

DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO Y CALIDAD DE FRUTO EN CULTIVOS MEDIANTE EL ÍNDICE PRI A PARTIR DE IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL

L. Suárez (*), P.J. Zarco-Tejada (*), V. González-Dugo (*), J. A. J. Berni (*), E. Fereres (*) (**).

(*) Instituto de Agricultura Sostenible. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAS-CSIC).

(**) Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba.

RESUMEN

Una aplicación reciente del *Photochemical Reflectance Index* (PRI) es la detección de estrés hídrico en cultivos. Sin embargo, un uso correcto del PRI requiere modelizar a nivel de hoja y cubierta aquellos parámetros que tienen gran influencia en la reflectancia. El presente trabajo propone una metodología basada en modelos de transferencia radiativa (TR) que simulan el “PRI teórico” para determinar su valor en ausencia de estrés. Los experimentos se realizaron en frutales con distintos tratamientos de riego. Las imágenes multiespectrales (6 bandas, 10 nm FWHM y 15 cm de resolución) se obtuvieron en 2007 y 2008 usando un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Los resultados muestran relaciones entre PRI y temperatura de cubierta de $r^2=0.8$ y 0.65. Los tratamientos deficitarios mostraron valores de PRI superiores al teórico, mientras que los árboles bien regados mantuvieron siempre valores de PRI alrededor del nivel teórico. Estos resultados indican que usando modelos TR para considerar los efectos de la estructura de la cubierta, el índice PRI es un buen indicador de estrés hídrico.

ABSTRACT

The Photochemical Reflectance Index has been recently suggested as a pre-visual water stress indicator in crops. Nevertheless, modelling at leaf and canopy scale is required to account for structural effects on the reflectance, and to use PRI correctly for mapping purposes. The methodology presented is based on radiative transfer models (RTM) to obtain a “theoretical PRI” which indicates a reference value for non-stress level. The experiments were located in two commercial orchards where different irrigation treatments were applied. Multispectral imagery (6 bands, 10 nm FWHM, 15 cm spatial resolution) were acquired over the experimental fields in 2007 and 2008 from an UAV platform. Results showed relationships between PRI and crown temperature ($r^2=0.8$). Water stressed trees showed higher PRI than the non-stress simulated PRI value, while full-irrigated trees presented PRI values around or below the simulated value. We can conclude that using RTM, PRI is a good water stress indicator.

Palabras clave: estrés hídrico, PRI, UAV, inversión de modelos, modelos TR, RTM.

INTRODUCCIÓN

El índice PRI fue propuesto por Gamon *et al.* (1992) como indicador del estado de deepoxidación de las xantófilas, relacionado con los procesos fotosintéticos. Este índice se ha usado para el estudio de la *eficiencia del uso de la luz* (LUE), procesos fotosintéticos y, más recientemente, estrés hídrico en cultivos (Thenot *et al.*, 2002 y Winkel *et al.*, 2002). La sensibilidad de PRI al estrés, sin embargo, se ve enmascarada en zonas donde hay variabilidad de la estructura vegetal, contenido clorofílico y materia seca en hojas (Barton and North, 2001; Suárez *et al.*, 2008). El uso de modelos de transferencia radiativa es crítico para entender la influencia de la estructura vegetal, el tipo de suelo y la posición solar en la reflectancia, y por lo tanto en el índice, de esta manera representando mapas de grados de estrés de una manera adecuada en zonas heterogéneas. Este trabajo presenta una metodología para simular las condiciones de ausencia de estrés

mediante modelos de transferencia radiativa de hoja y cultivo. El valor de referencia de PRI para condiciones de “no estrés” permite utilizarlo como indicación del estrés del cultivo de las parcelas experimentales. Esta metodología ha sido validada para dos tipos de cultivos arbóreos: olivo y melocotonero. El método evalúa la diferencia entre el PRI adquirido de la imagen y el PRI teórico obtenido con modelo RT como indicador del nivel de estrés a nivel de copa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zonas de estudio

Las zonas de estudio están situadas en Córdoba (España). La primera es un olivar (*Olea europaea* L. cv. “Arbequino”) de 4 hectáreas plantado en 1997 con un marco de plantación de 3x7 m. El riego por goteo aplicado permitió la aplicación de distintos tratamientos de riego. El experimento se diseñó para un bloque de 6 líneas de

9 árboles con tres tratamientos distintos de riego: (i) aplicación constante de 2.8 mm/día durante la estación de riego (riego suficiente para satisfacer las necesidades hídricas de los árboles), (ii) caudal de 0.7 mm/día (tratamiento deficitario 1), y (iii) combinación de un riego deficitario con caudal de 1.2 mm/día y aplicación intermitente durante la estación de riego. La segunda zona de estudio es una plantación comercial de melocotoneros (*Prunus persica* cv. "BabyGold8") plantados en 1990 en un marco 5x3.3 m. El experimento consistió en un área de 6 líneas de 30 árboles cada una regados de manera diferente al resto de la parcela (RDC). La explotación se regó desde mediados de mayo con una dosis equivalente al 80% de la ET del cultivo, mientras que los árboles del experimento comenzaron a regarse en la fase III del crecimiento del fruto (principios de julio) con el doble de caudal hasta que su potencial hídrico se igualó al resto de la parcela.

Datos de campo

La conductancia estomática a nivel de hoja y el potencial hídrico de tallo se midieron con un porómetro (modelo SC-1, Decagon Devices, Washington, DC, USA) y una bomba de presión Scholander (PWSC Model 3000, Soil Moisture Equipment Corp., California) respectivamente. La reflectancia de hoja se midió también en el momento de los vuelos con un espectrómetro de campo ASD (FieldSpec Handheld Pro, ASD Inc., CO, USA) con una pistola de hoja.

Imágenes

El sensor hiperespectral AHS (Airborne Hyperspectral Scanner), desarrollado por Sensytech Inc. (Argon St. Inc., USA), perteneciente al Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales (INTA) sobrevoló la primera zona de estudio en 2 campañas los veranos de 2004 y 2005. Con este sensor se tomaron 6 imágenes correspondientes a 3 horas distintas en ambos años (7:30, 9:30 y 12:30 GMT el 25 de julio de 2004 y el 16 de julio de 2005). La altura de vuelo fue de 1000 m con un ángulo de visión de 90° y un ángulo de visión instantáneo de 2.5 mrad, dando una resolución espacial final de 2m. En la campaña de 2004, la información espectral se obtuvo en 38 bandas en los intervalos de longitud de onda 0.430-1.550 μm y 8.20-12.70 μm. En 2005 el vuelo se realizó con 80 bandas en las regiones 0.430-2.49 μm y 8.20-12.70 μm del espectro. Las correcciones atmosférica y radiométrica se llevaron a cabo según Sobrino *et al.* (2006).

En los veranos de 2007 y 2008, se usó una cámara multispectral de 6 bandas (MCA-6, Tetracam, Inc., California, USA) a bordo de un

vehículo aéreo no tripulado (UAV) volando a 150 m (Berni *et al.*, 2009) para adquirir imágenes de las 2 zonas de estudio. Las características de los sensores y las imágenes obtenidas, así como las calibraciones aplicadas en ambos años de campaña están descritas en Berni *et al.* (2009) y Suárez *et al.* (2009). Las bandas usadas en cada vuelo estaban centradas en 530, 550, 570, 670, 700 y 800 nm usadas para calcular los índices PRI (Gamon *et al.*, 1992), TCARI/OSAVI (Haboudane *et al.*, 2002) y NDVI (Rouse, 1974). La cámara térmica instalada a bordo del UAV fue la Thermovision A40M (FLIR, USA). Las características de la cámara, imágenes adquiridas y posterior proceso de calibración se pueden encontrar en Berni *et al* (2009).

Modelos de Transferencia Radiativa

Las simulaciones se llevaron a cabo con los modelos de transferencia radiativa a nivel de hoja PROSPECT (Jacquemoud and Baret, 1990) y a nivel de cubierta FLIGHT (North, 1996) para ambas zonas de estudio. El modelo tridimensional FLIGHT se usó para simular diferentes escenarios que permitió estudiar la influencia del suelo, índice de área foliar y posición solar en el índice PRI. También se modelizó a escala de hoja la absorción debida a las xantófilas usando los espectros de una hoja en estrés hídrico y otra proveniente de un árbol bien regado. Los modelos PROSPECT y FLIGHT se utilizaron para invertir a nivel de parcela los espectros de copa extraídos de las imágenes multiespectrales. La inversión se llevó a cabo usando *look-up-tables* creadas independientemente para cada cultivo y condiciones de adquisición de imagen. Los parámetros de entrada de las simulaciones fueron fijados con valores publicados para melocotonero (Kempeneers *et al.*, 2007) y olivo (Zarco-Tejada *et al*, 2004), dejando el índice de área foliar y la clorofila libres para ser invertidos (Suárez *et al.*, 2009). Los espectros correspondientes a cada copa fueron extraídos independientemente y su valor de PRI comparado con el PRI calculado a partir del espectro resultante de la inversión con los modelos de transferencia radiativa PROSPECT-FLIGHT (SPRI).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El índice PRI obtenido a escala de copa para melocotonero y olivar presentó una alta correlación con la temperatura de copa (Figura 1), demostrando la relación existente entre la detección del estado hídrico mediante PRI y los niveles de transpiración detectados mediante el térmico. El tipo de suelo, la posición solar y el índice de área foliar resultaron tener gran influencia en los valores de PRI para cultivos heterogéneos a alta y baja

resolución espacial. (Figura 2). Una vez realizado el análisis de la influencia de parámetros estructurales y suelo en el índice PRI, se concluyó la necesidad del uso de modelos de transferencia radiativa para caracterizar los efectos externos sobre el índice. Dichos efectos estructurales enmascaran el efecto de la absorción debida a las xantofilas si no son modelizados apropiadamente.

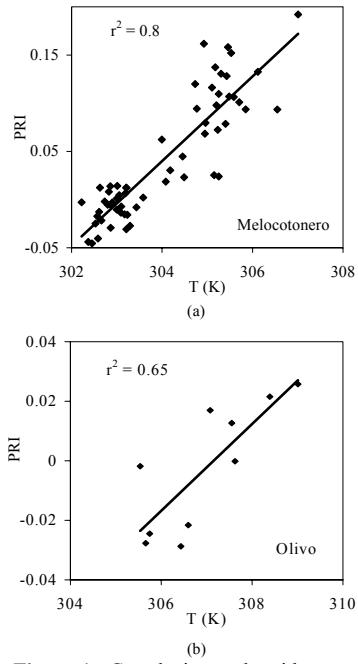


Figura 1.- Correlaciones obtenidas entre PRI y T para melocotonero y olivar.

El resultado de aplicar la metodología basada en modelos de transferencia radiativa para simular un valor de PRI correspondiente a la situación de ausencia de estrés puede observarse en la Figura 3 para melocotonero y olivar. En ambos casos los árboles bien regados se situaron alrededor o bajo la línea de sPRI, mientras los árboles con riego deficitario se situaron por encima de dicha línea.

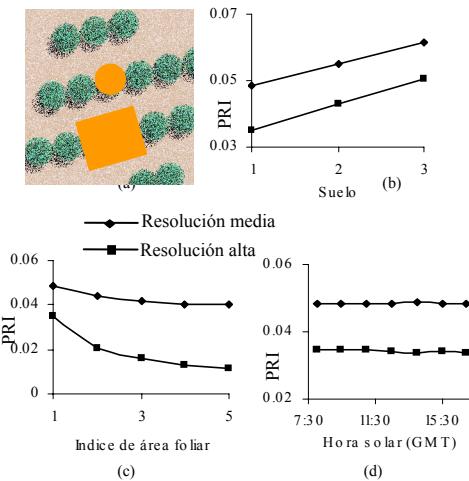


Figura 2.- Resolución espacial en la que se extrajo la reflectancia simulada con el modelo (a) para ver el efecto sobre el PRI del tipo de suelo (b), índice de área foliar (c) y posición solar (d).

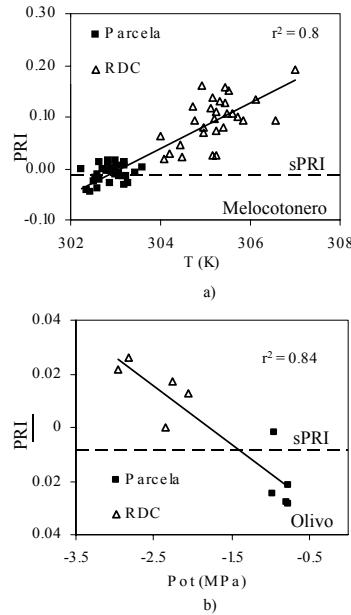


Figura 3.- (a) Línea de sPRI para melocotonero sobre la correlación de PRI con temperatura de copa, (b) Correlación de potencial hídrico de tallo y PRI para olivar junto con la representación del sPRI.

CONCLUSIONES

El efecto de factores externos como el suelo, índice de área foliar y posición solar sobre el índice PRI requieren del uso de modelos TR para el correcto uso del índice como indicador de estrés pre-visual. La metodología presentada para detección de estrés mediante el índice PRI y modelos TR ha sido validada para dos tipos de cultivos arbóreos. Estos resultados indican que usando modelos TR, el PRI es un buen indicador de estrés hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

- Barton, C.V.M. & North, P.R.J. 2001. Remote Sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index. Model and analysis. *Remote Sensing Environment*, 78, 264, 273.
- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suarez, L., Fereres, E. Thermal and Narrow-band Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. (In press). *IEEE Geoscience Remote*, December, 2008.
- Gamon, J.A., Peñuelas, J. & Field, C.B. 1992. A narrow-wave band spectral index that track diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing Environment* 41, 35-44.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. & Dextraze, L. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing Environment* 84 (2-3), 416-426.
- Jacquemoud S. and Baret F. 1990, PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra, *Remote Sensing Environment* 34:75-91.
- Kempeneers, P., P.J. Zarco-Tejada, P.R.J. North, S. De Backer, S. Delalieux , G. Sepulcre-Cantó, F. Morales, J.A.N. Van Aardt, R. Sagardoy, P. Coppin, P. Scheunders, Model inversion robustness under changing viewing conditions for chlorophyll estimation from hyperspectral imagery. *International Journal Remote Sensing* (in press, April 2007).
- Moriana, A., Pérez-López, D., Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Olmedilla, N., Ribas, F., Fregapane, G. 2007. Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics. *Agriculture Water Manage* (87). 171-179.
- North, P.R.J. 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a montecarlo method. *IEEE T Geosci Remote* 34 (5), 946-956.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. & Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancements & retrogradation of natural vegetation. *NASA/Gsfc Final Report*. Ed. MD, U.G., p. 371.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G. and de Miguel, E. 2006. Land Surface Temperature derived from Airborne Hyperspectral Scanner Thermal Infrared data. *Remote Sensing Environment*, 102, 99-115.
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J. 2008. Assessing Canopy PRI For Water Stress Detection With Diurnal Airborne Imagery. *Remote Sensing Environment*, 112, 560-575.
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., González-Dugo, V., Fereres, E., 2009. Modelling PRI for Water Stress Detection using Radiative Transfer Models. *Remote Sensing Environment* 113. p. 730-744.
- Thenot, F., Méthy, M. & Winkel, T. 2002. The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *International Journal Remote Sensing*, 23(23), 5135-5139.
- Winkel, T., Méthy, M. & Thénot, F. 2002. Radiation use efficiency, chlorophyll fluorescence , and reflectance indices associated with ontogenetic changes in water-limited Chenopodium quinoa leaves. *Photosynthetica*, 40(2), 227-232.
- Zarco-Tejada, P.J., Miller J.R., Morales A., Berjón A., & Agüera J. 2004 Hyperspectral Index & Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops, *Remote Sensing Environment*, 90(4), 463-476.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda financiera del MCI para los proyectos AGL2005-04049, EXPLORA-INGENIO AGL2006-26038-E/AGR, CONSOLIDER CSD 2006-67, y AGL2003-01468, y de Bioibérica a través del proyecto PETRI PET2005-0616. Así como el apoyo técnico de UAV Navigation y Tetracam Inc. También a M. Morales, C. Ruz, G. Sepulcre-Cantó, D. Notario, M. Guillén, C. Trapero, I. Calatrava, A. Vera y M. Ruiz Bernier por su ayuda con las medidas, apoyo técnico en campo y en las campañas de vuelos.