

ESTIMACIÓN DE CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA Y DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO EN VEGETACIÓN MEDIANTE IMÁGENES TÉRMICAS DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL OBTENIDAS CON UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV)

J. A. J. Berni (*), P. J. Zarco-Tejada (*), G. Sepulcre-Cantó (*), E. Fereres (*) (**) y F. J. Villalobos (*) (**).

(*) *Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Córdoba, pzarco@ias.csic.es*

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

RESUMEN

El presente trabajo muestra una metodología para la cuantificación de la conductancia estomática en olivar, a escala de árbol, y su aplicación para la detección de estrés hídrico, utilizando para ello imágenes térmicas de una resolución espacial menor de 0.5 m obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV). La alta resolución espacial permite separar los distintos componentes que intervienen en el balance de energía y por lo tanto obtener la temperatura pura de la vegetación sin agregación espacial. El modelo desarrollado utiliza variables meteorológicas medidas in situ (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar) y otras variables que se determinan mediante modelos físicos (transmisividad atmosférica, radiación de onda larga, albedo y resistencia aerodinámica). Para validar la metodología propuesta, se midió la conductancia estomática foliar simultáneamente a la obtención de las imágenes térmicas. Los resultados obtenidos para la validación mostraron un *RMSE* de 1.65 mm/s y $r^2=0.91$, lo cual sugiere que la metodología propuesta es válida para la cuantificación de conductancia estomática mediante teledetección térmica de alta resolución espacial. Esta metodología también permite estimar de forma analítica un indicador normalizado de estrés hídrico (el índice *CWSI*), siempre y cuando se conozca la conductancia estomática potencial para la especie y condiciones ambientales. El *CWSI* se correlacionó con el potencial hídrico foliar medido en el momento del vuelo ($r^2=0.82$), lo que demuestra la viabilidad del uso de *CWSI* calculado mediante esta metodología para cuantificar el estrés hídrico en olivar.

ABSTRACT

This manuscript presents a methodology to estimate the stomatal conductance in olive orchards at the tree level for water stress detection. It is based on the use of high resolution thermal imagery (better than 0.5m) obtained by means of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The high spatial resolution acquired enables the retrieval vegetation temperature without spatial aggregation and thus separating the different components of the energy balance. The model presented here uses field measured meteorological variables (air temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation) while other variables are estimated by means of physical models (atmospheric transmissivity, longwave radiation and aerodynamic resistance). In order to validate the methodology, stomatal conductance was measured simultaneously to the image acquisition. The validation results show a root mean squared error (*RMSE*) of 1.65mm/s and $r^2=0.91$, which suggests that the proposed model is valid to quantify the canopy conductance with high spatial resolution thermal imagery.

Additionally, this methodology allows estimating analytically the Crop Water Stress Index (*CWSI*) if the potential canopy conductance is known or can be modelled for given species or ambient conditions. *CWSI* was correlated with leaf water potential measured at the time of the flight ($r^2=0.82$) suggesting that the *CWSI* calculated with this methodology can be used to track water stress in olive orchards.

Palabras clave: estrés hídrico, conductancia, *CWSI*, UAV, térmico, olivo.

INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico en vegetación provoca un cierre estomático y por lo tanto una reducción en la tasa de transpiración que se traduce en un incremento de la temperatura de la cubierta vegetal. Este aumento de temperatura puede ser monitorizado mediante teledetección en el térmico y

su uso ha sido demostrado en olivar (Sepulcre-Cantó et al., 2006).

Sin embargo, dada la influencia que en la temperatura de la cubierta tienen otros factores ambientales, se hace necesaria una normalización. Un ejemplo es el desarrollo del *Crop Water Stress Index* (*CWSI*) por Idso (1981) que normaliza los

valores de temperatura para distintas condiciones ambientales (principalmente el déficit de presión de vapor) y que proporciona un valor de 0 a 1 dependiendo del nivel de estrés. Otra posibilidad es la estimación de la conductancia estomática de la cubierta aplicando un balance de energía o mediante el uso de superficies de referencia (Jones, 1999). El problema es que en cultivos discontinuos es necesaria alta resolución espacial para poder obtener la temperatura de la vegetación sin influencia del suelo, lo que actualmente sólo se podía conseguir con sensores aerotransportados. Las limitaciones en términos de coste y operatividad que tienen este tipo de sensores se podría ver superada con el desarrollo de plataformas de teledetección basadas en vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipadas con sensores térmicos de alta resolución espacial (Berni et al. 2009).

Esta comunicación presenta una metodología para la estimación de la conductancia estomática y *CWSI* a partir de imágenes térmicas de alta resolución espacial obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado. Dicha metodología permite la creación de mapas de conductancia y estrés hídrico que podrían tener un gran interés en aplicaciones agrícolas como la programación de riegos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio está situada en Córdoba (España) y es un olivar (*Olea europaea* L. cv. "Arbequino") de 4 hectáreas con un marco de plantación de 3x7 m con las filas orientadas al Norte. En dicha parcela se llevó a cabo un experimento de riego deficitario controlado (RDC), diseñado en bloques de 6 líneas de árboles con tres tratamientos distintos de riego (Testi et al., 2004): (i) aplicación constante de 2.8 mm/día durante la estación de riego (riego suficiente para satisfacer las necesidades hídricas de los árboles, tratamiento control R), (ii) caudal de 0.7 mm/día (tratamiento deficitario S1), y (iii) combinación de un riego deficitario con caudal de 1.2 mm/día y riego intermitente durante la estación de riego (tratamiento deficitario S2).

La conductancia estomática foliar y el potencial hídrico de tallo se midieron con un porómetro (modelo PMR-4, PP Systems, Hitchin Herts, Gran Bretaña) y una bomba de presión Scholander (PWSC Model 3000, Soil Moisture Equipment Corp., California, Estados Unidos) respectivamente, coincidiendo con la hora del vuelo del UAV el 23 de agosto de 2007. Así mismo se midió la temperatura del aire (T_a), humedad relativa

(Hr) y velocidad de viento con una estación meteorológica portátil Vaisala WXT-501 localizada junto a la zona de estudio.

El 23 de agosto de 2007 se tomó un conjunto de imágenes térmicas utilizando un vehículo aéreo no tripulado equipado con un sensor térmico Thermovision A40M (FLIR, USA). Las características del sistema y los detalles del posterior proceso de corrección atmosférica y geométrica se pueden encontrar en Berni et al (2009). La altura de vuelo fue de 150 m sobre el suelo, lo que proporcionó imágenes de 40 cm de resolución espacial. Dicha resolución permitió obtener imágenes en las que se pudo separar la temperatura de las copas individuales, evitando la mezcla de temperaturas de suelo y vegetación en cada píxel (Fig 1). De esta forma se asume que es posible separar el flujo de energía de la vegetación del resto de flujos provenientes del suelo.

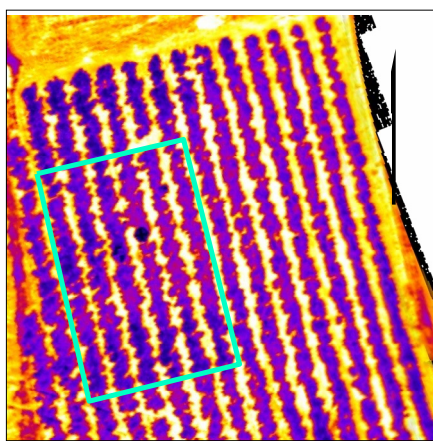


Figura 1.- Imagen térmica adquirida con el UAV sobre la zona de estudio (rectángulo). La resolución espacial permite distinguir las copas individuales.

Modelo de Estimación de Conductancia y *CWSI*

El modelo aquí presentado está basado en la estimación residual del calor latente (LE) a partir de la ecuación del balance de energía. El calor sensible (H) se puede determinar a partir de la diferencia de la temperatura la cubierta y del aire ($T_c - T_a$) siempre y cuando conozcamos la resistencia aerodinámica (r_a). Despreciando el calor acumulado en el suelo (G) para el caso de vegetación pura y si conocemos la radiación neta (R_n), es posible obtener LE y despejar la resistencia de la cubierta al intercambio de agua (r_c , Ecuación 1) o la conductancia aerodinámica como su inversa (Smith, 1988).

$$r_c = \frac{r_{alt}(e_c^* - e_a)}{\gamma \left(\frac{r_{alt} R_n}{\rho C_p} - (T_c - T_a) \right)} - r_a$$

La radiación neta se puede medir usando un radiómetro neto sobre la cubierta o de una forma más simple usando un modelo físico que mediante el balance de energía a partir de la radiación solar incidente, nos permita estimar la radiación neta de la cubierta.

En el caso de la resistencia aerodinámica, existen numerosos modelos (Liu et al., 2007) que permiten estimar dicha variable a partir de la velocidad del viento a una altura de referencia y parámetros estructurales de la cubierta. En este caso se ha utilizado el modelo de Raupach para la estimación de la rugosidad y desplazamiento del plano de referencia, parámetros que se han usado posteriormente con el modelo de Viney (1991) para el cálculo de la resistencia aerodinámica.

Una vez conocida la r_c es posible utilizar la ecuación analítica del $CWSI$ si se conoce la resistencia potencial de la cubierta en ausencia de estrés hídrico (r_{cp}) y de ese modo obtener un valor normalizado de 0 a 1 del nivel de estrés de la planta (Jackson et al., 1988).

$$CWSI = 1 - \frac{E}{E_p} = \frac{\gamma(1 + r_c / r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + r_{cp} / r_a)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando la imagen de temperatura de superficie de la vegetación y los datos meteorológicos medidos en campo, se generó un mapa de conductancia de la cubierta (Figura 2) en el que se puede apreciar cómo los bloques de control, por lo tanto sin estrés hídrico, presentan unos valores mayores de conductancia que los árboles sometidos a tratamientos de riego deficitario.

Para la validación las estimaciones del modelo se comparó el promedio de las medidas foliares de cada árbol con la conductancia media obtenida del mapa de conductancia. Los resultados mostrados en la Figura 3 muestran una correlación de 0.91 y un error cuadrático medio ($RMSE$) de 1.65 mm/s, demostrando que las estimaciones obtenidas concuerdan perfectamente con las medidas realizadas a nivel foliar.

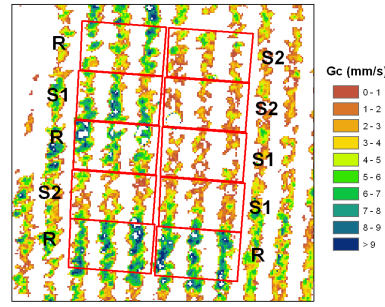


Figura 2.- Mapa de conductancia de la cubierta calculado con la metodología presentada. Se muestran los bloques de tratamiento y se ve que los tratamientos control (R) muestran mayor conductancia que los deficitarios (S).

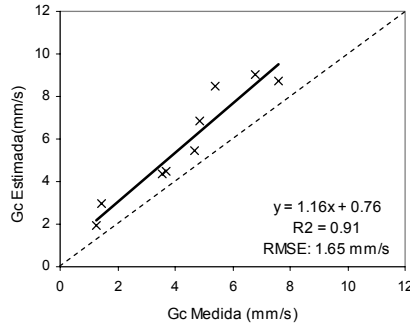


Figura 3.- Validación de la estimación de conductancia frente a las medidas de campo.

Para poder aplicar la ecuación teórica del $CWSI$ es necesario conocer la conductancia potencial de la cubierta que depende no sólo de la especie sino también de las condiciones ambientales. En el caso del olivo, dado su alto nivel de acoplamiento atmosférico, se determinó empíricamente la relación entre la conductancia y el DPV para calcular r_{cp} . La aplicación de la ecuación del $CWSI$ a la imagen térmica dio como resultado la Figura 4, mostrando los valores normalizados entre 0 y 1, y de la misma forma que la Figura 2, permite detectar visualmente los distintos tratamientos de riego.

Para validar la relación del $CWSI$ obtenido para cada árbol con el nivel de estrés hídrico, se compararon dichos valores con las medidas de potencial hídrico. La correlación obtenida ($r^2=0.82$) sugiere que el $CWSI$ obtenido mediante esta metodología es un buen indicador del estrés hídrico en olivar.

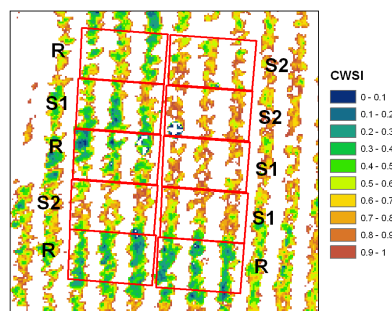


Figura 4.- Mapa de CWSI generado con la metodología presentada, mostrando que las diferencias entre tratamientos de riego son detectables.

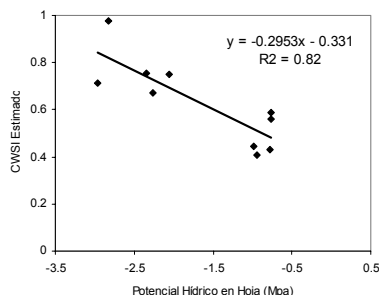


Figura 5.- Relación entre el CWSI estimado y el potencial hídrico.

CONCLUSIONES

La alta resolución espacial en el térmico permitió separar los flujos de energía en cultivos heterogéneos y por lo tanto hizo posible la aplicación de las ecuaciones del balance de energía a nivel de copa. Combinando la temperatura de superficie con medidas meteorológicas y modelos físicos, fue posible obtener de forma analítica estimaciones de conductancia y CWSI de la cubierta a nivel de copa. Los resultados obtenidos demuestran que es posible mapear la conductancia de la cubierta y el estrés hídrico mediante imágenes térmicas de resolución submétrica. El desarrollo de nuevas técnicas de teledetección cuantitativa mediante vehículos aéreos no tripulados, que permiten una alta resolución espacial y temporal, permitirá implementar estas técnicas en aplicaciones como la gestión del agua de riego en agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suarez, L., Fereres, E. (2008) Thermal and Narrow-band Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, (3), 722-73
- Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter Jr., P.J.; Reginato, R.J.; Hatfield, J.L. (1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55.
- Jackson, R.D.; Kustas, W.P.; Choudhury, B.J. (1988) A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 9, 309-317.
- Jones, H.G. (1999) Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, 139-149.
- Liu, S.; Lu, L.; Mao, D.; Jia, L. (2007) Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 769-783.
- Sepulcre-Canto, G.; Zarco-Tejada, P.; Jimenez-Munoz, J.; Sobrino, J.; de Miguel, E. et al. (2006) Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural And Forest Meteorology*, 136, 44.
- Smith, R.C.G. (1988) Inferring stomatal resistance of sparse crops from infrared measurements of foliage temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42, 183-198.
- Testi, L.; Villalobos, F.J.; Orgaz, F. (2004) Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 1-18.
- Viney, N.R. (1991) An empirical expression for aerodynamic resistance in the unstable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 381-393.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda financiera del MCI para los proyectos agl2005-04049, explora-ingenio agl2006-26038-e/agr, consolider csd2006-67, y agl2003-01468, y a Bioibérica a través del proyecto petri pet2005-0616. El apoyo técnico de UAV Navigation y Tetracam Inc. Y a A. Vera, D. Notario, M. Guillén, I. Calatrava y O. Pérez por su ayuda con las medidas, apoyo técnico en campo y en las campañas de vuelos.