

# Uso de la teledetección de alta resolución con sensores térmicos para el manejo del riego y la variabilidad espacial intralote\*

## Use of High Resolution Remote Sensing Using Thermal Sensors for Irrigation and Spatial Variability Management

**CITACIÓN:** Bellvert, J. (2016). Uso de la teledetección de alta resolución con sensores térmicos para el manejo del riego y la variabilidad espacial intralote. *Palmas* 37(Especial Tomo I), pp. 267-273.

**PALABRAS CLAVE:** sensores térmicos, riego, variabilidad espacial.

**KEYWORDS:** Thermal sensing, irrigation, spatial variability.

\*Artículo original recibido en español.



**JOAQUIM BELLVERT RÍOS**

Investigador postdoctoral, Centro de Tecnologías Espaciales y Teledetección, Universidad de California  
Postdoctoral Researcher, Center for Spatial Technologies and Remote Sensing, University of California  
jbellvert@ucdavis.edu

## Resumen

En los últimos años los problemas del agua en la agricultura han sido objeto de preocupación y de un debate creciente en el plano internacional. La adopción de técnicas de riego como el riego deficitario controlado (RDC), utilizando indicadores de estado hídrico, se ha utilizado en distintos cultivos con el objetivo de optimizar el uso del agua de riego, maximizar la producción y mejorar la calidad del fruto. Sin embargo, la dificultad que supone identificar la variabilidad espacial del estado hídrico a lo largo de lotes limita su implementación en lotes comerciales. El uso de las nuevas tecnologías basadas en la teledetección térmica de alta resolución se presenta como una herramienta de gran utilidad para identificar el estado hídrico de los cultivos en grandes extensiones. El índice denominado Crop Water Stress Index (CWSI) ha sido ampliamente reconocido como indicador del estrés hídrico y presenta una buena correlación con el potencial hídrico de hoja ( $\Psi_h$ ). Centros de investigación de España (IRTA e

IAS-CSIC) y empresas colaboradoras han llevado a cabo un proyecto de teledetección (2011-2014) que ha consistido en desarrollar el CWSI y relacionarlo con el  $\Psi_h$  en distintos cultivos mediante la adquisición de imágenes térmicas obtenidas desde plataformas aéreas. Actualmente es posible obtener mapas estimados de  $\Psi_h$  en distintos cultivos y programar el riego de forma diferencial a lo largo de un lote, teniendo en cuenta el estado hídrico del cultivo. Se pretende implementar esta tecnología en palma de aceite en los próximos años.

## Abstract

During past few years, water problems in agriculture have been the object of growing concern and debates on an international level. Irrigation techniques such as Regulated Deficit Irrigation (RDI), by using plant water status indicators, have been adopted and used in various crops with the purpose to optimize the use of irrigation water, maximize yield and improve fruit quality. Nevertheless, the difficulty posed by identifying the spatial variability of plant water status across orchards, limits its implementation in commercial orchards.

The use of new technologies based on high resolution thermal remote sensing is presented as a highly useful tool to identify the plant water status in large areas. The Crop Water Stress Index (CWSI) has been widely recognized as a plant water stress indicator and closely related with leaf water potential ( $\Psi_h$ ). Spanish research centers (IRTA and IAS-CSIC) and contributing companies carried out a remote sensing project (2011-2014) that consisted in developing the CWSI and relating it to  $\Psi_h$  in different crops by acquiring thermal images gathered from aerial platforms. Currently, it is possible to obtain estimated maps of  $\Psi_h$  in different crops and schedule irrigation differentially across an orchard, considering the spatial variability of crop water status. It is intended to implement this technology for oil palm in the coming years.

□

## Introducción

En las últimas décadas, la escasez de agua está siendo un problema mundial en zonas agrícolas de regadío. En este contexto, es importante realizar un manejo eficiente del riego, con el objetivo de ahorrar agua y maximizar la producción (Ferrer, 2007). La adopción de estrategias de riego deficitario controlado (RDC) ayuda a optimizar el uso eficiente de agua sin afectar negativamente las cosechas, y en algunos cultivos contribuye en la mejora de la calidad de los frutos (García-Tejero *et al.*, 2010, Gelly *et al.*, 2004, Pérez-Sarmiento *et al.*, 2010). Para ello es necesario conocer las necesidades hídricas de los cultivos y la respuesta a la sensibilidad estacional al déficit hídrico.

El uso de indicadores del estado hídrico de la planta es esencial para una correcta implementación del RDC. El indicador comúnmente más utilizado para estimar el estado hídrico de una planta es el potencial hídrico de hoja/tallo ( $\Psi_h$ ), el cual está íntimamente relacionado con las respuestas de la planta al estrés a

corto y mediano plazos y puede ser útil a la hora de hacer programaciones de riego (Naor, 2000, Girona *et al.*, 2006). Sin embargo, la dificultad, tiempo y costo que implica medir el  $\Psi_h$  a escala de lote (se precisarían numerosas medidas puntuales para muestrear la variabilidad dentro de un lote), hace que esta técnica sea inviable a nivel comercial. La variabilidad espacial intralote, en donde factores del medio físico (orografía del terreno o propiedades del suelo) y prácticas culturales (poda, riego o aplicación de fertilizantes) condicionan de manera considerable la respuesta diferencial del cultivo dificulta la implementación de estrategias de riego de manera eficiente. Conocer los distintos requerimientos hídricos en cada una de las subzonas dentro de un lote es esencial para llevar a cabo un riego eficiente.

Por otro lado, la temperatura de la hoja ( $T_h$ ) ha sido ampliamente reconocida como indicador del estado hídrico en distintos cultivos (Tanner, 1963, Fuchs &

Tanner, 1966). El concepto se basa en que plantas sometidas a estrés hídrico tienden a cerrar los estomas para evitar una mayor pérdida de agua, lo que hace disminuir su transpiración, así como su capacidad de efectuar fotosíntesis. En consecuencia,  $T_h$  aumenta a medida que las plantas presentan un mayor estrés hídrico. En los años 70 y 80 se empezó midiendo  $T_h$  con sensores de temperatura infrarrojo (Jackson *et al.*, 1977, Idso *et al.*, 1978). Actualmente, con el avance de las nuevas tecnologías basadas en la teledetección y con ayuda de sistemas de información geográfica, es posible determinar la variabilidad espacial del estado hídrico de los cultivos a escala de lote midiendo  $T_h$  con sensores térmicos instalados en plataformas aéreas. Sin embargo, debido a que  $T_h$  depende de factores ambientales y el control estomático tiene una respuesta distinta según el tipo de cultivo y estado fenológico, es necesario desarrollar algoritmos capaces de detectar el estado hídrico del cultivo enmascarando los parámetros que afectan la relación entre  $T_h$  y  $\Psi_h$ .

Los centros de investigación españoles IRTA e IAS-CSIC han llevado a cabo durante cuatro años un proyecto que ha consistido en desarrollar el índice Crop Water Stress Index (CWSI) (Idso *et al.*, 1981), el cual es función de  $T_h$ , y relacionarlo con el  $\Psi_h$  en distintos cultivos heterogéneos. El objetivo final de este proyecto ha sido desarrollar comercialmente una herramienta capaz de detectar remotamente la variabilidad espacial del estado hídrico a partir de imágenes térmicas de alta resolución obtenidas desde plataformas aéreas. Con base en esta información ha sido posible adoptar diversas estrategias de riego en distintos cultivos, teniendo en cuenta la variabilidad intralote del estado hídrico.

## Materiales y métodos

El proyecto se llevó a cabo durante 2011 a 2014 en distintos lotes comerciales localizados en la zona de Lleida, noreste de España. El clima es mediterráneo, con una precipitación y evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) anual promedio de 300 y 1.100 mm, respectivamente. Los cultivos que se estudiaron son viña, olivo, melocotonero, nectarina, manzano y almendro.

Con el objetivo de determinar el índice Crop Water Stress Index (CWSI), se instalaron dos sensores

de temperatura infrarrojo (PC151HT-4; Pyrocouple series, Calex Electronics) encima de dos árboles potencialmente transpirando a 100 %  $ET_c$ . La temperatura de la hoja ( $T_h$ ) se registró continuamente y se desarrollaron las líneas base denominadas 'non-water-stressed baselines' (NWSB) a partir de la relación entre  $T_h - T_a$  y el déficit de presión de vapor (DPV). El CWSI se calculó a partir del método empírico propuesto por Idso *et al.* (1981):

$$CWSI = \frac{(T_h - T_a) - (T_h - T_a)_L}{(T_h - T_a)_U - (T_h - T_a)_L}$$

Donde  $(T_h - T_a)$  es la diferencia entre la temperatura de la hoja y el aire,  $(T_h - T_a)_L$  el esperado *lowerlimit* de  $(T_h - T_a)$  en el caso de un dosel vegetativo potencialmente transpirando, y  $(T_h - T_a)_U$  el esperado diferencial en el caso de un dosel sin transpirar.

Cada año se realizaron entre seis y ocho vuelos por cultivo con un sensor térmico (FLIR SC655, FLIR Systems, USA) instalado en una avioneta tripulada (CESSNA C172 EC-JYN). El sensor térmico tiene una resolución de 640 x 480 píxeles, equipado con una lente de 24.5 mm f1.0 y una respuesta espectral entre 7.5 y 13  $\mu\text{m}$ . El vuelo se hizo entre las 13 y 16 horas a una altura de 150 m sobre el nivel del suelo. Sobrevolar lotes a baja altura con sensores de alta resolución permitió discriminar entre píxeles puros de vegetación y aquellos afectados por el suelo o sombras. En el momento del vuelo, y con el objetivo de validar el  $\Psi_h$  con el CWSI, estimado a partir de información de las imágenes térmicas, se midió el  $\Psi_h$  en 18 árboles por cultivo que estaban sometidos a distintos niveles de estado hídrico. Las medidas de  $\Psi_h$  se efectuaron con una cámara de presión Scholander (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA) siguiendo la metodología descrita por Turner y Long (1980).

Además, en el último año de proyecto se llevó a cabo la programación de riego de distintos lotes con base en mapas estimados de potencial hídrico ( $\Psi_{est}$ ). Se sobrevolaron los lotes con una frecuencia semanal y se adoptaron distintas estrategias de riego. Las decisiones de riego se tomaron individualmente para cada sector de riego en función del  $\Psi_{est}$  promedio.

# Resultados y discusión

## Resolución espacial

La resolución espacial o tamaño del pixel es uno de los parámetros a tener en cuenta para detectar el estado hídrico en cultivos heterogéneos. Este parámetro depende de la resolución del sensor y de la altitud de vuelo. La adquisición de imágenes térmicas desde plataformas aéreas tripuladas permitió conseguir imágenes de alta resolución e identificar pixeles completamente puros de vegetación (Figura 1).

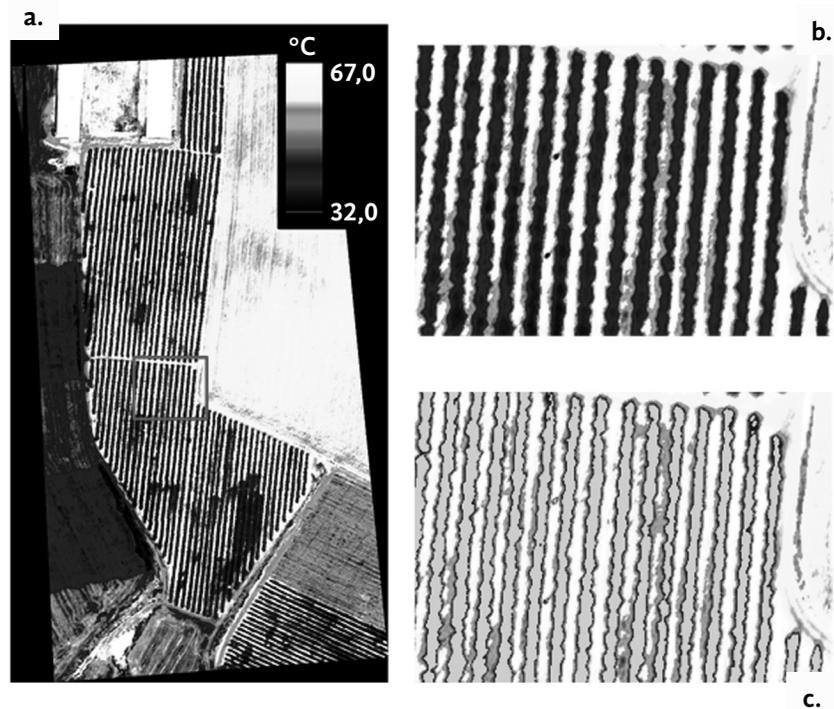
En viña se ha demostrado que el tamaño máximo de pixel debe ser de al menos 0,30 m, y evitar así la obtención de pixeles con información proveniente del suelo o sombras. Un aumento de pixel de 0,30 a 0,60 m hizo disminuir  $R^2$  en la relación  $CWSI$  vs.  $\Psi_h$  de 0,71 a 0,38 (Tabla 1). Sin embargo, el dosel vegetativo en frutales es mayor que en viña, y por tanto, es posible detectar el estado hídrico con tamaños de pixel mayores. Por ejemplo, en melocotonero se determinó que el tamaño de pixel mínimo para detectar el estado hídrico debe ser de 0,80 m. Sin embargo,  $R^2$  aumentó a medida que el tamaño de pixel decreció.

La necesidad de trabajar con altas resoluciones tiene un efecto directo sobre el precio final del mosaico térmico, ya que con los sensores térmicos *low-cost* disponibles actualmente es necesario sobrevolar a una altura de 150 m y con ello, emplear un mayor tiempo en la adquisición de imágenes térmicas para mapear el estado hídrico de una superficie determinada. Se prevé en los próximos años que con sensores de mayor resolución pueda volarse a una mayor altura y abarcar mayores superficies con el mismo o menor tiempo.

## CWSI y su relación con $\Psi_h$

El cálculo del CWSI radica en el desarrollo de la  $nWSB$  a partir de la relación entre  $T_h - T_a$  y el  $DPV$  en árboles que transpiran a su máximo potencial. En todos los cultivos, esta relación decreció linealmente a medida que aumentó el  $DPV$ , y presentó diferencias significativas entre especies, además de entre fases fenológicas (Bellvert *et al.*, 2015). Consideraciones fisiológicas y morfológicas de las hojas y la distribución de la luz en el dosel vegetativo pueden explicar parte de las diferencias detectadas entre especies y variedades. Por otra parte, las diferencias entre estadios fenológicos pueden

**Figura 1.** Mosaico térmico de 12-ha aprox. localizado en Lleida (España), el cual contiene en el centro de la imagen a) un lote de melocotonero y nectarina (*Prunus persica*); b) detalle del lote de melocotoneros; c) detalle de los pixeles puros de vegetación, seleccionados de los melocotoneros.  $T_{aire}$  en el momento del vuelo fue de 33.5 °C.

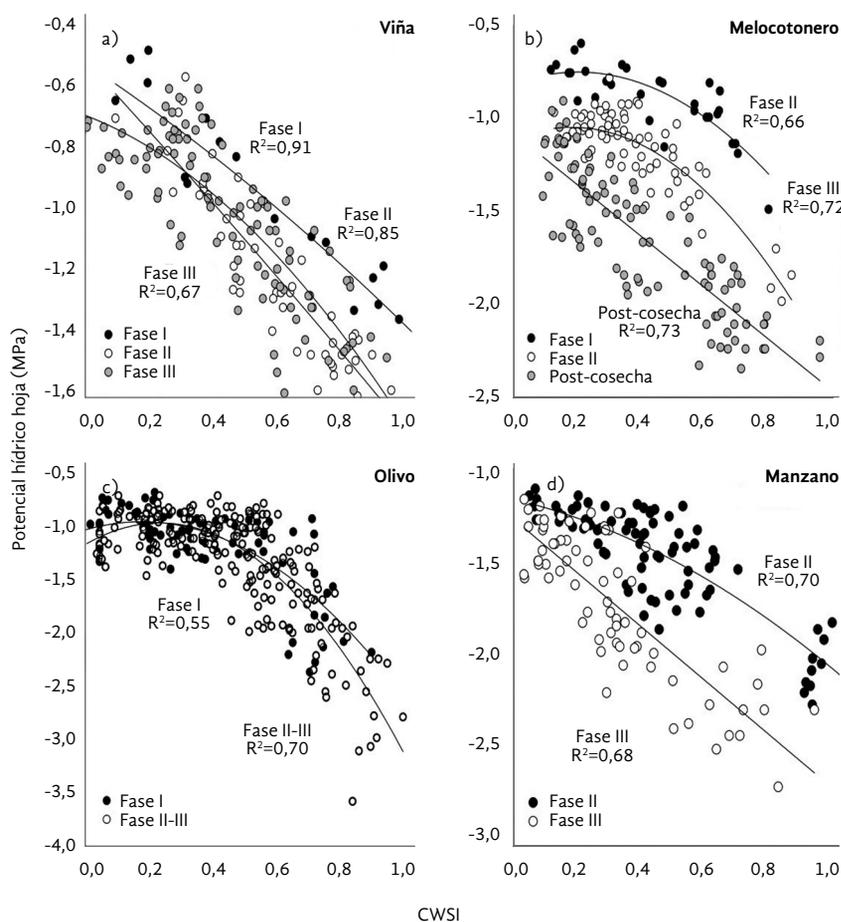


**Tabla 1.** Comparación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de la relación potencial hídrico de hoja ( $\Psi_h$ ) y CWSI, obtenido con imágenes térmicas, a las resoluciones espaciales desde 0,3 a 2,0 m, en viña (Bellvert *et al.*, 2014) y melocotonero.

Tamaño del pixel (m)	Viña	Melocotonero
0,15	-	0,76
0,30	0,71	0,75
0,60	0,38	0,66
0,80	0,27	0,65
1,00	0,22	0,56
1,20	0,05	0,28
1,50	0,28	0,11
2,00	0,29	<0,10

deberse, en parte, al balance energético del dosel, ángulo cenital solar u orientación de las hojas. En el futuro se llevarán a cabo más estudios para determinar las posibles causas.

El  $\Psi_h$  se correlacionó significativamente con el CWSI, estimado a partir de las imágenes térmicas (Figura 2). La mayoría de estas relaciones presentaron una función cuadrática, indicando la existencia de un



**Figura 2.** Relaciones estacionales entre potencial hídrico de hoja ( $\Psi_h$ ) y el CWSI para los cultivos de a) viña, cv. Chardonnay; b) melocotonero; c) olivo; d) manzano.

umbral de cwsI a partir del cual el  $\Psi_h$  deja de incrementar. A medida que aumenta el estrés hídrico, las hojas reaccionan cerrando los estomas y disminuye su tasa de transpiración. La sensibilidad del cwsI a cambios del  $\Psi_h$  también fue significativamente distinta entre especies y momentos fenológicos. Así, un mismo cwsI se correspondió con valores de  $\Psi_h$  más negativos a medida que el cultivo presentaba un estadio fenológico más avanzado. Ello se explica por una mayor sensibilidad al estrés hídrico en las fases tempranas de desarrollo del cultivo, el cual reacciona cerrando los estomas a  $\Psi_h$  menos bajos. Este distinto comportamiento debe tenerse en cuenta a la hora de detectar el estado hídrico remotamente.

### Mapas de estado hídrico

Los algoritmos desarrollados en distintos cultivos y a lo largo del ciclo fenológico permitieron generar mapas del estado hídrico periódicamente a nivel intralote. Con base en esta información es posible tomar decisiones de riego independientemente para cada subsector de riego. Por ejemplo, la Figura 3 muestra la distribución espacial del  $\Psi_{est}$  de una plantación de frutales (nectarina) en cuatro momentos distintos del ciclo fenológico. Durante 2013 se hizo la programación de riego en forma diferencial y se llevaron a cabo dos estrategias de riego distintas (Control y RDC, Riego Diferencial Controlado-). Los sectores Control se regaron

con base en el método del balance hídrico y aportando la totalidad de sus necesidades hídricas durante todo el año (100 % ETc). Por otro lado, la estrategia de RDC consistió en reducir el riego durante la fase II y postcosecha hasta llegar a unos umbrales de  $\Psi_h$  ya estandarizados, los cuales no repercuten negativamente en la producción (Girona *et al.*, 1993, López *et al.*, 2008).

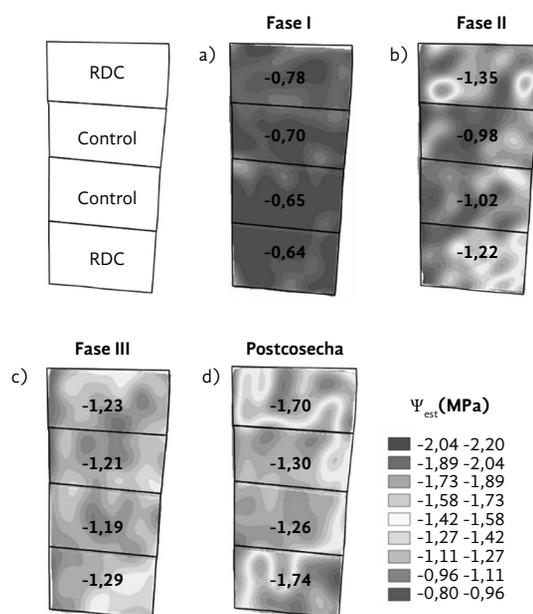
Puede observarse que durante el final de la fase fenológica II y en postcosecha, los sectores de riego bajo una estrategia de RDC presentaron valores de  $\Psi_h$  más negativos que los Control. En el caso particular de este lote, llevar a cabo un manejo diferencial del riego durante todo el año supuso ahorros de agua de 35 %, sin que se detectaran diferencias significativas en la cosecha.

Los resultados de este proyecto han demostrado la viabilidad de hacer un manejo eficiente del riego con base en mapas de  $\Psi_{est}$  obtenidos a partir de imágenes térmicas de alta resolución. Actualmente es posible determinar el estado hídrico mediante la teledetección térmica en algunas variedades de viña, olivo, melocotonero, nectarina y almendro. Sin embargo, no se tiene evidencia de ningún estudio que haya desarrollado el cwsI y tampoco que haya utilizado sensores remotos térmicos para detectar el estado hídrico de la palma de aceite. En los próximos años, se prevén colaboraciones para implementar la tecnología en este cultivo.

**Figura 3.** Ejemplo de mapas de potencial hídrico estimado ( $\Psi_{est}$ ) mediante imágenes térmicas de un lote de nectarina (*Prunus persica* L. cv. Big Top) de 2.2 ha localizado en Lleida (España), en las fases fenológicas a) II – inicio fase II (13 mayo 2013), b) II – finales fase II (4 junio 2013), c) III (25 junio 2013), y d) postcosecha (31 julio 2013).

\*Fase II se caracteriza por el crecimiento del embrión y endurecimiento del endocarpio.

\*Fase III se corresponde con crecimiento y maduración del fruto.



## Referencias

- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Girona, J., Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision agriculture journal*, 15, 361-376.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Girona, J., Marsal, J., Fereres, E. (2015). Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high resolution remote sensing thermal imagery. *Irrigation Science*, 33, 81-93.
- Fereres, E., Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2), 147-159.
- Fuchs, M., Tanner, C.B. (1966). Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy Journal*, 58, 297-601.
- García-Tejero, I., Jiménez-Bocanegra, J.A., Martínez, G., Romero, R., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L. (2010). Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. salustiano]. *Agricultural Water Management*, 97 (5), 614-622.
- Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Marsal, J. (2004). Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *J Sci Food Agric*, 84, 561-568.
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S., DeJong, T.M. (1998). Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *JASHS*, 118 (5), 580-586.
- Girona, J., Mata, M., del Campo J., Arbones, A., Bartra, E., Marsal, J. (2006). The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig Sci*. 24, 115-127.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J. (1978). Extending the degree day concept of plant phenological development to include water stress effects. *Ecology*, 59, 431-433.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, 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., Reginato, R., Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.* 13 (3), 651-656.
- López, G., Arbones, A., del Campo, J., Mata, M., Vallverdu, X., Girona, J., Marsal, J. (2008). Response of peach trees to regulated deficit irrigation during stage II of fruit development and summer pruning. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6 (3), 479-491.
- Naor, A. (2000). Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hort.* (ISHS) 537, 447-454.
- Pérez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Mounzer, O., Alarcón, J., Nicolas, E. (2010). Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8 (S2), S86-S94.
- Tanner, C.B. (1963). Plant temperatures. *Agronomy Journal*, 55, 210-211.