por otro, las debidas a la pérdida de vigor vegetal que implica el deterioro hídrico de la planta: senescencia, pérdida de área foliar, deterioro de la estructura, que afectan principalmente a la planta en su conjunto. Se puede decir que el contenido de agua *per se* implica una ligera reducción de la reflectividad, luego en el IRC la hoja seca tenderá a presentar un mayor reflectividad que la húmeda. Por el contrario, la planta en su conjunto deteriora su actividad fisiológica al llegar a extremos de tensión hídrica, implicando en esos casos una notable reducción de la reflectividad en esa banda. Conviene tener en cuenta que la alta reflectividad de las hojas en el IRC (entre 0,7 y 1,3 μm) se debe a su estructura celular interna (Knipling, 1970). Al irse perdiendo agua en las hojas, hay más superficies de contacto entre paredes de celdas húmedas y cavidades de aire intercelulares, por lo que tienden a aumentarse las reflexiones y refracciones múltiples (Vogelmann y Björn, 1984), incrementándose, aunque ligeramente, la reflectividad. Más aún, cuando las hojas se acercan a la pérdida total de humedad la reflectividad es incluso mayor debido a que el índice de refracción de los materiales celulares secos es mayor que el de las células hidratadas (Carter, 1991). Este efecto se ha comprobado en análisis de laboratorio sobre hojas aisladas (Hunt *et al.*, 1987, Hunt y Rock, 1989). Otros autores no observan cambios significativos en esta banda (Carter, 1991), mientras un tercer grupo detecta una reducción de la reflectividad, comprobada para hojas de pino y secuoya (Westman y Price, 1988). Esta disminución parece más claramente debida a los efectos

secundarios de la pérdida en el contenido de humedad.

Infrarrojo medio óptico (SWIR): La polémica sobre el efecto del contenido de agua en la reflectividad del IRC se desvanece en la región del medio (entre 1,6 y 2,4 μm), ya que aquí es unánime la observación de una relación inversa entre contenido de agua y reflectividad. Los efectos se observan tanto para una hoja (Ripple, 1986; Hunt y Rock, 1989; Cohen, 1991b), como para el conjunto de la planta (Tucker, 1980; Jackson y Ezra, 1985; Westman y Price, 1988). La respuesta de la vegetación en estas longitudes de onda está dominada por la fuerte absorción del agua.

Hasta el momento, los análisis de reflectividad se han venido realizando de muy diversas maneras. Son más abundantes los análisis en laboratorio para hojas individuales (Thomas *et al.*, 1971; Bowman, 1989; Cohen, 1991b), aunque también existen estudios de laboratorio con grupos de hojas (Ripple, 1986). La radiometría de campo también se ha empleado en varios estudios (Everitt y Nixon, 1986; Cibula *et al.*, 1992). El análisis utilizando bandejas con hojas puede servir de puente de unión para comparar los resultados de la radiometría de campo y del análisis de hojas individuales (Ripple, 1986). Además, esta metodología es más cercana a lo que finalmente observa el satélite, ya que se puede ver el efecto de la cobertura y de los cambios en la geometría.

OBJETIVOS

Los objetivos planteados en este trabajo fueron los siguientes:

- Estudiar la evolución de la reflectividad con respecto al FMC.
- Comprobar la influencia del suelo (fondo negro) en la curva de reflectividad.

METODOLOGÍA

Para obtener los espectros de laboratorio de diferentes contenidos de humedad en especies mediterráneas, se realizó un muestreo de campo en el Parque Nacional de Cabañeros, que estamos utilizando como área de estudio para la calibración de modelos de FMC a partir de imágenes de satélite. La especie recolectada para este caso fue la jara (*Cistus ladanifer*), por su representatividad en el ámbito mediterráneo.

Las hojas se almacenaron en hielo hasta su traslado al laboratorio. Allí se colocaron las hojas en una bandeja negra, recubierta de papel carbón, en

cuatro capas, con el haz mirando al radiómetro y cubriendo completamente el campo de visión de éste. Las mediciones de reflectividad se realizaron verticalmente (ángulo de observación 90°), tomando, antes de cada medida, la reflectividad de un blanco de referencia rigurosamente calibrado (*Spectralon Reflectance Target, Sample I.D.: SRT-99-050*). Después de la primera medición, las bandejas fueron pesadas e introducidas en un horno a 60° C para su desecación (temperaturas más elevadas provocan que se evaporen también las esencias). A los 30 minutos, se extrajeron del horno, se pesaron y se midió de nuevo la reflectividad. El proceso se repitió hasta que el peso se mantenía constante, lo que implicaba que las hojas estaban completamente secas. El contenido de humedad de cada muestra analizada se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$FMC(\%) = \left(\frac{P_f - P_s}{P_s} \right) * 100$$

Donde P_f es el peso fresco de la muestra (el medido en cada adquisición) y P_s es el peso seco (el obtenido al final del proceso). El resultado se expresa en tanto por ciento de peso seco.

Las medidas de reflectividad se realizaron con el espectroradiómetro GER2100, que realiza espectros continuos de 140 bandas en el rango de 0,4 a 2,5 μm . La resolución espectral de este aparato es de 0,01 μm en el VIS e IRC (hasta 1 μm) y de 0,024 μm en el rango de 1 a 2,5 μm . Si bien el radiómetro resulta bastante preciso, se detectaron ruidos esporádicos en algunas bandas del infrarrojo medio óptico, por lo que, siguiendo una práctica habitual en espectrometría, se aplicaron algunos filtros a las medidas originales: eliminación de valores negativos y superiores a 1 y cálculo de medias móviles en intervalos de 3 valores.

Las medidas de reflectividad se recogen en ángulos verticales, fijando el espectroradiómetro en un trípode con un preciso sistema de nivelado. La fuente de iluminación fue un foco de 1000 W a 1m de distancia con una proyección a la bandeja de 45°.

RESULTADOS

Los resultados se muestran en la figura 1. Puede observarse que el VIS apenas sufre variaciones de reflectividad con la desecación de la hoja. Por su parte, se reduce la reflectividad en el IRC, aparentemente por un doble efecto: por un lado, por el propio secado de la hoja; por otro, como consecuencia del curvado de las hojas al secarse, lo que disminuye el área foliar y provoca una mayor

influencia del fondo (en nuestro caso, del negro, por lo que disminuye la reflectividad más de lo que debiera). En el SWIR, la reflectividad aumenta ligeramente, menos de lo que cabría esperar al secarse las hojas, por la mayor contribución del negro. En este caso el efecto es antagónico.

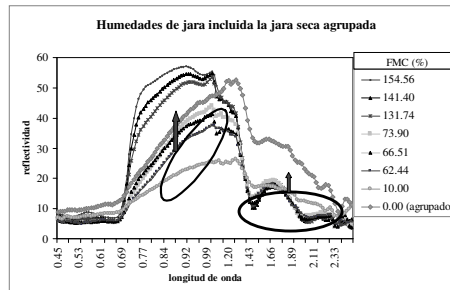


Figura 1.- Reflectividades de la jara para distintos contenidos de humedad.

La figura 2 muestra cómo la pérdida de reflectividad en el IRC e SWIR está influenciada por la disminución en la cobertura. Al secarse las hojas disminuye el área foliar (jara dispersa) con lo que la señal es una mezcla de la reflectividad de la jara y del propio fondo (en nuestro caso de color negro).

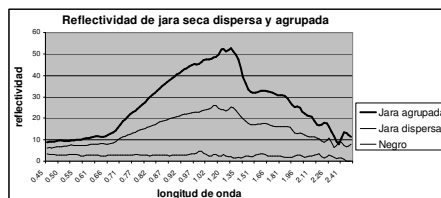


Figura 2.- Comparación entre la reflectividad de la jara agrupada (con un área foliar que cubre totalmente el campo de visión del sensor), la jara dispersa (viéndose el fondo), y el propio fondo (negro).

BIBLIOGRAFIA

- Bowman, W. D. (1989). The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing of Environment* 30: 249-255.
- Carter, G. A. (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany* 78: 916-924.
- Cibula, W. G., E. F. Zetka y R. D.L. Rickman (1992). Response of Thematic Mapper

bands to plant water stress. *International Journal of Remote Sensing* 13: 1869-80.

Cohen, W. B. (1991a). Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57: 195-202.

Cohen, W. B. (1991b). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1865-1876.

Danson, F. M., M. D. Steven, T. J. Malthus y J. A. Clark (1992). High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing* 13: 461-470.

Everitt, J. H. y P. R. Nixon (1986). Canopy Reflectance of two drought-stressed shrubs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52: 1189-1192.

Gates, D. M. (1980). *Biophysical Ecology*. New York - Heidelberg - Berlin, Springer-Verlag.

Gates, D. M., H. J. Keegan, J. C. Schleter y V. R. Weidner (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4: 11-20.

Hunt, E. R. y B. N. Rock (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* 30: 43-54.

Hunt, E. R., B. N. Rock y P. S. Nobel (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment* 22: 429-435.

Jackson, R. D. (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology* 24: 265-87.

Jackson, R. D. y C. E. Ezra (1985). Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal Remote Sensing* 6: 177-185.

Knipling, E. B. (1970). Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.

Moran, M.S., T.R. Clarke, Y. Inoue y A. Vidal (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral

vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49: 246-263.

Ripple, W. J. (1986). Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52: 1669-1675.

Thomas, J. R., L. N. Namken, G. F. Oerther y R. G. Brown (1971). Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agronomy Journal* 63: 845-847.

Tucker, C. J. (1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment* 10: 23-32.

Vogelmann, T. C., y L.O. Björn (1984). Measurement of light gradients and spectral regime in plant tissue with a fiber optic probe. *Physiologia Plantarum* 60: 361-368.

Westman, W. E. y C. V. Price (1988). Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26: 11-20.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto Megafires (ENV-CT95-0256) del Programa de la Comisión Europea Medio Ambiente y Clima (DG-XII). También se obtuvo financiación de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (AGF96-2094-CE). Deseamos expresar nuestro agradecimiento a las autoridades del P.N. de Cabañeros por las facilidades otorgadas en la realización de nuestros ensayos de campo.