



Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco

Wenceslao Conejero Puente

Ingeniero Agrónomo

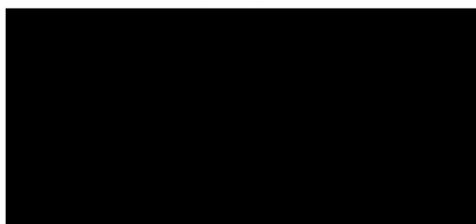
Directores: Arturo Torrecillas Melendreras
María Fernanda Ortuño Gallud

Memoria presentada para optar al Grado de Doctor
por la Universidad Politécnica de Cartagena

Cartagena, 2008

Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco

Memoria presentada por el Ingeniero Agrónomo
Wenceslao Conejero Puentes
para optar al grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena



Wenceslao Conejero Puentes

VºBº
Los Directores

VºBº
El Tutor



Arturo Torrecillas Melendreras
Profesor de Investigación del CSIC

Alejandro Pérez Pastor
Profesor Titular de la UPCT

María Fernanda Ortuño Gallud
Contratada Posdoctoral I3P del CSIC





MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS

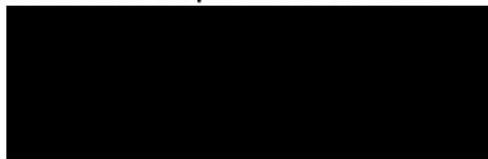
CENTRO DE EDAFOLOGÍA Y BIOLOGÍA
APLICADA DEL SEGURA

Arturo Torrecillas Melendreras y María Fernanda Ortuño Gallud, Profesor de Investigación y Contratada Posdoctoral I3P del CSIC, respectivamente,

AUTORIZAN

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco", realizada por el Ingeniero Agrónomo D. Wenceslao Conejero Puente, bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Riego del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC), y que se presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

En Murcia a 2 de Septiembre de 2008





UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Departamento de Producción Vegetal

Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena

Alejandro Pérez Pastor, Profesor Titular del Departamento de Producción Vegetal de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT),

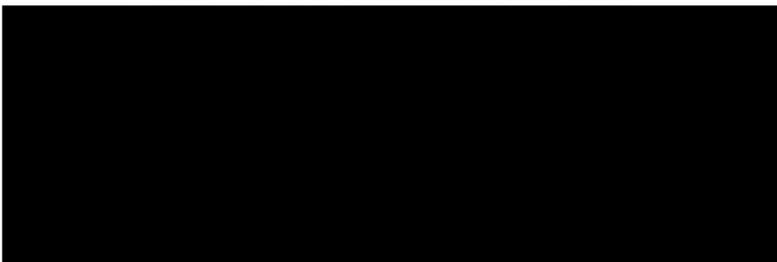
EXPONE

que ha actuado como Tutor de la Tesis Doctoral "Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco", realizada por el Ingeniero Agrónomo D. Wenceslao Conejero Puente, bajo la dirección de los Dres. Arturo Torrecillas Melendreras y María Fernanda Ortuño Gallud del CEBAS (CSIC), habiendo seguido su desarrollo y revisado su contenido, y por tanto

AUTORIZA

su presentación para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena.

Cartagena, 2 de Septiembre de 2008



DEPRODUCCION



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Departamento de Producción Vegetal

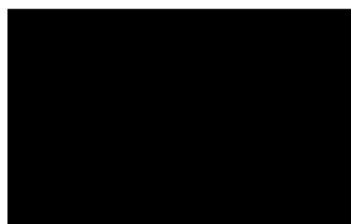
Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena

Sebastián del Pilar Bañón Arias, Catedrático y Director del Departamento de Producción Vegetal de la Universidad Politécnica de Cartagena,

INFORMA

que la Tesis Doctoral titulada "Programación del riego en melocotonero mediante el uso de sensores del diámetro del tronco", ha sido realizada por D. Wenceslao Conejero Puente, bajo la dirección y supervisión de los Dres. Arturo Torrecillas Melendreras y María Fernanda Ortuño Gallud, y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

Cartagena, 3 de Septiembre de 2008.



El ingeniero agrónomo Wenceslao Conejero Puente, ha disfrutado, durante el tiempo de realización de su Tesis Doctoral, de una beca de Formación de Personal Investigador (FPI) del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Este trabajo se encuadra dentro de las actividades del Departamento de Riego del CEBAS (CSIC) y de la Unidad Asociada de I+D al CSIC Horticultura Sostenible en Zonas Semiáridas (UPCT-CEBAS), en los siguientes proyectos de investigación: *Utilización de las variaciones micrométricas del tronco y tasas de flujo de savia para la programación del riego en olivo, limonero y melocotonero* (CICYT, AGL2004-07940-C03-02), *Nuevas herramientas para la programación precisa del riego en cultivos leñosos. Aplicación a estrategias de riego deficitario* (PROFIT, FIT 310200-2007-130) y *Utilización de la dendrometría como herramienta de precisión en la programación del riego deficitario controlado en cultivos leñosos* (CICYT, AGL2007-66279-C03-02/AGR).

Producción científica del período predoctoral

Directamente relacionada con la Tesis Doctoral

Artículos en revistas

Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors used for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiology* 27: 1753-1759.

Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Abrisqueta, J.M., Torrecillas, A. 2007. Daily sap flow and maximum daily trunk shrinkage measurements for diagnosing water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. *Tree Physiology* 27: 81-88.

Conejero, W., Alarcón, J.J., Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Programación del riego del melocotonero mediante medidas de las variaciones del diámetro del tronco. Aproximación a la estima de las necesidades hídricas. *Agricultura* 897: 198-202.

García-Orellana, Y., Alarcón, J.J., **Conejero, W.**, Ortuño, M.F., Abrisqueta, J.M., Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C. 2006. Hablando con las plantas sobre sus necesidades de riego. *Revista Internacional de Agua y Riego* 26(3): 33-36.

Comunicaciones a congresos

Torrecillas, A., **Conejero, W.**, Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Nicolás, E., Alarcón, J.J. 2007. Utilización de las medidas de las variaciones del diámetro del tronco para la programación el riego en melocotonero temprano. “*Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de la Información*” *Red Iberoamericana para la Gestión del Agua en Agricultura, Riego y Fertirriego (105RT0268, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED)*. La Paz (Bolivia).

- Ruiz-Sánchez, M.C., García-Orellana, Y., Alarcón, J.J., **Conejero, W.**, Ortuño, M.F., Abrisqueta, J.M., Torrecillas, A. 2006. Programación del riego en base a variaciones del diámetro del tronco. Preguntando a las plantas. *II Congreso Nacional y I Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje*. Lima (Perú).
- Torrecillas, A., Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Tapia, L.M., Sánchez-Blanco, M.J., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J. 2005. Aspectos ecofisiológicos y agronómicos de la respuesta de los cultivos leñosos al riego deficitario. *II Congreso Mexicano y Latinoamericano del Aguacate. Curso Taller Nutrición en Aguacate*. Uruapan (México).
- Torrecillas, A., Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Tapia, L.M., Sánchez-Blanco, M.J., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J. 2005. Programación del riego mediante medidas continuas del estado hídrico. Hablando con las plantas. *Simposium de Nutrición. II Congreso Mexicano y Latinoamericano del Aguacate*. Uruapan (México).

Otras publicaciones afines

Artículos en revistas

- Ortuño, M.F., Brito, J.J., **Conejero, W.**, García-Orellana, Y., Torrecillas, A. 2008. Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. *Australian Journal of Agricultural Research* (Enviado a publicar)
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Torrecillas, A. 2008. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* (DOI 10.1007/s00271-008-0126-z).

- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Pérez-Sarmiento, F., Torrecillas, A. 2008. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management* (DOI.org/10.1016/j.agwat.2008.07.001).
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., **Conejero, W.**, Mounzer, O., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Nicolás, E., Ruiz-Sánchez, M.C. 2008. Uso de medidas continuas del estado hídrico de la planta para la programación del riego. *Riegos y Drenajes XXI* 160: 40-45.
- Abrisqueta, J.M., Mounzer, O., Álvarez, S., **Conejero, W.**, García-Orellana, Y., Tapia, L.M., Vera, J., Abrisqueta, I., Ruiz-Sánchez, M.C. 2008. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 95(8): 959-967.
- Mounzer, O., Vera, J., Tapia, L.M., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Abrisqueta, I., Ruiz-Sánchez, M.C., Abrisqueta, J.M. 2008. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia* 42: 1-6.
- Mounzer, O., **Conejero, W.**, Nicolás, E., Abrisqueta, I., García-Orellana, Y., Tapia, L.M., Vera, J., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C. 2008. Growth pattern and phenological stages of early-maturing peach trees under a Mediterranean climate. *HortScience* 43(6): 1813-1818.
- Navarro-García, A., Bañón, S., **Conejero, W.**, Sánchez-Blanco, M.J. 2008. Ornamental characters, ion accumulation and water status in *Arbutus unedo* seedlings irrigated with saline water and subsequent relief and transplanting. *Environmental and Experimental Botany* 62: 364-370.
- Abrisqueta, J.M., García-Mina, J.M., Alarcón, J.J., **Conejero, W.**, López, L.F., Nicolás, E., García-Orellana, Y., Ortuño, M.F., Torrecillas, A. 2007. Utilización del activador nutricional Rhizobit granulado como nuevo abonado de fondo en el cultivo de lechuga. *Agrícola Vergel* 301: 16-21.

- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., **Conejero, W.**, Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.
- Moreno, F., Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Alarcón, J.J., **Conejero, W.**, Nicolás, E., Fernández, J.E., Martín-Palomo, M.J., Torrecillas, A. 2007. Estado actual de la programación del riego en limonero mediante medidas del estado hídrico. *Ingeniería del agua* 14(3): 215-222.
- Alarcón, J.J., Torrecillas, A., Sánchez-Blanco, M.J., Abrisqueta, J.M., Vera, J., Pedrero, F., Magaña, I., García-Orellana, M.F., Ortuño, M.F., Nicolás, E., **Conejero, W.**, Mounzer, O., Ruiz-Sánchez, M.C. 2006. Estrategias de riego deficitario en melocotonero temprano. *Vida Rural* 225: 28-32.
- Moreno, F., **Conejero, W.**, Martín-Palomo, M.J., Girón, I., Torrecillas, A. 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* 86: 290-294.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil* 279: 229-242.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in adult lemon trees. *Trees-Structure and Function* 20: 1-8.
- Sánchez-Blanco, M.J., **Conejero, W.**, Navarro, A., Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Aplicación de un nuevo inoculante micorrizógeno líquido a través de riego localizado en lechuga. *Murcia Agrícola* 3: 14-15.

Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., **Conejero, W.**, Domingo, R. 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. *Agricultural Water Management* 77: 296-307.

Comunicaciones a congresos

Abrisqueta, I., Hernández, E.V., Tapia, L.M., **Conejero, W.**, Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C. 2008. Dinámica del sistema radical de melocotoneros bajo riego deficitario continuo y parcial de raíces. *IX Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Lloret de Mar (España).

Abrisqueta, I., Vera, J., Tapia, L.M., Sánchez-Toribio, M.I., Mounzer, O.H., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Abrisqueta, J.M. 2008. Balance hídrico en melocotoneros extratempranos en riego por goteo. *XXVI Congreso Nacional de Riegos*. Huesca (España).

Ortuño, M.F., Brito, J.J., **Conejero, W.**, García-Orellana, Y., Mellisho, C.D., Torrecillas, A. 2008. Utilización de las fluctuaciones del diámetro del tronco para la estima de los requerimientos de riego del limonero. *IX Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Lloret de Mar (España).

Ortuño, M.F., **Conejero, W.**, Brito, J.J., Torrecillas, A. 2008. Current knowledge of using trunk diameter measurements for irrigation scheduling in lemon trees. *IX Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Lloret de Mar (España).

Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C. 2008. Ritmos diarios de parámetros hídricos en limoneros fino bajo riego deficitario. *IX Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Lloret de Mar (España).

- Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Ruíz-Sánchez, M.C., **Conejero, W.**, Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Evaluación del uso de la máxima contracción diaria del tronco para la programación del riego en limonero. *IV Congreso Nacional e I Congreso Ibérico de Agroingeniería 2007*. Albacete (España).
- Sánchez-Blanco, M.J., Alarcón, J.J., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Navarro, A., **Conejero, W.**, García-Orellana, Y., Torrecillas, A. 2007. Comparación de la respuesta del limonero al riego por inundación y riego localizado. *IV Seminario Internacional de Ingeniería Agrícola*. Portoviejo (Ecuador).
- Vera, J., Mounzer, O.H., **Conejero, W.**, Abrisqueta, I., Tapia, L.M., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C. 2007. Programación del riego deficitario en melocotonero con sensores de capacitancia. *Taller de Técnicas de Riego y Fertirriego. Herramientas Computacionales para Diseño y Manejo*. (Acción 105RT0268). Organizado por la *Red de Riegos del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED y el Programa para el manejo del agua y del suelo (PROMAS)* de la Universidad de Cuenca. Cuenca (Ecuador).
- Abrisqueta, J.M., Magaña, I., Mounzer, O., **Conejero, W.**, García-Orellana, Y., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C. 2006. Dinámica radical del melocotonero en distintas condiciones de riego. *XXIV Congreso Nacional de Riegos*. Lugo (España).
- Moreno, F., Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Fernández, J.E., Martín-Palomo, M.J., Torrecillas, A. 2006. Investigaciones sobre programación del riego en limonero y olivo mediante medidas directas y continuas del estado hídrico. *Taller de Políticas y Estrategias para el Uso del Agua en la Agricultura en Iberoamérica. Red Iberoamericana para la Gestión del Agua en Agricultura, Riego y Fertirriego (105RT0268, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED)*. Texcoco (México).

- Navarro, A., Morte, A., **Conejero, W.**, Bañón, S., Sánchez-Blanco, M.J. 2006. Influence of ectomycorrhizal treatment and deficit irrigation on water relations and growth of *Arbutus unedo* Seedlings. *ISHS International Symposium on Protected Culture in a Mild-Winter Climate. Advances in Soil & Soilless Cultivation Under Protected Environment*. Agadir (Marruecos).
- Plana, V., Abrisqueta, J.M., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Ortuño, M.F., Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A. 2006. Principios del uso combinado del agua y los fertilizantes. Fertirrigación. *II Congreso Nacional y I Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje*. Lima (Perú).
- Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., Sánchez-Blanco, M.J., Abrisqueta, J.M., Vera, J., Pedrero, F., Magaña, I., García-Orellana, Y., Ortuño, M.F., Plana, V., Nicolás, E., **Conejero, W.**, Mounzer, O., Alarcón, J.J. 2006. Respuesta fisiológica del melocotonero temprano al riego por desecación parcial de raíces. *VIII Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Tenerife (España).
- Ruiz-Sánchez, M.C., García-Orellana, Y., Ortuño, M.F., **Conejero, W.**, Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Protocolos para la programación del riego en limonero en base a medidas del estado hídrico de la planta. *XXIV Congreso Nacional de Riegos*. Lugo (España).
- Torrecillas A., García-Orellana Y., Alarcón J.J., **Conejero, W.**, Ortuño M. F., Abrisqueta J.M., Ruiz-Sánchez M.C. 2006. Valoración preliminar de la utilización de las variaciones del diámetro del tronco para la programación del riego del limonero. *VIII Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*. Tenerife (España).
- Navarro, A., Morte, A., **Conejero, W.**, Bañón, S., Sánchez-Blanco, M.J. 2005. Comportamiento ecofisiológico de plantas de *Arbutus unedo* L. micorrizadas y tratadas con Paclobutrazol. *IX Congresso Luso-Espanhol de Fisiologia Vegetal e XVI Reunião da Sociedade Espanhola de Fisiologia Vegetal*. Évora (Portugal).

- Navarro, A., Bañón, S., **Conejero, W.**, Sánchez-Blanco, M.J. 2005. Efecto del riego y tipo de sustrato sobre el desarrollo, las relaciones hídricas y el intercambio gaseoso en plántulas de madroño. *V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas y IV Congreso Iberoamericano de Ciencias Hortícolas*. Oporto (Portugal).
- Mounzer, O., Ruiz-Sánchez, M.C., **Conejero, W.**, Vera, J., Abrisqueta, J.M. 2005. Evolución del agua en el suelo en condiciones de riego inteligente con sondas FDR. *XXIII Congreso Nacional de Riegos*. Elche (España).
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., **Conejero, W.**, Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2005. Baselines of plant-based water status indicator for irrigation scheduling in lemon trees. *IX Congresso Luso-Espanhol de Fisiologia Vegetal e XVI Reunião da Sociedade Espanhola de Fisiologia Vegetal*. Évora (Portugal).
- Conejero, W.**, Torrecillas, A., Ortuño, M.F., Alarcón, J.J. 2004. Efecto de la desecación parcial del sistema radical sobre el estado hídrico del limonero. *VII Simposium Hispano Luso de Relaciones Hídricas de las Plantas*. Faro (Portugal).
- Mounzer, O., **Conejero, W.**, García-Orellana, Y., Ortuño, M.F., Vera, J., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C. 2004. Relaciones hídricas del melocotonero en distintas condiciones de riego deficitario. Primeros resultados. *VII Simposium Hispano Luso de Relaciones Hídricas de las Plantas*. Faro (Portugal).
- Navarro, A., **Conejero, W.**, Torrecillas, A., Bañón, S., Sánchez Blanco, M.J. 2004. Efectos del Paclobutrazol y el Riego en el Crecimiento y las Relaciones Hídricas de Plantas de *Arbutus unedo* L. durante y después del Trasplante. *XIV Congreso Científico del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)*. La Habana (Cuba).

- Navarro, A., **Conejero, W.**, Torrecillas, A., Bañón, S., Sánchez-Blanco, M.J. 2004. Crecimiento, desarrollo y estado hídrico de plantas de madroño cultivadas en condiciones salinas. *II Jornadas Ibéricas de Cultivos Ornamentales*. Oporto (Portugal).
- Navarro, A., **Conejero, W.**, Torrecillas, A., Bañón, S., Sánchez-Blanco, M.J. 2004. Efecto de distintos niveles de salinidad en las relaciones hídricas, contenido iónico y crecimiento de plantas de *Arbutus unedo* L. *VII Simposium Hispano Luso de Relaciones Hídricas de las Plantas*. Faro (Portugal).
- Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., **Conejero, W.**, Domingo, R. 2003. Application of LVDT sensors for evaluation of water status in young almond trees. *VI Inter-Regional Conference on Environment-Water*. Albacete (España).

Agradecimientos

No habría podido realizarse esta memoria sin la generosa colaboración de todas y cada una de las personas a las que expreso mi gratitud:

Al Dr. Arturo Torrecillas Melendreras, Jefe del Dpto. de Riego del CEBAS-CSIC, al aceptar la dirección de esta Tesis, y ser responsable de calar en mí el estímulo de la investigación, mostrando un apoyo firme y constante al confiarme en extremo todo medio humano y técnico necesario.

A la Dra. M^a Fernanda Ortuño Gallud, también directora de esta Tesis, cuyo aliento y motivación asimismo han sido incesantes durante la realización de toda tarea requerida para este fin.

A las Dras. M^a Jesús Sánchez Blanco y M^a Carmen Ruiz Sánchez, y los Dres. Juan José Alarcón Cabañero, José M^a Abrisqueta García, Juan Vera Muñoz y Emilio Nicolás Nicolás, por las atenciones y confianza dadas en todo momento.

A Dña. M^a Fuensanta García Abellán, Dña. M^a Dolores Velasco García y D. José Soto Montesinos, siempre colaboradores estimados y atentos, como también al Ing. Tec. Agr. Ramón Luís Navarro Godínez, D. Pedro Córdoba Zapata, D. Fernando Moreno Riquelme, D. Pedro Córdoba Villaescusa y D. Antonio Molina Gómez.

Al Dr. Félix Moreno Lucas, Profesor de Investigación del IRNAS-CSIC, y a los Dres. Rafael Domingo Miguel y Alejandro Pérez Pastor, profesores del Dpto. de Producción Vegetal de la UPCT, por su interés y seguimiento hacia mi trabajo.

A mis compañeras y compañeros, las Dras. Alejandra Navarro García y Yelitza García Orellana, el Dr. Oussama Mounzer, Irene Magaña Morales, Sara Álvarez Martín, Isabel Abrisqueta Villena, Ignacio Francisco

Girón Moreno, Juan José Brito Borges y Manuel Soler Méndez, foro esencial de pensamientos, quehaceres compartidos y cafés a lo largo de todo el tiempo transcurrido.

A todos, gracias por los conocimientos dados y las experiencias vividas, así como por su amistad.

*A Noelia
y a mis padres, Francisco y Emilia,
incondicionales, pacientes y maravillosos.*

Índice

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
1. Resumen	1
2. Objeto	7
3. Antecedentes	13
3.1. La evapotranspiración	15
3.1.1. Conceptos de evapotranspiración	15
3.1.2. Determinación de la evapotranspiración	17
3.2. Necesidades de riego	20
3.3. Indicadores del estado hídrico de las plantas	22
3.3.1. Indicadores de medida discontinua	23
3.3.2. Indicadores de medida continua	30
3.4. Programación del riego con indicadores del estado hídrico de las plantas	40
3.4.1. Evaluación del estado hídrico de las plantas	40
3.4.2. Ecuaciones de referencia	42
3.4.3. Protocolos de riego	43
3.4.4. Respuesta de los cultivos a la programación del riego en función de las fluctuaciones del diámetro del tronco	45
3.5. Bibliografía	46

4. Comparación de sensores de flujo de savia y diámetro del tronco para el diagnóstico del estado hídrico	61
4.1. Introducción	63
4.2. Condiciones experimentales	64
4.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo	64
4.2.2. Tratamientos	66
4.2.3. Medidas	66
4.3. Resultados	72
4.4. Discusión	77
4.5. Bibliografía	78
5. Evaluación del uso de sensores de flujo de savia y diámetro del tronco en la programación del riego	81
5.1. Introducción	83
5.2. Condiciones experimentales	84
5.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo	84
5.2.2. Tratamientos	85
5.2.3. Medidas	85
5.3. Resultados	88
5.4. Discusión	96
5.5. Bibliografía	98

6. Ecuaciones de referencia de la máxima contracción diaria del tronco	101
6.1. Introducción	103
6.2. Condiciones experimentales	105
6.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo	105
6.2.2. Tratamientos	105
6.2.3. Medidas	106
6.3. Resultados	107
6.4. Discusión	117
6.5. Bibliografía	120
7. Programación del riego usando ecuaciones de referencia de la máxima contracción diaria del tronco	123
7.1. Introducción	125
7.2. Condiciones experimentales	126
7.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo	126
7.2.2. Tratamientos	126
7.2.3. Medidas	127
7.3. Resultados	129
7.4. Discusión	135
7.5. Bibliografía	137
8. Conclusiones	139
9. Abreviaturas y símbolos	143

1. Resumen y Abstract

Resumen

El objetivo de la Tesis se centró en desarrollar las bases necesarias para programar el riego del melocotonero (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Flordastar, injertados sobre pie de GF-677) utilizando exclusivamente medidas de la máxima contracción diaria del tronco (MCD). Este objetivo global se abordó a partir de los siguientes objetivos parciales: a) evaluación de la sensibilidad de la MCD como indicador del estado hídrico, b) comparación de la programación del riego utilizando medidas de la MCD y el flujo de savia, c) elaboración de ecuaciones de referencia de la MCD, y d) evaluación de la utilización de estas ecuaciones de referencia en la programación del riego.

Los resultados indicaron que la MCD es un indicador más sensible y consistente que el flujo de savia para diagnosticar cambios en el estado hídrico del melocotonero. Las bajas necesidades de mantenimiento del instrumental, junto con el suministro de información en tiempo real confirmaron sus potencialidades como herramienta de precisión para la programación automática del riego.

En este sentido, cabe destacar que se pudo programar el riego del melocotonero utilizando exclusivamente medidas de la máxima contracción diaria del tronco, ya que las dosis de riego se pudieron ajustar de forma precisa conforme se generaba la información suministrada por el indicador, no induciendo ninguna situación de déficit hídrico ni afectando la producción ni la calidad del melocotón. Por el contrario, la programación del riego utilizando medidas de flujo de savia mostró una inferior precisión en los ajustes de las dosis de riego, induciendo situaciones de déficit hídrico moderado y afectando el tamaño de los frutos recolectados.

Complementariamente, pudo demostrarse que el riego programado manteniendo la intensidad de señal de la MCD en valores muy cercanos a la unidad es una prometedora herramienta para la estima de las necesidades de riego de los cultivos. Por otro lado, los ajustes diarios de

las dosis de riego suponen un claro aumento de la precisión del riego en periodos de alta variabilidad como el crecimiento del fruto.

Pudieron obtenerse ecuaciones de referencia para la MCD respecto de las variables climáticas, si bien, sólo cuando se utilizan valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia, el déficit de presión de vapor medio diario o la temperatura media diaria fue posible obtener ecuaciones de referencia con validez interanual.

Para la elaboración de estas líneas de base es necesario considerar que las variaciones diarias del diámetro del tronco tienen que contemplarse no sólo en el contexto del balance hídrico de la planta sino en el del balance de carbono, lo que obliga a considerar periodos fenológicos concretos, evitando la consideración conjunta de toda la estación de crecimiento.

La comparación de la respuesta al riego programado utilizando ecuaciones o árboles de referencia mostró como la programación con árboles de referencia es más precisa durante el periodo de crecimiento del fruto. No obstante, los resultados obtenidos durante la postcosecha sugirieron que el uso de ecuaciones de referencia elaboradas sobre la base de datos de más años constituirá un adecuado procedimiento para programar de forma precisa el riego.

Abstract

The research reported in this Thesis was carried out to test the hypothesis that irrigation scheduling in peach trees (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Flordastar, grafted on GF-677) can be based exclusively on maximum daily trunk shrinkage (MDS) measurements. For this, we studied i) the sensitivity of MDS and sap flow (SF) as indicators of the plant water status in response to a cycle of water stress and recovery, ii) the comparison of irrigation scheduling using MDS and SF measurements, iii) the feasibility of obtaining MDS baselines for use in irrigation scheduling, and iv) the plants response to irrigation scheduled using these reference equations.

Our findings indicated that MDS in peach trees is a more suitable plant-based indicator than SF because it is more sensitive and reliable in detecting changes in plant water status. Moreover, other complementary aspects, including that the sensors did not need repositioning during the observation period, low labour costs and the possibility of obtaining automatic information in real time, confirm the suitability of using MDS as an indicator for irrigation scheduling

Peach tree irrigation scheduling can be based on MDS measurements alone, because it is possible to adjust the irrigation schedule according to the daily information provided by MDS without affecting plant water status, yield and fruit size. In addition, MDS signal intensity-driven irrigation schedules at MDS signal intensity values very close to unity could be applied to derive better irrigation protocols when local K_c values are not available. On the contrary, peach irrigation scheduling using SF measurements showed a lower precision, inducing mild water stress situations and affecting fruit size. Daily irrigation scheduling improved irrigation precision in periods of high MDS variability as fruit growth period.

Reference relations between MDS and climatic variables in trees under non-limiting soil water conditions were established, with the

characteristic that it was possible to predict MDS reference values using inter-seasonal equations only when climatic variables measured on a whole-day basis (crop reference evapotranspiration, mean daily vapour pressure deficit and daily mean air temperature) were used.

The fact that during the experiment the fits for individual periods were better than those obtained for the seasonal regressions, confirmed that daily stem diameter variations must be considered not only in the context of the water status of the plant but also in the context of the carbon status of the plant, because, under non-limiting soil water conditions, MDS values were closely related to the presence or absence of a sugar-demanding sinks.

The comparison of the plant response to irrigation scheduled using reference equations or reference trees showed that during fruit growth the use of reference trees is more convenient. Nevertheless, the results obtained after harvest induce to think that the use of reference equations elaborate on more data years basis will be a suitable procedure to obtain reference MDS values for precise irrigation scheduling.

2. Objeto

La agricultura de la Región de Murcia siempre se ha caracterizado por la racionalidad del uso de los recursos hídricos disponibles, como prueba la alta productividad del agua en agricultura, ya que su regadío abarca el 5% de la superficie regable española, consume sólo el 3% del agua destinada al riego y contribuye al 10% de los ingresos nacionales por actividades agrícolas (A. León, datos no publicados).

Sin embargo, la agricultura murciana afronta, de modo permanente, una situación claramente adversa debido a la escasez y baja calidad de los recursos hídricos disponibles. Además, en los últimos años, esta situación se ha visto agravada debido al desarrollo industrial, la proliferación de nuevas zonas urbanas, turísticas y recreativas, el continuo incremento del precio del agua y la contaminación de los acuíferos, haciendo que la gestión del recurso constituya un tema de esencial importancia que es necesario abordar con soluciones a corto y largo plazo.

Entre las medidas conducentes a paliar la escasez de agua en zonas de limitados recursos hídricos, destacan las relativas a la búsqueda de nuevas fuentes del recurso, reutilización de aguas y la modernización de los regadíos, lo cual debe suponer no sólo la innovación de los sistemas de distribución y aplicación, sino la optimización de la programación del riego, ya que esta es una de las herramientas más adecuadas para contribuir a la mejora de la eficiencia del uso del agua en agricultura (Naor y Cohen, 2003).

En los últimos años, están adquiriendo una importancia creciente los esfuerzos encaminados a programar el riego de forma precisa utilizando medidas del estado hídrico de las plantas (Goldhamer y Fereres, 2001), idea que deriva del hecho de que la propia planta es el mejor indicador de su estado hídrico, ya que integra los efectos tanto del suministro de agua desde el suelo como de las condiciones climáticas (Jones, 2004).

Aunque la sensibilidad de los primeros dendrómetros no resultó suficientemente precisa para detectar las fluctuaciones diarias del

diámetro del tronco, Hendrickson y Veihmeyer (1941) ya fueron capaces de demostrar que el crecimiento del tronco podía informar sobre si el riego se realizaba de forma adecuada. En la actualidad, los sensores del diámetro del tronco son capaces de generar información sobre parámetros de alta sensibilidad y utilidad en la toma de decisiones sobre riego (Huguet et al., 1992; Ginestar y Castel, 1996; Goldhamer et al., 1999; Goldhamer y Fereres, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Goldhamer et al., 2003; Remorini y Massai, 2003; Ortuño et al., 2006), y plantean el uso de esta técnica para su utilización en la programación automática del riego.

Aunque la información derivada del registro continuo de las variaciones del diámetro del tronco ha sido ampliamente propuesta como herramienta a utilizar en la programación del riego, la bibliografía existente sobre su aplicación práctica es limitada y se encuentra esencialmente enfocada a la programación del riego deficitario (Li et al., 1989; Bussi et al. 1999; Goldhamer y Fereres, 2004; García-Orellana et al., 2007; Vélez et al., 2007; Ortuño et al., 2008).

Ante esta situación, el objetivo global del trabajo se centró en desarrollar las bases necesarias para programar el riego del melocotonero utilizando exclusivamente en medidas de la máxima contracción diaria del tronco (MCD). Este objetivo se abordó a partir de los siguientes objetivos parciales: a) evaluación de la sensibilidad de la MCD como indicador del estado hídrico, b) comparación de la programación del riego utilizando medidas de la MCD y el flujo de savia, c) elaboración de ecuaciones de referencia de la MCD, y d) evaluación de la utilización de estas ecuaciones de referencia en la programación del riego.

Bibliografía

Bussi, C., Huguet, J.G., Besset, J., Girard, T. 1999. Irrigation scheduling of an early maturing peach cultivar using tensiometers and diurnal changes in stem diameter. *Fruits* 54: 57-66.

- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.
- Ginestar, C., Castel, J.R. 1996. Utilización de dendrómetros como indicadores de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. *Riegos y Drenajes XXI* 89: 40-46.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of American Society for Horticultural Science* 124: 437-444.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20: 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11-19.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M. 2003. Can almond trees directly dictate their irrigations needs?. *California Agriculture* 57: 138-144.
- Hendrickson, A.H., Veihmeyer, F.J. 1941. Some factors affecting the rate of growth of pears. *American Society for Horticultural Science Proceedings* 39: 1-7.
- Huguet, J.G., Li, S., Lorendeau, J., Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67: 631-640.
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55: 2427-2496.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C. 1989. Irrigation scheduling in a mature orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrigation and Drainage Systems* 3: 1-12.
- Moriana, A., Fereres, E. 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science* 21: 83-90.
- Naor, A., Cohen, S. 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field grown apple trees. *HortScience* 38: 547-551.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Pérez-Sarmiento, F., Torrecillas, A. 2008. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management* (Aceptado)

2. Objeto

Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and Function* 20: 1-8.

Remorini, D., Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22: 39-46

Velez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90: 197-204.

3. Antecedentes

3.1. La evapotranspiración

3.1.1. Conceptos de evapotranspiración

El término evapotranspiración (ET) corresponde a la combinación de dos procesos distintos por los que el agua se pierde por evaporación desde la superficie del suelo (E) y mediante la transpiración (T) de las plantas. Esta última también puede considerarse una situación especial de evaporación, ya que se realiza en el interior de la planta.

Para evaluar el proceso de la evaporación resulta necesaria la consideración de determinados parámetros climatológicos, concretamente la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La energía necesaria para el cambio de estado de las moléculas de agua, desde líquido a vapor, proviene de la radiación solar directa y en menor medida de la temperatura del aire. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión de vapor del agua en la superficie evaporante y la atmósfera circundante. Lógicamente, si el aire cercano a las hojas no se renueva se va produciendo su saturación progresiva y el proceso de evaporación se vuelve cada vez más lento, pudiendo llegar a detenerse. En consecuencia, como el reemplazo del aire húmedo por otro más seco depende de la velocidad del viento, esta se convierte en un factor a considerar en la evaporación.

Cuando el proceso de evaporación tiene lugar directamente desde el suelo hay que añadir dos factores adicionales a los antes mencionados, el grado de cobertura del suelo por el cultivo y el nivel de humedad en la superficie evaporante. Algunos autores cifran la evaporación del suelo del orden de un 15-20% de la cantidad de agua total evapotranspirada por el cultivo, aunque puede variar dependiendo del clima, tipo y manejo del suelo, y sistema de riego utilizado (Cohen, 1994; Fernández et al., 1998).

La evapotranspiración define la capacidad evaporativa de un ambiente dado, tratándose de un parámetro necesario para una correcta programación de los riegos y establecer las dotaciones y dimensionado de las redes de riego (Ferer, 1987).

En estudios sobre eficiencia en el uso del agua por las plantas, se presta una creciente importancia a la cuantificación de los componentes de la ET por separado, así como su interdependencia (Villalobos y Fereres, 1990).

Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0)

El concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) fue elaborado para estudiar la demanda evapotranspirativa de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo (Allen et al., 1998). Corresponde a la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme, en crecimiento activo, que sombrea completamente el suelo y está bien provista de agua (Pruitt, 1987).

La ausencia de restricciones en la disponibilidad de agua en el suelo hace que la ET_0 sólo resulte afectada por los parámetros climáticos, representando el poder evaporante de la atmósfera en una determinada época del año y localidad específica, no teniendo en cuenta ni las características del cultivo ni los factores del suelo. En la actualidad para la estima de la ET_0 con parámetros climáticos se recomienda el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), capaz de estimar la ET_0 de cualquier localidad, a partir de bases físicas sólidas e incorporando parámetros fisiológicos y aerodinámicos.

Evapotranspiración bajo condiciones estándar (ET_C)

Se entiende por evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar (ET_C) la lámina de agua necesaria para cubrir las pérdidas por transpiración y evaporación de un cultivo que crece en superficies amplias, en buen estado fitosanitario, bajo óptimas condiciones edáficas, hídricas y nutricionales, y que alcanza la producción potencial bajo determinadas condiciones climáticas.

El cálculo de la ET_C se realiza mediante el uso de coeficientes específicos, denominados coeficientes de cultivo (K_C), que relacionan la ET_0 con la ET_C de la siguiente forma:

$$ET_C \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = K_C \cdot ET_0 \text{ (mm d}^{-1}\text{)} \quad [3.1]$$

Los coeficientes de cultivo dependen fundamentalmente del tipo de cultivo, edad del mismo, humedad de la superficie del suelo y fracción de cubierta vegetal (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Evapotranspiración bajo condiciones no estándar ($ET_{C_{aj}}$)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{C_{aj}}$) corresponde a la realizada por un cultivo bajo condiciones ambientales y de manejo no estándar. La existencia de condiciones no óptimas tales como la presencia de enfermedades y/o plagas, salinidad, baja fertilidad del suelo, y limitación o exceso de agua, producen desviaciones de la evapotranspiración real respecto de la ET_C .

La $ET_{C_{aj}}$ se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico K_S o ajustando K_C a los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo.

3.1.2. Determinación de la evapotranspiración

Métodos de balance de energía y microclimáticos

Para el proceso de la evaporación se precisa de energía, bien como calor sensible o como energía radiante, por lo que el proceso de evapotranspiración resulta limitado por la disponibilidad de energía en la superficie de la vegetación. Por ello, se puede predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de la energía. Es decir, la energía incidente debe ser igual a la saliente en un mismo periodo de tiempo.

La ecuación para el balance de energía se puede escribir como:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad [3.2]$$

, donde R_n es la radiación neta, H es el calor sensible, G es el flujo de calor del suelo, y λET es el flujo de calor latente. Sólo se consideran flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por tanto, la ecuación anterior sólo se aplica a vegetaciones homogéneas en superficies grandes. Además, no se consideran otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado de la planta o la energía utilizada en actividades metabólicas, los cuales se consideran despreciables.

Los términos R_n y G pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Sin embargo, la medida del H es compleja, precisando de medidas de gradientes de temperatura por encima de la superficie.

La estima de la evapotranspiración mediante el método de transferencia de masa considera los movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire (torbellinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos transportan el vapor de agua (materia) y la energía (calor, momentum) desde y hacia la superficie de evapotranspiración.

De esta manera, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen, asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de torbellinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum.

Otros métodos de observaciones directas utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el de la covarianza de torbellinos requieren de medidas precisas de la

presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a diferentes niveles sobre la superficie.

Balance hídrico en el suelo

Existen métodos menos empleados para determinar las necesidades hídricas de los cultivos como es el balance de agua en el suelo. Con dicho método se persigue cuantificar las cantidades de agua que entran, salen o permanecen en un volumen de suelo durante un tiempo determinado. En el caso de que las aportaciones laterales sean despreciables, el balance hídrico se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$L + R - ET_C - \Delta H - D \pm E = 0 \quad [3.3]$$

, donde L es la lluvia, R es el riego, ET_C es la evapotranspiración del cultivo, ΔH es la variación de humedad del suelo, D es el drenaje neto y E es el aporte o pérdida de agua por escorrentía superficial.

Si se aísla la zona radical del cultivo y se controlan los procesos que resultan difíciles de medir, los términos de la ecuación del balance hídrico se pueden determinar con apreciable exactitud. Para ello, se utilizan lisímetros o tanques rellenos de suelo, a ser posible mínimamente alterado, en los que las plantas deben crecer y desarrollarse de forma idéntica (altura e índice de área foliar) a las de fuera del mismo.

Los lisímetros de pesada permiten, mediante los cambios de masa, la medida precisa de la evapotranspiración, incluso en periodos cortos de tiempo. Los lisímetros de drenaje evalúan la evapotranspiración en un determinado periodo de tiempo como la diferencia entre el agua aportada y el drenaje recogido.

Métodos meteorológicos

El uso de datos meteorológicos para el cálculo de la evapotranspiración se basa en la dificultad de realizar medidas de campo precisas con los otros métodos. Aunque existen numerosas ecuaciones empíricas y semi-empíricas para determinar la ET_C o la ET_0 usando datos meteorológicos, algunos de los métodos desarrollados son válidos exclusivamente para condiciones climáticas y agronómicas específicas, no pudiéndose utilizar en condiciones diferentes.

En la actualidad, se acepta el método FAO Penman-Monteith como método estándar para la definición y cálculo de la ET_0 .

Método del tanque de evaporación

La ET_0 se puede estimar a través de medidas directas de la evaporación de una superficie libre de agua, ya que ésta genera un índice que integra el efecto de la radiación, la temperatura y la humedad del aire, y del viento.

Las diferencias entre las superficies cultivadas y la superficie del agua producen diferencias significativas entre las pérdidas de agua. No obstante, las medidas de evaporación del tanque Clase A (E_{pan}) poseen valor práctico y estiman la ET_0 utilizando un coeficiente corrector (K_p) que depende de la ubicación del tanque y de las características climáticas existentes ($ET_0 = K_p \cdot E_{pan}$).

3.2. Necesidades de riego

Las estimas de la ET_C obtenidas mediante la ecuación 3.3 se corresponden con las necesidades hídricas máximas de los cultivos bajo riego tradicional (Doorenbos y Pruitt, 1977). En consecuencia, en condiciones de riego localizado, con menor evaporación de agua desde el suelo y mayores tasas de transpiración (Gómez-Aparisi, 1990; 1991), es necesario introducir un factor de corrección (K_r), obteniéndose la

evapotranspiración en riego localizado (ET_{rl}), mediante la siguiente ecuación:

$$ET_{rl} \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = K_r \cdot ET_C \text{ (mm d}^{-1}\text{)} \quad [3.4]$$

Para obtener los valores de K_r se han propuesto diversos métodos. Los valores de K_r obtenidos a partir de ecuaciones propuestas por diferentes autores se presentan en la Tabla 3.1 (Domingo y Ruiz-Sánchez, 1995).

A efectos de diseño agronómico, en proyectos de riego localizado se prescinde de los posibles aportes de lluvia, el stock de agua en el suelo o ascenso capilar desde capas profundas. En este caso, se asume que las necesidades netas de la plantación (N_n) son similares a ET_{rl} .

Para el cálculo de las necesidades totales (N_t), las necesidades netas (N_n) han de incrementarse proporcionalmente a la falta de uniformidad y de eficiencia del sistema de riego, o por la salinidad del agua, tal cual se indica en las ecuaciones siguientes:

$$N_t \text{ (mm)} = N_n \text{ (mm)} / (E_f_a \cdot CU) \quad [3.5]$$

$$N_t \text{ (mm)} = N_n \text{ (mm)} / [(1 - RL) \cdot CU] \quad [3.6]$$

, siendo

$$RL = CE_{ar} / 2 \cdot \text{máx } CE_{es}^{-100\%} \quad [3.7]$$

, donde CU es el coeficiente de uniformidad, E_f_a es la eficiencia de aplicación, RL son los requerimientos de lavado para controlar la salinidad, CE_{ar} es la conductividad eléctrica del agua de riego y $\text{máx. } CE_{es}^{-100\%}$ es la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo para una reducción de los rendimientos del 100%.

Cuando las necesidades de lavado sean tales que $Ef_a \leq (1-RL)$, las necesidades totales vendrán dadas por la ecuación 3.5, y si $Ef_a > (1-RL)$ se obtendrán a partir de la ecuación 3.6.

Tabla 3.1. Valores de K_r para distintos valores de suelo sombreado (%), según Keller y Karmeli (1974), Decroix, Freeman y Garzoli, citados por Vermeiren y Jobling (1986), y Fereres et al. (1982).

% SS	Keller y Karmeli	Decroix	Freeman y Garzoli	Fereres et al.
10	0.12	0.20	0.10	0.28
20	0.24	0.30	0.20	0.49
30	0.35	0.40	0.30	0.64
40	0.47	0.50	0.40	0.76
50	0.59	0.60	0.75	0.87
60	0.70	0.70	0.80	0.89
70	0.82	0.80	0.85	1.00
80	0.94	0.90	0.90	1.00
90	1.00	1.00	0.95	1.00
100	1.00	1.00	1.00	1.00

3.3. Indicadores del estado hídrico de las plantas

Para programar el riego tomando en consideración las medidas de humedad del suelo se precisa un adecuado conocimiento de la distribución del sistema radical, así como de su densidad relativa, aumentando el grado de incertidumbre cuando el suelo humedecido varía en tres dimensiones, tal cual es el caso de los bulbos de suelo originados en riego localizado. También es conocido que en la estima de la evapotranspiración del cultivo (ET_C) pueden aparecer adicionales incertidumbres debido a los efectos de la arquitectura del dosel vegetal, grado de cobertura del suelo y manejo del suelo. Además, la estima de la ET_C en plantaciones jóvenes o donde acontece crecimiento activo de malas hierbas induce otras incertidumbres para la programación del riego.

Por estas razones, en los últimos años el uso de indicadores del estado hídrico de los cultivos basados en aquellas medidas realizadas directamente en las plantas han resultado muy populares para planificar

programaciones precisas del riego, aceptando que las propias plantas son los mejores indicadores de su estado hídrico, directamente relacionado con las condiciones edáficas y climáticas, así como con la productividad del cultivo (Shackel et al., 2000; Goldhamer et al., 2003; Remorini y Massai, 2003; Jones, 2004).

Un indicador de la situación hídrica de un cultivo debe detectar lo antes posible una situación de déficit hídrico, y ser representativo y robusto. La evaluación directa del estado hídrico de las plantas se puede determinar a través del contenido de agua o de su estado energético (potencial hídrico) en los distintos órganos vegetales, mientras que la indirecta engloba la medida de las consecuencias de la falta de agua en los órganos vegetales, como son las variaciones del diámetro del tronco, la temperatura foliar, el intercambio gaseoso (conductancia estomática, transpiración, fotosíntesis), etc.

3.3.1. Indicadores de medida discontinua

Contenido relativo de agua

El contenido relativo de agua (CRA) se define como el contenido actual de agua en un tejido con respecto al contenido máximo a plena turgencia. La determinación de este parámetro incluye la determinación del peso actual de la muestra recién cortada (P_{fresco}), del peso máximo alcanzado después de sumergir la muestra en agua pura ($P_{\text{máx}}$) y del peso de la materia seca (P_{seco}) y se calcula según la ecuación 3.8 (Barrs y Weatherley, 1962):

$$\text{CRA} = \frac{P_{\text{fresco}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{máx}} - P_{\text{seco}}} \quad [3.8]$$

La principal dificultad de su medida radica en la correcta determinación de $P_{\text{máx}}$ (Hsiao, 1990) y su laboriosidad, así como la dificultad de su utilización en condiciones de campo (Buriol, 1981).

Potencial hídrico

El parámetro termodinámico normalmente empleado para describir el estado energético del agua en las plantas es el potencial hídrico foliar (Ψ), definido como:

$$\Psi = \frac{\mu_w \cdot \mu_w^0}{V_w} \quad [3.9]$$

, siendo μ_w el potencial químico del agua en la planta, μ_w^0 el potencial químico del agua pura a la misma presión y temperatura, tomado como estado de referencia, y V_w el volumen molar parcial del agua ($V_w = 18.05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$) (Nobel, 1983). Con esta definición, Ψ tiene dimensiones de presión, generalmente expresadas en MPa.

El potencial hídrico (Ψ) se puede considerar en función de sus componentes, cuya relevancia varía en cada sistema particular:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g \quad [3.10]$$

De esta manera, Ψ_s es el potencial osmótico y resulta de la presencia de los solutos disueltos en los tejidos vegetales, Ψ_p es el potencial de presión y representa el conjunto de las presiones de turgencia y de las presiones hidrostáticas en el xilema, Ψ_m es el potencial matricial y refleja la presencia de agua no osmótica en los tejidos vegetales, Ψ_g es el potencial gravitacional y representa la diferencia en energía potencial como consecuencia de la diferencia en altura. Dado que la componente gravitacional es despreciable, y la componente matricial suele incluirse dentro de la osmótica, a efectos prácticos el potencial hídrico foliar se establece como la suma del potencial osmótico y de turgencia.

Desde la introducción de la cámara de presión (Scholander et al., 1965), el potencial hídrico ha sido el parámetro más utilizado para representar el estado hídrico de las plantas (Hsiao, 1990), ya que

constituye una adecuada metodología para la medida de Ψ incluso en condiciones de campo (Spomer, 1985; Bennet, 1990) con las precauciones propuestas por Turner (1988) y Hsiao (1990). Otros equipos de medida de Ψ incluyen psicrómetros e higrómetros de punto de rocío (Barrs, 1968; Slavik, 1974).

Aunque el potencial hídrico foliar (Grimes y Yamada, 1982) y el potencial hídrico del tallo (Shackel et al., 1997) poseen probada utilidad como indicadores del estado hídrico de los cultivos, la laboriosidad de las medidas y la imposibilidad de automatizarlas limitan enormemente su interés.

Intercambio gaseoso

La transpiración se produce mayoritariamente por difusión del agua en estado vapor a través de los estomas de las hojas, aunque también existe una pérdida a través de estructuras como las lenticelas de ramas, estomas en tallos herbáceos o de la cutícula de las hojas (Kramer, 1983). El proceso de apertura y cierre de estomas depende de cambios en la turgencia de las células guarda (Mengel y Kirkby, 1987), proceso relacionado con la absorción de K^+ y con el estado hídrico foliar (Humble y Hsiao, 1969). El grado de apertura de los estomas se evalúa a través de la medida de *conductancia foliar* (g_l) para lo que se emplean porómetros de difusión, incluyendo los métodos de estado dinámico y estacionario.

Los estomas, a pesar de que no ocupan en total más del 1% de la superficie foliar (Kramer y Kozlowsky, 1979), juegan un papel esencial en la fisiología de las plantas porque a través de ellos se pierde la mayor parte del agua absorbida (Kramer y Kozlowsky, 1979) y entra en las hojas el CO_2 utilizado en la fotosíntesis. Por ello, el grado de apertura estomática es considerado un indicador del estado hídrico de la planta (Hsiao, 1990). Sin embargo, los grandes errores que se cometen en su muestreo, dada la variabilidad entre hojas del mismo árbol (Leverenz et al., 1982), así como el gran número de factores internos y externos que

influyen sobre su comportamiento ponen en duda su eficacia real como indicador del estado hídrico (Jones, 1990).

Una respuesta generalizada al aumento en el déficit de presión de vapor de la atmósfera que circunda la hoja es la disminución de la conductancia estomática, tal y como se ha encontrado en un gran número de especies, tanto herbáceas como leñosas (Turner et al., 1984). En estas condiciones, los cultivos arbóreos realizan una importante regulación estomática, impidiendo tasas de transpiración excesivamente elevadas que pudiesen inducir la deshidratación de los tejidos foliares (Sheriff, 1979; Cohen y Cohen, 1983). Esta situación es típica de los climas mediterráneos cuyos vientos de poniente implican condiciones advectivas. No obstante, bajo condiciones ambientales extremas, se han observado aumentos de la conductancia foliar posiblemente para prevenir daños por sobrecalentamiento excesivo de las hojas (Levy, 1980).

El estrés hídrico tiene un efecto residual sobre los estomas, de forma que tras la reanudación del riego se precisa de un período de tiempo para conseguir la plena recuperación de la conductancia estomática (Ruiz-Sánchez et al., 1997; Torrecillas et al., 1999; Ruiz-Sánchez et al., 2000). Este retraso en la recuperación de la conductancia estomática no es una simple respuesta pasiva al déficit hídrico, sino que el comportamiento de los estomas bajo esta situación se encuentra relacionada con los cambios hormonales que tienen lugar en las hojas, concretamente aumentos de los niveles de ABA y/o disminuciones de los niveles de citoquininas (Davies y Zhang, 1991). Este efecto residual sobre los estomas puede ser considerado como un mecanismo de seguridad que permite a la planta recuperar su plena turgencia más eficientemente (Mansfield y Davies, 1981).

La *fotosíntesis* es uno de los procesos más importantes en la respuesta de las plantas ante condiciones de déficit hídrico (Azcón-Bieto, 1987). Es un proceso complejo que implica la coordinación de otros subprocesos tales como la absorción de CO₂ por los estomas como sustrato para la elaboración de azúcares, la captación de la luz por los

complejos clorofila-proteínas, la síntesis del poder reductor NADPH a partir de la cadena de transporte de electrones cloroplástica, y la síntesis de ATP, entre otros.

Un déficit hídrico leve provoca el aumento de la fotorrespiración en los cloroplastos provocada por el cierre parcial de los estomas, y debido a la disminución de la relación CO_2/O_2 . Este proceso no es considerado negativo y tiene carácter protector, ya que permite que se mantengan en funcionamiento otros fotosistemas, lo que además posibilita la rápida recuperación de la fotosíntesis tras la desaparición de estrés, tal y como se ha referido en diversos estudios (Torrecillas et al., 1999; Ruiz-Sánchez et al., 2000; Medrano y Flexas, 2004a).

Un déficit hídrico moderado causa la inhibición de la ATP-asa, disminuyendo la síntesis de ATP y NADPH, que sirven de base para la regeneración de la Ribulosa 1,5 bifosfato. Niveles más severos de déficit reducen la eficiencia de la carboxilación, a través de la inhibición de la actividad Rubisco (Farquhar y Sharkey, 1982; Medrano y Flexas, 2004a), pudiéndose llegar a la destrucción oxidativa de los fotosistemas y a la disminución en la captación de luz cuando éste va acompañado de radiación.

La tasa de asimilación neta de CO_2 o tasa de fotosíntesis (P_n) se mide con analizadores de gases por infrarrojos, de los que una amplia gama son portátiles, permitiendo la medida en condiciones de campo. Para el estudio de los factores no estomáticos implicados en el control de la fotosíntesis, tales como la actividad del ciclo de Calvin, se plantea el establecimiento de las curvas de respuesta de la fotosíntesis a variaciones en la concentración de CO_2 en la cámara subestomática (C_i , concentración interna de CO_2), utilizando los analizadores de intercambio gaseoso por infrarrojos antes mencionados (Farquhar y Sharkey, 1982; Azcón-Bieto, 1987; Flexas y Medrano, 2001).

La tasa de *transpiración foliar*, evaluada como pérdida de agua, es un parámetro incluido en el proceso de intercambio gaseoso foliar. Su medida se ha realizado frecuentemente con métodos gravimétricos (León

et al., 1986), con el uso de porómetros o analizadores de gases por infrarrojos (Pearcy et al., 1991), que determinan el valor instantáneo de transpiración a partir de los valores de conductancia estomática y de la diferencia de presión de vapor de la hoja al aire (Jones, 1990), con lisímetros (Yang et al., 1990) o con la determinación del flujo de savia en el xilema, tal y como se describe en el siguiente apartado de indicadores de medida continua.

Un hecho a tener en cuenta, tal y como ya se ha referido, es que el déficit hídrico puede ser el resultado bien de la falta de agua en el suelo o de los cambios en la demanda evaporativa atmosférica. En este sentido, Denmead y Shaw (1962) observaron que en condiciones de alta demanda evaporativa, la planta necesitó un suelo muy húmedo ($\Psi > -0.03$ MPa) para mantener su máxima transpiración, mientras que en situaciones de baja demanda la planta mantuvo la transpiración máxima en un suelo relativamente seco ($\Psi = -1.2$ MPa).

Es importante destacar que el cierre estomático causado por el déficit hídrico limita relativamente más la transpiración que la fotosíntesis, debido a las diferencias en la difusividad de la molécula de agua y la de dióxido de carbono (Medrano y Flexas, 2004a). Por ello, la función de los estomas durante situaciones de déficit hídrico es la de optimizar el balance entre la asimilación de CO_2 (fotosíntesis) y la pérdida de agua por transpiración (Farquhar y Sharkey, 1982).

La existencia de una sustancial resistencia al flujo de agua en las plantas sirve para explicar como en condiciones no limitantes de agua en el suelo, los aumentos en las tasas de transpiración se asocian con disminuciones de los niveles de potencial hídrico foliar (Elfving et al., 1972; Camacho-B et al., 1974; Hall et al., 1975). No obstante, la relación entre las tasas de transpiración y los niveles de potencial hídrico puede verse afectada por el historial hídrico de la planta (Kaufmann y Eckard, 1977).

Temperatura foliar

La temperatura de la cubierta vegetal, y particularmente la de las hojas, ha sido usada para caracterizar indirectamente el estado hídrico de una planta (Jackson, 1982; Turner, 1990), basándose en el hecho de que mediante el proceso de transpiración se produce un enfriamiento de la hoja, manteniendo la temperatura foliar por debajo de la del aire. La medida de la temperatura de la hoja se ha extendido gracias al desarrollo de técnicas de sensores remotos aplicadas a instrumentos que determinan la radiación térmica emitida, tales como los termómetros de infrarrojos.

A pesar de que las primeras aproximaciones para determinar un indicador del estado hídrico de la planta a partir de la temperatura de la cubierta vegetal involucran una gran cantidad de factores ambientales y de la planta, haciendo difícil su interpretación (Gardner et al., 1992), desde los años 60 la termometría infrarroja ha sido usada como indicador de estrés en la planta (Jackson, 1982; Hatfield, 1983).

Ehrler (1973) estableció un intervalo de temperaturas foliares en función de la humedad del suelo, además observó que la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire descendía 1.3 °C por cada aumento de 1 kPa en el déficit de presión de vapor del aire (DPV). Sobre esta base, Idso et al. (1982) propusieron un índice de estrés hídrico del cultivo, del inglés *Crop Water Stress Index* (CWSI), a partir de las relaciones entre la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire frente al DPV, con lo que se obtienen las líneas de base específicas para cada cultivo (Ehrler et al., 1978; Jackson et al., 1979), que han sido mejoradas aplicando la teoría del balance de energía (Alves y Pereira, 2000; Wang et al., 2005). Sin embargo, a pesar de sus evidentes posibilidades, la determinación de los umbrales de riego para cada cultivo sigue siendo uno de los principales inconvenientes para aplicar estas técnicas en la programación automatizada del riego.

3.3.2. Indicadores de medida continua

Cavitación

La cavitación se define como la interrupción de la columna de agua en los vasos xilemáticos que se produce cuando se supera un determinado umbral de tensión, formándose microburbujas de aire que pueden unirse a otras y extenderse rápidamente formando una embolia en el vaso cavitado (Medrano y Flexas, 2004b). Este fenómeno, que afecta tanto a los vasos conductores propiamente dichos como a las traqueidas, puede suceder incluso en condiciones de estrés moderado (Tyree y Dixon, 1983).

El desarrollo de los procesos de cavitación no está directamente relacionado con el diámetro del elemento conductor, sino con el de las punteaduras del vaso. Los conductos con poros más pequeños son menos vulnerables a la cavitación debido a que el paso del aire a través de sus poros está dificultado. En contrapartida, este tipo de conductos tendrán una conductividad hidráulica menor (Tyree y Sperry, 1989).

En cualquier caso, es importante señalar que el estrés hídrico no es el único factor que puede causar la cavitación, también lo son los ciclos de congelación-descongelación, factores mecánicos y la presencia de agentes patógenos.

Existen mecanismos anatómicos y fisiológicos que evitan que el embolismo se extienda al resto de la planta, lo que provocaría su muerte. En algunas especies los vasos cavitados pueden volver a ser funcionales bajo la influencia de la presión radical que empuja la savia y expulsa las burbujas de aire; en otras, los vasos permanecen así definitivamente y sólo la formación de nuevos vasos conductores en primavera permite sobrevivir a la planta. Por ello, la vulnerabilidad a la cavitación, la eficiencia en los mecanismos de reparación o la renovación parcial del sistema vascular con la diferenciación de nuevos vasos conductores, son considerados factores que determinan la resistencia a la sequía de una especie vegetal (Cruiziat y Tyree, 1990).

La interrupción de la columna de agua libera energía en forma de emisiones acústicas, sonidos audibles y/o ultrasonidos, que pueden ser registrados con detectores de forma automática (Tyree y Dixon, 1983). Dichos registros podrían servir para programar el riego (Jones, 1990), dado que el número de procesos de cavitación es directamente proporcional al grado de déficit hídrico sufrido por la planta. Además, la cavitación o embolismo del xilema puede ser cuantificado también a través de medidas indirectas de la pérdida de conductividad hidráulica de ramos, expresando ésta como porcentaje del valor máximo tras eliminar los embolismos (Sperry et al., 1988).

La cavitación como indicador del estado hídrico de las plantas es un hecho contrastado, pero no existen evidencias experimentales definitivas sobre si la aparición de estos fenómenos *in situ* podría ser utilizada como criterio eficiente en la programación del riego (Cruiziat y Tyree, 1990).

Contenido hídrico del tronco

La posibilidad de medir los cambios en el contenido hídrico de tronco o ramas de algunas especies vegetales aplicando técnicas automáticas como la reflectometría en el dominio del tiempo (Time Domain Reflectometry, TDR), hicieron pensar en que esta técnica podría constituir una herramienta de utilidad para determinar el estado hídrico de un cultivo (Constantz y Murphy, 1990; Holbrook y Sinclair, 1992).

Sin embargo, la complejidad y el coste de los equipos (Nadler et al., 2006), junto con la falta de resolución y respuesta en concordancia a las diferentes condiciones de estrés hídrico aplicado limitan su uso para el control del riego (Fernández et al., 2002).

Variaciones del diámetro del tronco

Desde hace más de 100 años se conoce que el crecimiento radial del tronco de los árboles es uno de los indicadores más sensibles del estrés hídrico (Friedrich, 1897; citado por Offenthaler et al., 2001). Posteriormente, se demostró que las tendencias en el crecimiento de los troncos durante periodos de varias semanas podían indicar lo adecuado del riego y se propuso el uso de los dendrómetros para la programación del mismo (Hendrickson y Veihmeyer, 1941), si bien la sensibilidad de estos primeros instrumentos de medida no era lo suficientemente precisa para detectar las fluctuaciones diarias del diámetro del tronco y generar parámetros de utilidad para la toma de decisiones (Huguet, 1985; Goldhamer y Fereres, 2001). Debido a los avances tecnológicos tanto en electrónica, en informática y en ciencia de los materiales, las medidas de las variaciones micromorfométricas de distintos órganos de las plantas han recobrado un notable protagonismo como indicadoras del estado hídrico de las plantas (Ginestar y Castel, 1996; Fereres y Goldhamer, 2000), e incluso la posibilidad de ser empleadas en la programación automática del riego (Huguet, 1985; Schoch et al., 1989, 1990; Goldhamer y Fereres, 2001).

Estas variaciones en el diámetro de los troncos poseen una clara base fisiológica. Durante el día, el desequilibrio entre la demanda climática y la capacidad absorbente de las raíces reduce el potencial hídrico de los conductos rígidos de xilema, favoreciendo el movimiento lateral desde el floema hacia el xilema y ocasionando la contracción del tronco, alcanzando mínimos después del mediodía solar (MNDT). Durante la noche, la planta recupera su equilibrio hídrico y el movimiento del agua adquiere sentido contrario, es decir, desde el xilema hacia el floema, lo que provoca el hinchamiento del tronco, alcanzando valores máximos antes del alba (MXDT) (Molz y Klepper, 1972). Las diferencias entre los valores de cada uno de estos parámetros en dos días consecutivos constituyen las tasas de crecimiento del mínimo (CMNDT) y máximo

(CMXDT) diámetro del tronco. La diferencia entre el valor del MXDT y el MNDT para un determinado día constituye la máxima contracción diaria (MCD) (Figura 3.1).

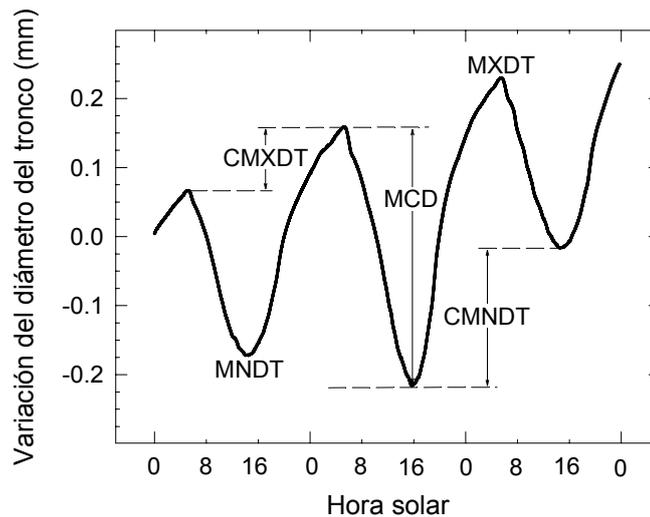


Figura 3.1. Evoluciones diarias del diámetro del tronco de limonero y parámetros derivados: Máximo (MXDT) y mínimo (MNDT) diámetro del tronco, tasas de crecimiento del mínimo (CMNDT) y máximo (CMXDT) diámetro del tronco, y máxima contracción diaria (MCD)

Para la medida continua y automática de las variaciones micrométricas se suelen utilizar sensores de desplazamiento variable y lineal (dendrómetros), de alta precisión. Estos sensores constan de un núcleo magnético que se mueve impulsado por una varilla en contacto con el órgano vegetal a medir. Dicho núcleo discurre por el interior de un cilindro, entre un embobinado primario y otro secundario. En la bobina primaria se aplica una corriente continua, que genera un campo electromagnético alrededor de un núcleo en función de la posición del mismo respecto de las espiras de la bobina, induciendo así un voltaje dado en la bobina secundaria que será la señal o medida registrada. Estos sensores deben estar provistos de anclajes al órgano a medir,

construidos con Invar, una aleación de coeficiente de dilatación termico casi nulo (Katerji et al., 1994). Dichos portasensores deben evitar dañar el órgano a medir e interferir en su desarrollo normal, aportando firmeza a la célula de medida (Fotografía 3.1). El contacto entre el extremo de la aguja y el órgano debe ser prácticamente perfecto, para lo que se puede usar una gran variedad de sustancias adherentes.



Fotografía 3.1. Sensor LVDT para de medida de las variaciones del diámetro del tronco y portasensor.

Esta tecnología es capaz de suministrar en tiempo real información automática del estado hídrico de las plantas, sin la necesidad de frecuentes desplazamientos al campo, con el consiguiente ahorro de mano de obra y transporte. Además, otra ventaja adicional es la posibilidad de utilizar los parámetros derivados de las fluctuaciones del diámetro del tronco en la programación automática del riego mediante un software adecuado.

La magnitud de las fluctuaciones del tronco dependen del módulo de elasticidad y de las propiedades para la difusión de agua de los tejidos del floema (Parlange et al., 1975; Génard et al., 2001), pudiendo, también, resultar afectadas por diferencias en la presión osmótica entre la corteza y

el xilema (Cochard et al., 2001), por el coeficiente de reflexión de los solutos (Génard et al., 2001) y por la velocidad de crecimiento de los órganos (McBurney y Costigan, 1984).

La evolución en el tiempo de los cambios de los diámetros máximos y mínimos del tronco (MXDT y MNDT, respectivamente) también suministran información útil. Así, la evolución de MXDT se ve afectada, esencialmente, por los procesos de rehidratación, los cuales dependen directamente del suministro de agua desde el suelo y sólo puede ser afectada, indirectamente, por la demanda evaporativa del día precedente (Fereres y Goldhamer, 2000). La disminución en el tiempo de los valores de MNDT constituye uno de los signos más precoces de estrés hídrico (Goldhamer et al., 1999), y sus cambios reflejan el efecto combinado del suministro de agua desde el suelo y de la demanda evaporativa en la máxima contracción (Goldhamer y Fereres, 2001). Los valores de la MCD resultan afectados esencialmente por el suministro de agua desde el suelo y la demanda evaporativa, siendo considerados un buen indicador de la intensidad de transpiración cuando el agua en el suelo no se reduce de forma considerable (Huguet et al., 1992; Ortuño et al., 2004b, 2005, 2006a).

La introducción de la cámara de presión (Scholander et al., 1965), ayudó a confirmar la relación que existe entre el estado hídrico de la planta y las fluctuaciones del diámetro de tronco (Splinter, 1969; Klepper et al., 1971; Lassoie, 1973). Desde entonces, se extendió la aplicación de esta técnica a distintos cultivos como el manzano (Huguet et al., 1992), el limonero (Ginestar y Castel, 1996; Ortuño et al., 2004a), el nogal (Cohen et al., 1997) y el melocotonero (Goldhamer et al., 1999), estableciéndose una buena correlación entre la MCD y el estado hídrico de las plantas.

De acuerdo con Daudet et al. (2005), existen hasta cinco factores que pueden afectar en distinta intensidad las fluctuaciones del diámetro del tronco: i) el crecimiento radial irreversible, ii) los cambios en los niveles de hidratación, iii) la expansión térmica del tronco (Klepper et al., 1971;

Kozlowski, 1971; McBurney y Costigan, 1984; Améglio y Cruiziat, 1992; Simonneau et al., 1993; Zweifel et al., 2000; Cochard et al., 2001), iv) la contracción y expansión de elementos conductores muertos, debido al incremento y relajación de tensiones internas (Irvine y Grace, 1997; Offenthaler et al., 2001; Sevanto et al., 2002), e incluso v) el efecto de las mareas, ocasionado por los ritmos lunares (Zücher et al., 1998).

Existen evidencias de que en varias especies los aumentos de la máxima contracción diaria del troco en respuesta a estrés hídrico son seguidos de una disminución de la misma al sobrepasar un determinado umbral de déficit hídrico (Klepper et al., 1973; Hinckley y Bruckerhoff, 1975; Huguet et al., 1992; Ginestar, 1995; Goldhamer et al., 1999; Ortuño et al., 2004b, 2006a). Este cambio en el comportamiento de la MCD ha sido atribuido a la detención de la captación de agua desde el floema, cambium y corteza al disminuir el agua almacenada en el tronco (Garnier y Berger, 1986; Huguet et al., 1992; Remorini y Massai, 2003).

El crecimiento del fruto también ha sido empleado como indicador del estado hídrico (Furr, 1955) y se han establecido valores umbrales para indicar cambios de riego en estrategias de riego deficitario (Ebel et al., 1995).

Sin embargo, diversos estudios indican que el crecimiento del fruto es un proceso más lento en la detección del estrés hídrico que otros indicadores, lo que viene mediado por la mayor sensibilidad al déficit hídrico del crecimiento vegetativo que provoca un aumento en la disponibilidad de fotoasimilados por los frutos (Mills et al., 1996).

El método tradicional de medida del crecimiento del fruto consiste en el empleo de calibres digitales que evalúan el crecimiento en diámetro y la posterior conversión, usando relaciones alométricas, en peso o volumen (Domingo, 1994; Mounzer et al., 2007). El empleo de sensores de desplazamiento lineal permite automatizar estas medidas con un registro continuo de las mismas (Link et al., 1998; Kainer et al., 2006).

Flujo de savia

La velocidad del movimiento del agua desde las raíces hacia las hojas depende de la disponibilidad del agua en el suelo y de la capacidad del sistema radicular a responder a la demanda bioclimática. El continuo desarrollo de la informática y de la tecnología ha permitido, en los últimos años, dedicar especial atención al trabajo de Huber y Schmidt (1937) (citado por Marshall, 1958) quienes propusieron por primera vez el uso del pulso de calor como trazador del movimiento de savia en el xilema.

Los métodos actualmente disponibles para medir el flujo de savia están clasificados en tres grupos: método radial de calor constante (Granier, 1985), método de balance de calor (Valancogne y Nasr, 1989) y método de pulso de calor (Marshall, 1958). A partir de este último se han desarrollado dos tecnologías una denominada de *pulso de calor no compensado*, desarrollada por Cohen et al. (1981), y otra de *compensación de pulso de calor*, desarrollada por Green y Clothier (1988), consistente en colocar radialmente en el xilema dos sondas de temperatura de forma asimétrica a cada lado de un calentador lineal (X_d y X_u , aguas abajo y arriba del calentador, respectivamente), determinando el tiempo que tardan las temperaturas en los puntos X_d y X_u (Figura 3.2) en igualarse, es decir, en hacerse igual a la existente antes del pulso de calor (Toledo, 1998; Toledo et al., 1999).

En la Fotografía 3.2 se puede observar un detalle de los sensores utilizados en el equipo de medida de flujo de savia, que consiste en un calentador lineal y dos sondas de temperatura, que se conectan a un datalogger. El calentador consta de un filamento de acero, que contiene en su interior un hilo de nicron de resistencia ($5 \Omega \text{ m}^{-1}$), el cual se encuentra aislado mediante un fino recubrimiento de teflón. Cada una de las sondas de temperatura comprende cuatro termopares de cobre-constantan en el interior de un tubo de teflón, relleno con una resina epoxi.

3. Antecedentes

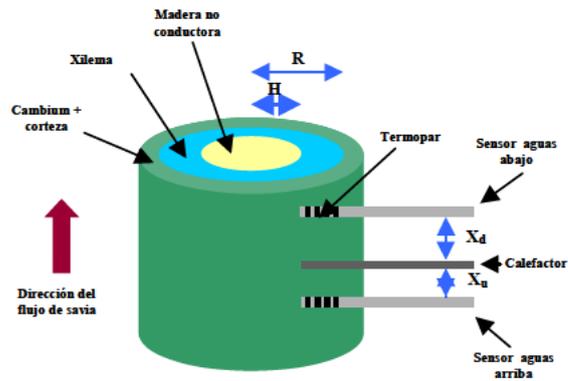
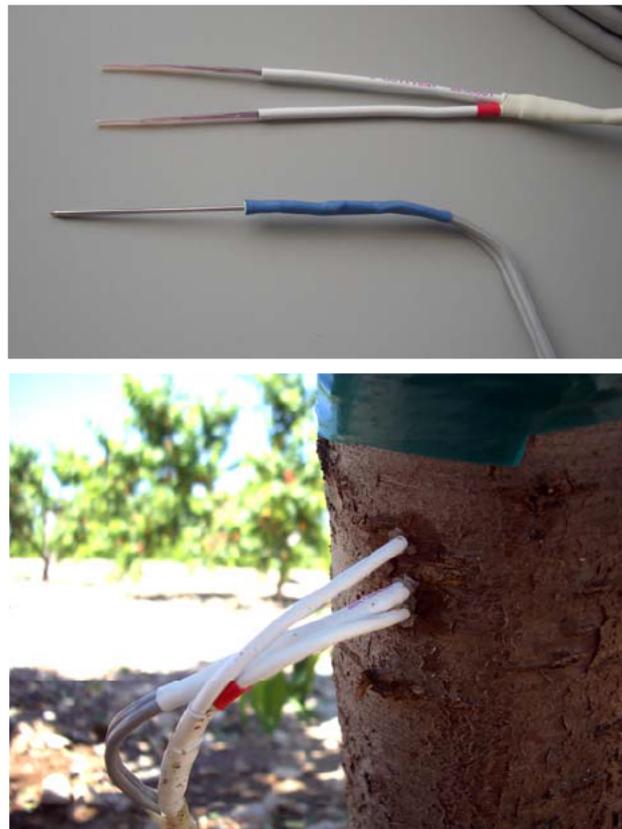


Figura 3.2. Diagrama de la ubicación de los sensores de un equipo de medida de flujo de savia con la técnica de compensación de pulso de calor



Fotografía 3.2. Detalle de los sensores utilizados para la medida de flujo de savia y su ubicación en el tronco

Un datalogger activa el calentador durante 1-2 s, y envía el pulso de calor en la corriente de savia. Las dos sondas de termopares registran los cambios de temperatura en la zona conductora tras la emisión del pulso de calor. Generalmente, las señales de salida de la unidad de pulso de calor deben de estar entre ± 40 mV para diferencias de 1 °C entre ambos sensores. El datalogger está programado para interpretar las señales de temperatura y registrar los subsiguientes tiempos de cruce.

La velocidad de la savia se calcula de acuerdo con el procedimiento de Green y Clothier (1988), teniendo en cuenta los factores de corrección propuestos por Swanson y Withfield (1981) para diferentes tamaños de herida provocados en la colocación de las sondas, ya que la presencia del calentador y las sondas de temperatura perturban el movimiento por convección del pulso de calor (Cohen et al., 1981; Green y Clothier, 1988).

Una vez calculada la velocidad del pulso de calor (V) se transforma a la del flujo de savia, o más correctamente a la densidad de flujo de savia (J , m s^{-1}) mediante la ecuación 3.11 de Edwards y Warwick (1984):

$$J = (0.505 \cdot F_m + F_i) V \quad [3.11]$$

, donde F_m y F_i son las fracciones volumétricas de madera y agua, respectivamente. El factor 0.505 está relacionado con las propiedades térmicas de la matriz leñosa, y se considera constante para todas las especies.

Se asume que la densidad de flujo de savia no es uniforme a lo largo de la madera conductora, y que los valores máximos de flujo de savia tienen lugar a 10-20 mm de la superficie de la madera. Por ello, se procede a la integración de las medidas realizadas a las distintas profundidades para calcular el flujo total de savia en el tronco, Q (l h^{-1}), (Cohen et al., 1981; Edwards y Warwick, 1984; Green y Clothier, 1988). Para ello Hatton et al. (1990) proponen un método de integración sencillo

basado en la suma ponderada de las velocidades, multiplicada por el área del xilema asociada.

El flujo de savia ha sido empleado para determinar el consumo de agua y la dinámica de la transpiración, y son numerosos los estudios que han demostrado la utilidad de este parámetro como indicador del estrés hídrico, dada su gran sensibilidad a los factores climáticos reinantes. De ellos caben destacar los realizados en kiwi (Green et al., 1989), manzano (Green et al., 1989, 2003), peral (Caspari et al., 1993), albaricoquero (Alarcón et al., 2000, 2003; Nicolás et al., 2005), avellano (Ameglio et al., 1992), olivo (Moreno et al., 1996; Fernández et al., 2001; Giorio y Giorio, 2003), limonero (Alarcón et al., 2005; Ortuño et al., 2005, 2006a) y en plantones de manzano (Valancogne y Nasr, 1989, 1993).

3.4. Programación del riego con indicadores del estado hídrico de las plantas

3.4.1. Evaluación del estado hídrico de las plantas

El potencial hídrico foliar (Ψ) ha sido el indicador más ampliamente utilizado para evaluar el estado hídrico de las plantas (Hsiao, 1990; Améglío et al., 1999), y en algunos casos para programar el riego (Germana et al., 1985; Post y Sakovich, 1986; Grimes y Yamada, 1982; Shalhevet y Levy, 1990; Girona et al., 2006).

El potencial hídrico no es siempre sensible al régimen de riego aplicado, debido a la regulación estomática (Jones, 1983). En este sentido, diversos autores han demostrado que el potencial hídrico de hojas no transpirantes (potencial hídrico del xilema o tallo, Ψ_{tallo}) es un indicador más sensible al estrés hídrico y por lo tanto su medida es más fiable y adecuada para la programación del riego en cultivos leñosos (McCutchan y Shackel, 1992; Shackel et al., 1997; Naor, 2000; Choné et al., 2001).

En cualquier caso, los anteriormente comentados inconvenientes de índole práctica de estos indicadores ha originado que otros capaces de

ser utilizados de forma automática, tales como el flujo de savia (FS) y las fluctuaciones micrométricas del diámetro del tronco y más concretamente la máxima contracción diaria del tronco (MCD) hayan renovado el interés en su uso para la programación del riego (Huguet, 1985; Schoch et al., 1989; Fernández et al., 2001; Goldhamer y Fereres, 2001; Moreno et al., 2006). Además, el FS y la MCD son capaces de suministrar una respuesta al déficit hídrico altamente sensible y fiable, tal y como demuestran diversos estudios en los que se han comparado las medidas de FS y de la MCD con otros indicadores como el Ψ , Ψ_{tallo} o la conductancia estomática (Goldhamer et al., 1999; Remorini y Massai, 2003; Ortuño et al., 2004a, b, 2005; Intrigliolo y Castel, 2004, 2006a, b).

El hecho de que las plantas integren en su estado hídrico el efecto tanto de la disponibilidad de agua desde el suelo como de la demanda evaporativa del ambiente (Jones, 2004), induce a que la medida aislada de un indicador del estado hídrico de la planta carezca de valor informativo en sí mismo, debiendo ser normalizado respecto del valor de referencia bajo condiciones no limitantes de suministro hídrico (Martin et al., 1990; Shackel et al., 1997; Goldhamer y Fereres, 2001). En este sentido, se define *intensidad de señal* como el valor de un indicador en relación al presentado en condiciones de referencia (control). Por tanto, valores de intensidad de señal superiores a la unidad indican niveles de estrés hídrico, mientras que valores iguales a la unidad indican ausencia de situaciones de estrés relacionadas con el riego (Goldhamer y Fereres, 2004).

Se entiende por *ruido* la dispersión (coeficiente de variación, CV) del valor medio de un indicador (Goldhamer y Fereres, 2001). La importancia de la relación *señal/ruido* (Goldhamer et al., 2000) deriva de que cuando la intensidad de la *señal* es suficientemente elevada, la variabilidad entre árboles (*ruido*) (Ginestar y Castel, 1996; Naor, 2000) puede no ser tan crítica (Goldhamer y Fereres, 2001). Por tanto, la relación *señal/ruido* puede utilizarse para comparar la utilidad de distintos indicadores a fines de

manejo del riego e incluso evaluar el número de sensores a utilizar en cada parcela a estudiar.

La sensibilidad de un indicador del estado hídrico de un cultivo debe acontecer tanto para detectar la aparición de una situación de déficit hídrico como para conocer su recuperación. En este sentido, Ortuño et al. (2004a, b, 2006a) señalaron similares sensibilidades del FS y la MCD para detectar el estrés hídrico, mientras que durante la recuperación del estrés la MCD resultó más robusta ya que la respuesta del FS fue mucho más lenta debido a la recarga de las capacitancias de los árboles (Alarcón et al., 2005; Ortuño et al., 2005).

3.4.2. Ecuaciones de referencia

Para obtener los valores de referencia necesarios para calcular la intensidad de señal existen dos posibilidades: i) mantener dentro de la misma parcela plantas sin limitaciones de agua en el suelo o ii) elaborar relaciones entre el indicador del estado hídrico de la planta a utilizar y las variables climáticas, a fin de seleccionar una adecuada línea de base o ecuación de referencia capaz de suministrar el valor de referencia del indicador para el correspondiente valor de la variable climática utilizada.

La primera de estas opciones no resulta muy recomendable, ya que cuando las plantas se mantienen en condiciones no limitantes de agua en el suelo, tanto los niveles de salinidad como de oxígeno pueden resultar afectados. Además, cualquier situación de exceso de agua se traduce en una respuesta similar a la de un déficit hídrico, induciendo aumentos de los valores de la MCD (Vanniere 1992; Ortuño et al., 2007).

Fereres y Goldhamer (2003), Moreno et al. (2006) y Ortuño et al. (2006b), usando datos de una única estación de crecimiento, demostraron la posibilidad de obtener líneas de base de la MCD en función de distintas variables climáticas. Posteriormente, Ortuño et al. (2008b) con datos de tres estaciones de crecimiento señalaron la posibilidad de obtener líneas de base sin variabilidad interanual, señalando que la variable climática

que mejor predice los valores de la MCD es la temperatura media diaria, aunque ésta no sea un buen indicador de la demanda evaporativa (Hatfield and Fuchs, 1990). Sin embargo, debe resaltarse que la temperatura es la variable climática más fácil y económica de medir.

Por otra parte, Intrigliolo y Castel (2006a) en ciruelo indicaron que las relaciones entre la MCD y las variables climáticas mejoran cuando se separan los datos estacionales entre el periodo correspondiente al periodo de crecimiento del fruto y el de postcosecha. Este comportamiento demuestra que las variaciones del tronco reflejan no sólo los cambios en el balance hídrico sino también los del balance de carbono de la planta (Sevanto et al., 2003; Daudet et al., 2005).

En este último sentido la mayor o menor presencia de frutos también puede afectar a los valores de la MCD al alterar los sumideros de azúcares (Flore y Layne, 1997; Intrigliolo y Castel, 2007). Sin embargo, Ortuño et al. (2008a) han demostrado que los limoneros no parecen resultar afectados por la carga de frutos ni la cosecha, posiblemente debido a que los frutos permanecen en el árbol casi todo el año.

3.4.3. Protocolos de riego

Inicialmente, los primeros intentos de programación del riego con medidas de la MCD se basaron en el uso de valores absolutos del parámetro y los resultados obtenidos pusieron de manifiesto algunas ventajas respecto de la programación del riego con tensiómetros (Li et al., 1989; Bussi et al., 1999). Sin embargo, los fundamentos de las ideas actuales de la programación del riego con medidas de la MCD se deben a Goldhamer y Fereres (2001) quienes subrayaron el hecho de que el estado hídrico de las plantas depende tanto de la disponibilidad de agua en el suelo como de las condiciones climáticas, y propusieron la normalización de los valores de la MCD para ser utilizados en la programación del riego. Estos autores también propusieron un protocolo de riego para árboles adultos bajo riego de alta frecuencia, el cual

consiste en aplicar una determinada dosis de riego inicial y ajustar el riego cada tres días. Cuando la intensidad de señal excede el valor umbral tres días consecutivos, la dosis de riego se aumenta un 10%, y en caso contrario, el riego se disminuye un 10% (Goldhamer y Fereres, 2001).

Igualmente, Goldhamer y Fereres (2004) fueron los primeros en demostrar que era posible programar el riego utilizando exclusivamente medidas de la MCD. Posteriormente, García-Orellana et al. (2007), Velez et al. (2007) y Ortuño et al. (2008c) confirmaron que las medidas de la MCD pueden ser utilizadas para programar riego deficitario en función de la información diaria obtenida ya que los ajustes en las dosis de riego pueden realizarse de forma precisa. Además, Ortuño et al. (2008a) demostraron que manteniendo la intensidad de señal de la MCD en valores cercanos a la unidad es posible estimar la evapotranspiración del cultivo.

Sin embargo, el análisis detallado de la desviación de los valores reales de intensidad de señal de la MCD respecto del valor umbral conduce a pensar en la necesidad de realizar ajustes específicos al protocolo de riego propuesto. En este sentido, García-Orellana et al. (2007) y Ortuño et al. (2008c) propusieron cambios en la frecuencia de riego y/o el uso de altos valores umbrales de intensidad de señal de la MCD en periodos lluviosos de baja demanda evaporativa. Además de la deseable programación diaria del riego, posiblemente habrá que realizar otras modificaciones específicas en los protocolos de riego para optimizar su precisión, tales como el empleo de mayores porcentajes para ajustar el riego en variedades extratempranas con muy cortos periodos de crecimiento del fruto, o en el cambio desde periodos no críticos a críticos en programas de riego deficitario controlado.

3.4.4. Respuesta de los cultivos a la programación del riego en función de las fluctuaciones del diámetro del tronco

Si bien ya existe alguna bibliografía en la que se conoce la respuesta de algunos cultivos leñosos al riego deficitario programado en función de distintas intensidades de señal de la MCD, no es menos cierto que es mucho el camino que queda por recorrer para conocer la trascendencia de distintas intensidades de señal de la MCD, ya que la respuesta de las plantas al riego deficitario depende esencialmente del grado de estrés originado, las características del material vegetal en cuestión y del momento fenológico en el que acontezca.

Goldhamer y Fereres (2004) compararon en almendro dos tratamientos regados en función de dos valores umbrales de la intensidad de señal de la MCD (1.75 y 2.75) con el realizado por el agricultor en función de medidas de la evapotranspiración del cultivo y Ψ_{tallo} . El primero de ellos indujo un estrés hídrico más suave que el segundo. El tratamiento regado a una intensidad de señal de 1.75 supuso un gasto de agua similar al realizado por el agricultor, mientras que el tratamiento regado a una intensidad de señal de 2.75 consumió un 40% menos de agua, adelantó la maduración e indujo una menor hidratación de los frutos y menor contenido en materia seca.

Utilizando clementina de Nules, Vélez (2004) y Vélez et al. (2007) compararon dos tratamientos regados a umbrales de intensidad de señal de la MCD de 1.25 y 1.35, respecto de un control regado en función de las lecturas de la ET_C de un lisímetro de pesada. El tratamiento regado a intensidad de señal de 1.25 supuso un ahorro de agua de hasta el 18%, así como el consiguiente ahorro de energía, mayor productividad del agua utilizada y disminución de los riesgos de contaminación por percolación profunda. No obstante, los frutos presentaron valores de contenido en zumo algo menores, y mayores niveles de pulpa y espesor de corteza.

De forma muy similar a estos autores, García-Orellana et al. (2007) y Ortuño et al. (2008c) estudiaron la respuesta del limonero Fino a tres tratamientos regados a umbrales de intensidad de señal de la MCD de 1.15, 1.25 y 1.35 durante toda la estación de crecimiento. Dichos tratamientos indujeron en las plantas niveles de déficit hídrico suave, moderado y severo, respectivamente. El primero de los tratamientos no afectó la producción, mientras que los otros dos disminuyeron significativamente la cosecha de la primera recolección y modificaron las características de los frutos.

3.5. Bibliografía

- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2003. Estimation of hydraulic conductances within field-grown apricot using the sap flow measurements. *Plant and Soil* 251: 125-135.
- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez, P., Torrecillas, A. 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil* 227: 77-85.
- Alarcón, J.J., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torres, R., Torrecillas, A. 2005. Compensation heat-pulse measurements of sap flow for estimating transpiration in young lemon trees. *Biologia Plantarum* 49: 527-532.
- Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage 56, FAO, Roma.
- Alves, R.G., Pereira, L.S. 2000. Non-water stress baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: a new approach. *Irrigation Science* 19: 101-106.
- Améglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.A., Dayau, S., Cruiziat, P. 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil* 207: 155-167.
- Améglio, T., Cruiziat, P. 1992. Daily variations of stem and branch diameter: short overview from a developed example. En: *Mechanics of Swelling*, (T.K. Karalis, Ed.) NATO ASI Series, Vol. H.64. Springer Verlag, Berlin, p. 193-204.
- Améglio, T., Minguéau, M., Archer, P., Pons, B. 1992. Water relations in hazelnut: sap flow, predawn water potential and micromorphometric variations of stem Diameter. *III International Congress on Hazelnut*, Alba (Italy).

- Azcon-Bieto, J. 1987. Respuesta fotosintética de las plantas en condiciones de "stress" de agua, luz y temperatura. En: *Fisiología Vegetal 85*. (J.L. Guardiola, C. Monerri, Eds.) Universidad Politécnica de Valencia, 85-96.
- Barrs, H.D. 1968. Determination of water deficits in plant tissues. En: *Water Deficits and Plant Growth. I Development, Control Measurements*. (T.T. Kozlowski, Ed.). Academic Press, New York, p. 235-368.
- Barrs H.D., Weatherley, P.E. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Science* 15: 413-428.
- Bennet, J.M. 1990. Problems associated with measuring plant water status. *HortScience* 25: 1551-1554.
- Buriol, G.A. 1981. Étude de l'évolution de la masse d'eau des feuilles grâce à l'utilisation d'une méthode non destructive. Thèse Doct. Ing., Univ. Paris VII. 256 p.
- Bussi, C., Huguet, J.G., Besset, J., Girard, T. 1999. Irrigation scheduling of an early maturing peach cultivar using tensiometers and diurnal changes in stem diameter. *Fruits* 54: 57-66.
- Camacho-B, S.E., Hall, A.E., Kaufmann, M.R. 1974. Efficiency and regulation of water transport in some woody and herbaceous species. *Plant Physiology* 54: 169-172.
- Caspari, H.W., Green, S.R., Edwards, W.R.N. 1993. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology* 67: 13-27.
- Choné, X., van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., Gaudillere, J.P. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87: 477-483.
- Cochard, H., Forestier, S., Ameglio, T. 2001. A new validation of the Scholander pressure chamber technique based on stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany* 52: 1361-1365.
- Cohen, M. 1994. Optimización de la producción mediante indicadores del estado hídrico de las plantas. *Phytoma* 57: 50-60.
- Cohen, M., Ameglio, T., Cruziar, P., Archer, P., Valancogne, C., Dayau, S. 1997. Yield and physiological responses of walnut trees in semi-arid conditions: application to irrigation scheduling. *Acta Horticulturae* 449: 273-280.
- Cohen, S., Cohen, Y. 1983. Field studies of leaf conductance response to environmental variables in citrus. *Journal of Applied Ecology* 20: 561-570.

- Cohen, Y., Fuchs, M., Green, G.C. 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment* 4: 391-397.
- Constantz, J., Murphy, F. 1990. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry. *Journal of Hydrology* 119: 31-42.
- Cruiziat, P., Tyree, M.T. 1990. La montée de la sève dans les arbres. *La Recherche* 21: 406-414.
- Daudet, F.A., Ameglio, T., Cochard, H., Archilla, O., Lacoïnte, A. 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany* 56: 135-144.
- Davies, W.J., Zhang, J. 1991. Root signals and regulation of growth and development of plants in drying soils. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42: 55-76.
- Denmead, O.T., Shaw, R.H. 1962. Availability of soil water to plant as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal* 54: 385-390.
- Domingo, R. 1994. Respuesta del limonero Fino al riego deficitario controlado. Aspectos fisiológicos. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 237 pp.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C. 1995. Respuesta de los cítricos al riego deficitario. Limonero. En: *Riego Deficitario Controlado*. Mundi Prensa, Murcia. p. 119-171.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage* 24 (FAO, 2nd Ed.). Roma. 156 pp.
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L., Evans, R.G. 1995. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience* 30: 1229-1232.
- Edwards, W.R.N., Warwick, N.W.M. 1984. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat-pulse technique and the Penman-Monteith equation. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 27: 537-543.
- Ehrler, W.L. 1973. Cotton leaf temperatures as related to soil depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal* 65: 404-409.
- Ehrler, W.L., Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J. 1978. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal* 70: 251-256.
- Elfving, D.C., Kaufmann, M.R., Hall, A.E. 1972. Interpreting leaf water potential measurements with a model of the soil-plant-atmosphere continuum. *Physiologia Plantarum* 27: 161-168.

- Farquhar, G.D., Sharkey, T.D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* 33: 317-345.
- Fereres, E. 1987. Necesidades hídricas de los cultivos, eficacia de los métodos de aplicación y consumos totales de agua a nivel de parcela. *Actas del Simposio sobre Necesidades Hídricas de los Cultivos y su Abastecimiento*. Madrid. p. 2-40.
- Fereres, E., Goldhamer, D. 2000. Avances recientes en la programación de los riegos. *Ingeniería del Agua* 7: 47-54.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78: 139-144.
- Fereres, E., Martinich, D.A. Aldrich, T.A., Castel, J.R., Holzapel, E., Schulbach, H. 1982. Drip irrigation saves money in young almond orchards. *California Agriculture* 36: 12-13.
- Fernández, J.E., Díaz-Espejo, A., Palomo, M.J., Girón, I.F., Moreno, F. 1998. Riego y fertilización del olivar en la comarca de El Aljarafe (Sevilla). Folleto divulgativo. 32 pp.
- Fernández, J.E., Nadler, A., Green, S.R. 2002. Evaluation of heat-pulse and TDR records in the trunk of olive trees for irrigation control. *VI Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*, Pamplona, 211-214.
- Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R. Girón, I.F., Moreno, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management* 51: 99-123.
- Flexas, J., Medrano, H. 2001. Photosynthesis responses of C3 plants to drought. En: *Advances in Plant Physiology* vol. IV. (E. Hemantaranjan, Ed.), Scientific Publisher, Jodhpur.
- Flore, J.A., Layne, D.R. 1997. Prunus. En: *Photoassimilates Distribution in Plants and Crops: Sink-Source Relationship* (E. Zamski, H. Scheffer, Eds.) Marcel Dekker, New York, p. 825-849.
- Friedrich, J. 1897. Über den Einfluß der Witterung auf den Baumzuwachs. *Centralbl Gesamte Forstwes* 23: 470-495.
- Furr, J.R. 1955. Response of citrus and dates to variations in soil moisture condition at different seasons. *14th International Horticultural Congress* 1: 400-412.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.

- Gardner, B.R., Nielsen, D.C., Shock, C.C. 1992. Infrared thermometry and the crop water stress index: I. History, Theory and Baselines. *Journal of Production Agriculture* 5: 462-466.
- Garnier, E., Berger, A. 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Journal of Applied Ecology* 23: 193-209.
- Génard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J.G., Bussi, C, Besset, J. Habib, R. 2001. A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. *Plant Physiology* 126: 188-202.
- Germana, G., Sardo, V.I., Cutre, L. 1985. Scheduling irrigation of orange trees. *Proceeding of the Third International Drip/Trickle Irrigation Congress*. II. American Society of Agricultural Engineers. Michigan. USA, p. 811-822.
- Ginestar, C. 1995. Efecto del estrés hídrico en distintos períodos fenológicos en plantaciones de cítricos jóvenes regados por goteo. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 188 pp.
- Ginestar, C., Castel, J.R. 1996. Utilización de dendrómetros como indicadores de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. *Riegos y Drenajes XXI* 89: 40-46.
- Giorio, P., Giorio, G. 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse techniques by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany* 49: 9-20.
- Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., Marsal, J. 2006. Scheduling vineyard deficit irrigation by using midday leaf water potential thresholds as irrigation triggers. *Irrigation Science* 24: 115-127.
- Goldhamer, D., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20: 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11–19.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Cohen, M., Girona, J., Mata, M. 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management. *Acta Horticulturae* 537: 431-445.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of American Society for Horticultural Science* 124: 437-444.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M. 2003. Can almond trees directly dictate their irrigations needs? *California Agriculture* 57: 138–144.

- Gómez-Aparisi, J. 1990. Respuesta al riego de las especies frutales de hueso: Albaricoquero, Ciruelo y Cerezo. *Fruticultura Profesional* 30: 106-113.
- Gómez-Aparisi, J. 1991. El riego en la producción frutal. Necesidades hídricas: riego tradicional y microirrigación. *Fruticultura Profesional* 36: 50-60.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42 : 193-200
- Green, S. R., Clothier, B.E. 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany* 39: 115-123.
- Green, S.R., Clothier, B.E., Jardine, B. 2003. Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal* 95: 1371-1379.
- Green, S.R., McNaughton, K.G., Clothier, B.E. 1989. Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 48: 251-261.
- Grimes, D.W., Yamada, H. 1982. Relation of growth and yield to minimum leaf water potential. *Crop Science* 22: 134-139.
- Hall, A.E., Camacho-B, S.E., Kaufmann, M.R. 1975. Regulation of water loss by citrus leaves. *Physiologia Plantarum* 33: 62-65.
- Hatfield, J.L. 1983. The utilization of thermal infrared radiation measurements from grain sorghum crops as a method of assessing their irrigation requirements. *Irrigation Science* 3: 259-268.
- Hatfield, J.L., Fuchs, M.F. 1990. Evapotranspiration models. En: Management of farm irrigation systems. Eds. G J Hoffman, T A Howell and K H Solomon. Pp. 33-60. ASAE Monograph, St. Joseph.
- Hatton, T.J., Cathpole, E.A., Vertessy, R.A. 1990. Integration of sap flow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiology* 6: 201-209.
- Hendrickson, A.H., Veihmeyer, F.J. 1941. Some factors affecting the rate of growth of pears. *American Society for Horticultural Science Proceedings* 39: 1-7.
- Hinckley, T.M., Bruckerhoff, D.N. 1975. Effects of drought on water relations and stem shrinkage of *Quercus alba*. *Canadian Journal of Botany* 53: 62-72.
- Holbrook. M., Sinclair, T. R. 1992. Water balance in the arborescent palm *Sabal palmetto*. II. Transpiration and stem water storage. *Plant, Cell and Environment* 15: 401-409.

- Hsiao, T.C. 1990. Measurements of plants water stress. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. (B.A. Steward, D.R. Nielsen, Eds.), Agronomy Monograph N° 30. Published by ASA, CSSA y SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 243-279.
- Huber, B., Schmidt, E. 1937. Eine dopensationsmethode zur thermoelektrischen messung langsamer Saftströme. *Ber. Deutsch. Bot. Ges.* 55: 514-529.
- Huguet, J.G. 1985. Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée. *Agronomie* 5: 733-741.
- Huguet, J.G., Li, S., Lorendeau, J., Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67: 631-640.
- Humble, G.D., Hsiao, T.C. 1969. Specific requirement of potassium for light activated opening of stomata in epidermal strips. *Plant Physiology* 61: 158-163.
- Idso, S.B., Reginato, R.J., Radin, J.W. 1982. Leaf diffusion resistance and photosynthesis in cotton as related to a foliage temperature based plant water-stress index. *Agricultural Meteorology* 27: 27-34.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23: 93-102.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2006a. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiology* 26: 303-311.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2006b. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management* 83: 173-180.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree Physiology* 27: 89-96.
- Irvine, J., Grace, J. 1997. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta* 202: 455-461.
- Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research* 13: 651-656.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Printer, P.J., Idso, S.B. 1979. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research* 13: 651-656.
- Jones, H.G. 1983. Estimation of an effective soil water potential at the root surface of transpiring plants. *Plant, Cell and Environment* 6: 671-674.

- Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience* 25: 19-26.
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55: 2427-2436.
- Kainer, K.A. Wadt, L.H.O. Gomes-Silva, D.A.P. Capanu, M. 2006. Liana loads and their association with *Bertholletia excelsa* fruit and nut production, diameter growth and crown attributes. *Journal of Tropical Ecology* 22: 147-154.
- Katerji, N., Tardieu, F., Bethenod, O., Quetin, P. 1994. Behaviour of maize stem diameter during drying cycles: comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Science* 34: 165-169.
- Kaufmann, M.R., Eckard, A.N. 1977. Portable instrument for rapidity measuring conductance and transpiration of conifers and others species. *Forest Science* 23 227-237.
- Keller, J., Karmeli, D. 1974. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE* 17: 678-684.
- Klepper, B., Browning, V.D., Taylor, H.M. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology* 48: 683-685.
- Klepper, B., Molz, F.J., Peterson, C.M. 1973. Temperature effects on radial propagation of water potential in cotton stem bark. *Plant Physiology* 52: 565-568.
- Kozlowski, T.T. 1971. Growth and development of trees. Vol. 2. Academic Press, New York.
- Kramer, P.J. 1983. Water Relations of Plants. *Academic Press*, New York. 489 pp.
- Kramer, P.J., Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of Woody Plants. *Academic Press*. New York. 811 pp.
- Lassoie, J.P. 1973. Diurnal dimensional fluctuations in Douglas-fir stem in response to tree water status. *Forest Science* 19: 251-255.
- León, A., Sanchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A., Del Amor, F. 1986. Determinación gravimétrica de la intensidad de transpiración en hojas de limoneros. *Anales de Edafología y Agrobiología* 45: 1087-1094.
- Leverenz, J., Deans, J.D., Ford, E.D., Jarvis, P.G., Milne, R., Whitehead, D. 1982. Systematic spatial variation of stomatal conductance in a Sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology* 19: 835-851.
- Levy, Y. 1980. Effect of evaporative demand on water relations of *Citrus limon*. *Annals of Botany* 46: 695-700.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C. 1989. Irrigation scheduling in a mature orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrigation and Drainage Systems* 3: 1-12.

- Link, S.O., Thiede, M.E., van Bavel, M.G. 1998. An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter. *Journal of Experimental Botany* 49: 1583-1587.
- Mansfield, T.A., Davies, W.J. 1981. Stomata and stomatal mechanisms. En: *The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants* (L.G. Paleg, D. Aspinall, Eds.). Academic Press, New York. p. 315-346.
- Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology* 33: 385-396.
- Martin, D.L., Stegmana, E.C., Fereres, E. 1990. Irrigation scheduling principles. En: *Management of Farm Irrigation Systems*. (G.J. Hoffman, T.A. Howell, K.H. Solomon, Eds.) American Society of Agricultural Engineers, Madison, Wisconsin. 155-203.
- McBurney, T., Costigan, P.A. 1984. The relationship between stem diameter and water potentials in stem young cabbage plants. *Journal of Experimental Botany* 35: 1787-1793.
- McCutchan, H., Shackel, K.A. 1992. Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117: 607-611.
- Medrano, H., Flexas, J. 2004a. Respuestas de las plantas al estrés hídrico. En: *La Ecofisiología Vegetal: una Ciencia de Síntesis*. (M.J. Reigosa, N. Pedrol, A. Sánchez-Moreiras, Eds.) Thomson, España. 253-286.
- Medrano, H., Flexas, J. 2004b. Relaciones hídricas en las plantas. En: *La Ecofisiología Vegetal: una Ciencia de Síntesis*. (M.J. Reigosa, N. Pedrol, A. Sánchez-Moreiras, Eds.) Thomson, España. 1141-1174.
- Mengel, K., Kirkby, E.A. 1987. Principles of Plant Nutrition. 4th ed. *International Potash Institute Ed. Bern*.
- Mills, T.M., Behboudian, M.H., Clothier, B.E. 1996. Water relations, growth and composition of 'Braeburn' apple fruit under deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 121: 1003-1005.
- Molz, F.J., Klepper, B. 1972. Radial propagation of water potential in stems. *Agronomy Journal* 64: 469-473.
- Moreno, F., Conejero, W. Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F., Torrecillas, A. 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* 84: 290-294.
- Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R. 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil* 184: 85-96.

- Mounzer, O.H., Nicolás, E., Conejero, W., García-Orellana, Y., Vera, J., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C. 2007. Phenological stages and growth pattern of early ripening peach trees under Mediterranean conditions. *Annals of Applied Biology* (AAB-2007-0067).
- Nadler, A., Raveh, E., Yermiyahu, U., Green, S. 2006. Stress induced water content variations in mango stem by time domain reflectometry. *Soil Science Society American Journal* 70: 510-520.
- Naor, A. 2000. Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Horticulturae* 537: 447-454.
- Nicolás, E., Torrecillas, A., Ortuño, M.F., Domingo, R., Alarcón, J.J. 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management* 72: 131-145.
- Nobel, P.S. 1983. Biophysical plant physiology and ecology. Freeman, W.H. & Co., San Francisco. 608 pp.
- Offenthaler, I., Hietz, P., Richter, H. 2001. Wood diameter indicates diurnal and long-term patterns of xylem water potential in Norway spruce. *Trees* 15: 215-221.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2004a. Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil* 267: 263-270.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2004b. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science* 227: 275-280.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2005. Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany* 54: 155-162.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Water status indicators of lemon trees in response to flooding and recovery. *Biologia Plantarum* 51: 292-296.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., Conejero, W., García-Orellana, Y., Torrecillas, A. 2008a. Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. *Australian Journal of Agricultural Research* (Aceptado)
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W., Torrecillas, A. 2008b. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* (DOI: 10.1007/s00271-008-0126-Z).
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Pérez-Sarmiento, F., Torrecillas, A. 2008c. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management* (DOI: 10.1016/j.agwat.2008.07.001).

- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A., 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and Function* 20: 1-8.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant Soil* 279: 229-242.
- Parlange, J.Y., Turner, N.C., Waggoner, P.E. 1975. Water uptake, diameter change, and nonlinear diffusion in tree stems. *Plant Physiology* 55: 247-250
- Pearcy, R.W., Shulze, E.D., Zimmermann, R. 1991. Measurement of transpiration and leaf conductance. En: *Plant Physiological Ecology*. (R.W. Pearcy, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney, P.W. Rundel, Eds.) Chapman and Hall, London, 137-160.
- Post S.E.C., Sakovich, N.J. 1986. A promising new tool in irrigation management. *California Citrograph* 7: 124.
- Pruitt, W.O. 1987. Reference evapotranspiration (ET₀) for California. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California. Series: Bulletin, 1922. 13 pp.
- Remorini, D., Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22: 39-46.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Savé, R., Biel, C., Torrecillas, A. 1997. Effects of water stress and rewatering on leaf water relations of lemon plants. *Biologia Plantarum* 39: 923-931.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A. 2000. Water stress preconditioning to improve drought resistance in young apricot plants. *Plant Science* 156: 245-251.
- Schoch, P.G., L'Hôtel, J.C., Brunel, B. 1990. Increase in diameter of tomato stems. Effects of light and night temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 50: 229-238.
- Schoch, P.G., L'Hôtel, J.C., Dauplé, P., Conos, G., Fabre, M.J. 1989. Micro variations de diamètre de tige pour le pilotage de l'irrigation. *Agronomie* 9: 137-142.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339-346.
- Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M., Nikinmaa E. 2002. Time lags for xylem and stem diameter variations in Scots pine tree. *Plant, Cell and Environment* 25: 1071-1077.

- Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M., Nikinmaa, E. 2003. Sugar transport together with environmental conditions controls time lags between xylem and stem diameter changes. *Plant, Cell and Environment* 26: 1257-1265.
- Shackel, K., Lampinen, B., Sibbett, S., Olson, W., J. 2000. The relation of midday stem water potential to the growth and physiology of the fruit trees under water limited conditions. *Acta Horticulturae* 537: 425-430.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinge, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Phillips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Soutwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J. 1997. Plant water status as an index of irrigation needs in deciduous fruit trees. *HortTechnology* 7: 23-29.
- Shalhevet J., Levy, Y. 1990. Citrus trees. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. (B.A.Steward, D.R.Nielsen, Eds.), Agronomy Monograph N° 30. Published by ASA, CSSA y SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 951-986.
- Sheriff, D.W. 1979. Stomatal aperture and sensing of the environment by guard cells. *Plant, Cell and Environment* 2: 15-22.
- Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J., Huguet, J. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany* 44: 615-621.
- Slavik, B. 1974. *Methods of Studying Plant Water Relations*. Academia Publishing House, Prague, Springer-Verlag, Berlin.
- Sperry, J.S., Donnelly, R., Tyree, M.T. 1988. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. *Plant, Cell and Environment* 11: 35-40.
- Splinter, W.E. 1969. Electronic micrometer continuously monitors plant stem diameter. *Agricultural Engineering* 50: 220-221.
- Spomer, L.A. 1985. Techniques for measuring plant water. *HortScience* 20: 1021-1028.
- Swanson, R.H., Whitfield, D.W.A. 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany* 32: 221-239.
- Toledo, A. 1998. Equipo autónomo de medición de caudal de savia en árboles frutales. Trabajo Fin de Carrera. ETSII. Universidad de Murcia. 208 pp.
- Toledo, A., Domingo, R., Fernández-Meroño, J.M., Torres, R. 1999. Gestión optimizada del riego. Seguimiento automatizado y en tiempo real. *Automática e Instrumentación* 294: 87-90.

- Torrecillas, A., Galego, R., Pérez- Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C. 1999. Gas exchange and water relations of young apricots plants under drought conditions. *Journal of Agricultural Science* 132: 445-452.
- Turner, N.C. 1988. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation Science* 9: 289-308.
- Turner, N.C. 1990. Plant water relations and irrigation management. *Agricultural Water Management* 17: 59-73.
- Turner, N.C., Spurway, R.A., Schulze, E.D. 1984. Comparison of water potential measured by in situ psychrometry and pressure chamber in morphologically different species. *Plant Physiology* 74: 316-319.
- Tyree, M.T., Dixon, M.A. 1983. Cavitation events in *Thuja occidentalis* L. *Plant Physiology* 72: 1094-1099.
- Tyree, M.T., Sperry, J.S. 1989. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology* 40: 19-38.
- Valancogne, C., Nasr, Z. 1989. Measuring sap flow in small trees by heat balance method. *HortScience* 24: 383-385.
- Valancogne, C., Nasr, Z. 1993. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. *Proceedings of Wallombrosa International Workshop: Analysis of Water Transport in Plants and Cavitation of Xylem conduits*. Florence, Italy.
- Vanniere, H. 1992. Utilisation des variations micrométriques des diamètres de tiges et de fruits de clémentiniers pour le pilotage des irrigations. *Fruits* 47: 219-227.
- Vélez, J.E. 2004. Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y la planta. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Velez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90: 197-204.
- Vermeiren, L., Jobling, G.A. 1986. Riego localizado. Estudio FAO Riego y Drenaje 36. Ed. FAO, Roma. 203 pp.
- Villalobos, F.J., Fereres, E. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton and sunflower canopies. *Agronomy Journal* 82: 1153-1159.
- Wang, L., Qiu, G.Y., Zhang, X., Chen, S. 2005. Application of a new method to evaluate crop water stress index. *Irrigation Science* 19: 101-106.
- Yang, X., Short, T.H., Fox, R.D., Bauerle, W.L. 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology* 51: 197-209.

- Zücher, E., Cantiani, M.G., Sorbetti-Guerri, F., Michel, D. 1998. Tree stem diameters with tide. *Nature* 392: 665-666.
- Zweifel, R., Item, H., Häsler, R. 2000. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees* 15: 50-57.

4. Comparación de sensores de flujo de savia y diámetro del tronco para el diagnóstico del estado hídrico

4.1. Introducción

Las actuaciones sobre los sistemas de programación y manejo del agua de riego constituyen uno de los aspectos más importantes de la modernización de los regadíos en los países con agricultura competitiva y respetuosa con el uso del recurso (Naor y Cohen, 2003).

Para la programación del riego en base al estado hídrico del cultivo se precisa de información suministrada por indicadores medidos en la planta, los cuales están directamente relacionados con las condiciones climáticas y edáficas, así como con la productividad del cultivo (Goldhamer et al., 2003; Remorini y Massai, 2003; Jones, 2004).

En este sentido, la utilización de indicadores del estado hídrico medidos en las plantas de forma discontinua lleva asociada algunas dificultades derivadas de metodologías relativamente complejas, necesidad de intervención de personal técnico especializado y la realización de frecuentes viajes al campo. Esto confiere a los indicadores de medida discontinua una menor utilidad para la programación del riego que los indicadores de medida continua. Por estas razones, en los últimos años se ha producido un renovado interés en el uso de registros continuos y automáticos de algunos indicadores del estado hídrico medidos en la planta, tales como el flujo de savia (FS) y las fluctuaciones del diámetro del tronco (FDT) (Huguet et al., 1992; Goldhamer et al., 1999; Fernández et al., 2001; Ortuño et al., 2006a), los cuales tienen la ventaja adicional de permitir una respuesta inmediata y fiable al déficit hídrico (Goldhamer et al., 1999; Ortuño et al., 2004a, b)

La medida de las tasas de FS en cultivos leñosos mediante la técnica de compensación del pulso de calor (Green y Clothier, 1988) constituye un procedimiento adecuado para estimar el consumo de agua por la planta (Green y Clothier, 1995; Moreno et al., 1996; Fernández et al., 2001; Ortuño et al., 2005), y es una importante herramienta de trabajo no sólo para investigar en las relaciones agua-planta sino sobre programación del riego (Ferrara y Flore, 2003; Fernández et al., 2008).

Los parámetros derivados de las FDT, y en especial la máxima contracción diaria del tronco (MCD) poseen probada validez para evaluar el estado hídrico de los cultivos (Huguet et al., 1992; Cabibel e Isberie, 1997; Cohen et al., 2001; Ortuño et al., 2004b), constituyendo una prometedora aproximación para la programación automática del riego (Fereres y Goldhamer, 2003; Goldhamer y Fereres, 2004).

Por estas razones, el objetivo de este capítulo se centró en comparar la sensibilidad y fiabilidad de las medidas de FS y MCD como indicadores del estado hídrico del melocotonero. Para ello, se estudió la respuesta de las tasas de FS y los valores de la MCD durante la implantación progresiva de un estrés hídrico moderado y su recuperación.

4.2. Condiciones experimentales

4.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo

El ensayo tuvo lugar en la finca experimental Tres Caminos del CEBAS (CSIC) sita en el Campo de la Matanza (Santomera, Murcia) (38° 06' N, 1° 02' O, 110 m de altitud). El suelo es un Calcisol esquelético (FAO, 1998) muy pedregoso, poco profundo y de textura franco-arcillosa. En la zona principal de localización de raíces (0.5 m) el suelo presentó un alto contenido de caliza, bajos contenidos de materia orgánica, baja capacidad de intercambio catiónico y bajos niveles de fósforo y potasio asimilables. La densidad aparente y el nivel de agua útil fueron 1.56 g cm^{-3} y 90 mm m^{-1} , respectivamente. Los contenidos volumétricos de agua en el suelo a saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron 0.38, 0.24 y $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente.

Para el ensayo se utilizaron melocotoneros (*Prunus persica* (L.) Batsch) extratempranos (cv. Flordastar), injertados sobre pie de GF-677 con poda de formación en vaso, plantados a 5m x 5m y con cuatro años de edad, que sombreaban un 49% del marco de plantación (Fotografía 4.1).



Fotografía 4.1. Vista de uno de los árboles de la parcela experimental.

El agua de riego, procedente del Trasvase Tajo-Segura presentó una conductividad eléctrica media de 1.15 dS m^{-1} , por lo que resultó con una buena aptitud para el riego debido al bajo riesgo de salinización y ausencia de riesgos de disminución de la permeabilidad del suelo.

Las prácticas culturales, es decir, las aplicaciones fitosanitarias, aplicación de herbicidas y fertilizantes, fueron las habitualmente realizadas por los agricultores de la zona durante todo el ensayo.

Los árboles se regaron en la noche utilizando un sistema de riego localizado con un solo lateral por fila de árboles y 4 emisores por planta de 4 l h^{-1} . La evapotranspiración del cultivo (ET_C) se estimó en función de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), un coeficiente estacional de cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1977) y el porcentaje de suelo sombreado por los árboles (Fereres y Goldhamer, 1990). El agua aplicada a cada tratamiento se midió utilizando contadores volumétricos.

4.2.2. Tratamientos

A partir del día 14 de junio (día del año (DA) 165) de 2005, durante el periodo postcosecha, todos los árboles de la parcela experimental se regaron por encima de sus necesidades de riego ($\approx 128\% ET_C$), a fin de obtener condiciones no limitantes de agua en el suelo.

Posteriormente, el día 9 de julio (DA 190) los melocotoneros se sometieron a dos tratamientos de riego diferentes durante 28 días (desde el DA 190 al 217). Los árboles del tratamiento control (T0) se continuaron regando como se acaba de indicar, mientras que a los árboles de un tratamiento T1 se les redujo progresivamente el riego, de modo que se regaron al 80% de la ET_C durante la primera semana, al 65% de la ET_C durante la segunda semana y al 50% de la ET_C durante la tercera y cuarta semana. A partir del DA 218, 6 de agosto, y durante un total de 5 días (DA 218-222), se recuperaron los melocotoneros del estrés regando al 100% de la ET_C .

4.2.3. Medidas

Parámetros ambientales y estado hídrico de las plantas

Los datos micrometeorológicos, concretamente, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento a 2 m de altura, se controlaron con una estación automática ubicada a unos 300 m de la parcela experimental. La evapotranspiración diaria del cultivo de referencia (ET_0) se calculó usando la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

El potencial hídrico del tallo al mediodía solar (Ψ_{tallo}) se midió semanalmente en cuatro árboles por tratamiento, tomando dos hojas adultas cercanas al tronco, por planta, las cuales se cubrieron con una bolsa de plástico y papel de aluminio (Fotografía 4.2) al menos 2 h antes de las medidas con cámara de presión (Fotografía 4.3).



Fotografía 4.2. Hojas tapadas para la medida de Ψ_{tallo} .



Fotografía 4.3. Cámara de presión para la medida de potencial hídrico.

4. Comparación indicadores del estrés hídrico

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) en los primeros 150 mm del perfil de suelo se midieron con TDR (modelo 1502C, Tektronix Inc., Beaverton, OR), como describieron Moreno et al. (1996). Entre 0.2 y 0.8 m de profundidad, θ_v se midió cada 0.1 m, empleando una sonda de neutrones (modelo 4300, Troxler Electronic Laboratories, Research Triangle Park, NC), en tubos de acceso a 1.0 m de los árboles, junto a un emisor. Las medidas se realizaron en la mañana y con una periodicidad de entre 5 y 20 días.

Variaciones micrométricas del tronco

Las variaciones micrométricas del tronco se midieron durante todo el ensayo en cuatro árboles por tratamiento, utilizando sensores de desplazamiento lineal y variable (modelo DF2.5, Solartron Metrology, Bognor Regis, UK), ubicados en portasensores (Fotografía 4.4) contruidos con Invar (aleación de Ni y Fe, de coeficiente de dilatación térmica cercano a cero (Katerji et al., 1994)) y aluminio (modelo R-150, Requena Co., España).



Fotografía 4.4. Detalle de la ubicación de un sensor LVDT (linear variable differential transformer).

Los sensores se colocaron en la orientación norte de los árboles y se cubrieron con una lámina termoprotectora plateada para evitar efectos térmicos y de humedad sobre el instrumental. Las medidas se registraron cada 2 s por un datalogger (modelo CR10X con multiplexor AM25T, Campbell Scientific, Logan, UT, USA), programado para obtener valores medios cada 15 min. A partir de las variaciones del diámetro del tronco a lo largo del día se obtuvieron los valores de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) (Fererres y Goldhamer, 2000).

Flujo de savia

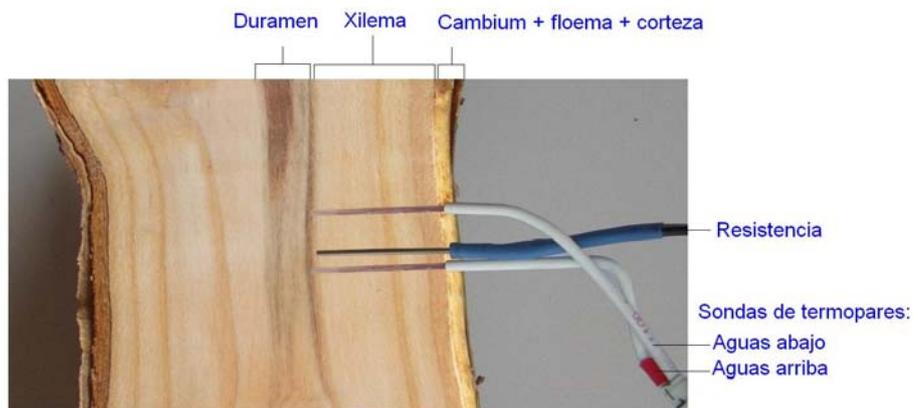
Las tasas de flujo de savia (FS) se midieron en los mismos árboles que las FDT, utilizando la técnica de compensación de pulso de calor (Swanson y Whitfield, 1981), colocando las sondas en cada árbol por encima de los sensores LVDT (Fotografía 4.5). Cada uno de los juegos de sondas estaba formado por una aguja calefactora de 50 mm de longitud (modelo HTR5, Tranzflo NZ Ltd, Palmerston North, NZ) y dos sondas de temperatura (modelo HP4TC, Tranzflo NZ Ltd, Palmerston North, NZ), todas ellas de 1.8 mm de diámetro e instaladas en paralelo y radialmente en el tronco, de forma que las sondas de temperatura quedasen ubicadas a 5 y 10 mm aguas arriba y abajo del calefactor, respectivamente. Cada sonda de temperatura estaba formada por cuatro termopares a la profundidad de 5, 12, 21 y 32 mm debajo del cambium, a fin de monitorizar el perfil de velocidad de la savia (Fotografía 4.6).

La velocidad del flujo de savia se midió utilizando el procedimiento de Green y Clothier (1988), teniendo en cuenta los coeficientes de corrección de Swanson y Whitfield (1981). Las temperaturas y las velocidades de pulso de calor correspondientes se obtuvieron cada 30 min utilizando un controlador de pulso de calor (modelo HPC-S, Tranzflo NZ Ltd, Palmerston North, NZ) comandado por un datalogger (modelo CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) en que quedaban registradas.

4. Comparación indicadores del estrés hídrico



Fotografía 4.5. Detalle de la ubicación de un sensor de flujo de savia.



Fotografía 4.6. Detalle de la ubicación de un sensor de flujo de savia en el interior del tronco.

Intensidad de señal de los indicadores

Los indicadores del estado hídrico medidos en las plantas resultan afectados esencialmente por la disponibilidad de agua en el suelo y por las condiciones climáticas. Además, la mayoría de ellos presentan diferentes dimensiones en sus ecuaciones, por lo que carece de sentido comparar la respuesta de los mismos ante una situación de estrés utilizando valores absolutos, siendo más adecuado comparar valores normalizados respecto de los correspondientes en condiciones no limitantes de agua en el suelo (Naor y Cohen, 2003).

A estos valores normalizados de cada indicador ($T0/T1$ o $T1/T0$), se les denomina *intensidad de señal*, cuya dispersión o *ruido* se suele medir mediante el coeficiente de variación de la media. Sin embargo, para valorar la utilidad de un indicador del estado hídrico en la programación del riego resulta mucho más adecuado utilizar la relación entre la intensidad de señal y el ruido, al integrar la intensidad de señal del indicador y su variabilidad (Goldhamer et al., 2000). De esta manera, cuando la intensidad de la señal es suficientemente elevada, la variabilidad entre árboles (ruido) puede no ser tan crítica (Goldhamer y Fereres, 2001).

Diseño estadístico y análisis

El experimento se realizó con un diseño completamente aleatorio de cuatro repeticiones, y cada repetición consistió en tres filas adyacentes de cinco árboles. Las medidas se tomaron en el árbol central de la fila intermedia de cada repetición.

Los valores de Ψ_{tallo} obtenidos en cada repetición se promediaron antes de calcular el valor medio y el error estándar correspondientes a cada tratamiento.

El modelo estadístico correspondiente al diseño del experimento fue un factorial completo, considerando el tratamiento de riego y el tiempo como factores principales fijos. El análisis se ajusta al modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + T_j + RT_{ij} + \varepsilon_{k(ij)} \quad [4.1]$$

, donde Y_{ijk} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, R_i el efecto del tratamiento de riego (i tiene 2 niveles: T0 y T1), T_j es el efecto del tiempo (j tiene x niveles correspondientes al número de días de medida), RT_{ij} es el efecto de interacción entre el tratamiento de riego y el tiempo, $\varepsilon_{k(ij)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (k tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada ij)).

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete estadístico SPSS 15.0.1 (SPSS Inc., 1989-2006) siguiendo el procedimiento de un modelo lineal general.

4.3. Resultados

Durante el periodo experimental la lámina de ET_0 acumulada fue de 188 mm, la temperatura máxima media fue de 33 °C y el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m) fue de 1.58 kPa, no aconteciendo lluvias durante el ensayo. Durante el periodo experimental, la ET_C alcanzó un total de 71.5 mm, aplicándose 92 mm de riego a los árboles del tratamiento T0.

Los melocotoneros del tratamiento T0 presentaron valores diarios durante el periodo experimental de FS y MCD entre 36.7 y 61.1 l d⁻¹, y entre 0.18 y 0.63 mm, respectivamente (Figuras 4.1A y 4.1B). Los valores de FS presentaron una tendencia a disminuir desde finales de julio, mientras que los valores de la MCD presentaron una tendencia a aumentar al inicio del ensayo desapareciendo esta tendencia a partir de mediados de julio debido a las oscilaciones observadas (Figuras 4.1A y 4.1B).

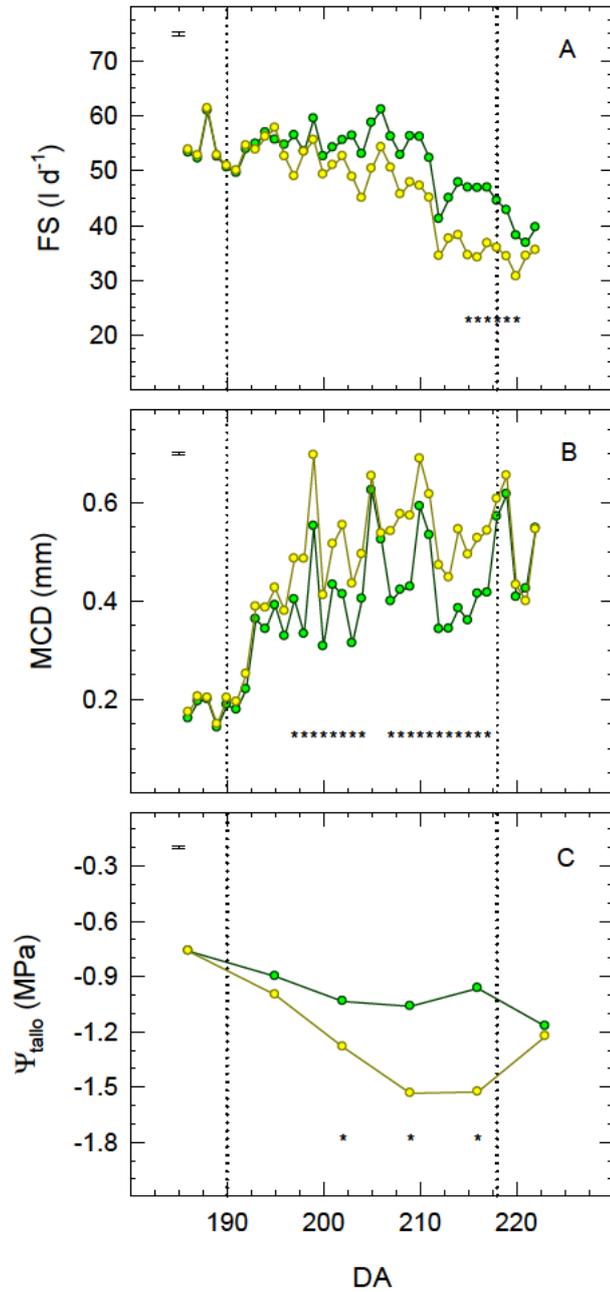


Figura 4.1. Valores diarios de flujo de savia (FS) (A), máxima contracción del tronco (MCD) (B) y potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) (C) en los árboles de los tratamientos T0 (símbolos verdes) y T1 (símbolos amarillos) durante el periodo de medidas. Las líneas punteadas verticales indican el principio y fin del periodo de riego deficitario en el tratamiento T1. Las barras verticales representan el doble del error estándar de la media global. Los asteriscos indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el test de la $LSD_{0.05}$. Cada punto es la media de cuatro valores.

El déficit hídrico originado en los árboles del tratamiento T1 originó aumentos de la MCD y disminuciones del FS que resultaron significativos a partir de los DA 197 y 215, respectivamente (Figuras 4.1A y 4.1B). Durante el periodo de recuperación del estrés los valores de la MCD resultaron iguales entre tratamientos a partir del DA 218 (Figura 4.1B), mientras que los valores de FS fueron iguales en ambos tratamientos a partir de tres días después (DA 221) (Figura 4.1A).

Los valores de Ψ_{tallo} en las plantas del tratamiento T0 fueron altos, presentando una muy ligera tendencia a disminuir durante el ensayo, mientras que en los árboles del tratamiento T1 los valores de Ψ_{tallo} disminuyeron progresivamente, alcanzando valores mínimos (-1.54 MPa) el DA 209 (Figura 4.1C).

Los valores del contenido volumétrico de agua en el suelo hasta 0.80 m de profundidad en el tratamiento T0 fueron casi constantes durante el periodo experimental y ligeramente superiores a los correspondientes a capacidad de campo (Figura 4.2). Las reducciones del riego indujeron una progresiva disminución de los niveles de θ_v en el suelo del tratamiento T1, alcanzándose valores mínimos al final del periodo de estrés, los cuales correspondieron a una reducción del 52% del agua útil (Figura 4.2). Tras la reanudación del riego al 100% de la ET_C , los valores de θ_v aumentaron alcanzando valores similares en ambos tratamientos.

En la Figura 4.3 se muestra una comparación de la respuesta de las intensidades de señal de los dos indicadores estudiados (FS y MCD) al déficit hídrico. La intensidad de señal del FS (T0/T1) presentó una tendencia global a aumentar en respuesta al estrés. Sin embargo, esta tendencia no fue clara al principio del periodo de reducción del riego, ya que se mantuvieron valores cercanos a la unidad. Cuando se recuperó el riego, los valores de intensidad de señal del FS disminuyeron, permaneciendo por encima de la unidad (Figura 4.3). Por el contrario, los aumentos de la intensidad de señal de la MCD (T1/T0) en respuesta al déficit hídrico fueron más precoces que los del otro indicador,

disminuyendo de forma muy acusada tras la reanudación del riego, presentando valores claramente indicativos de ausencia de estrés (Figura 4.3).

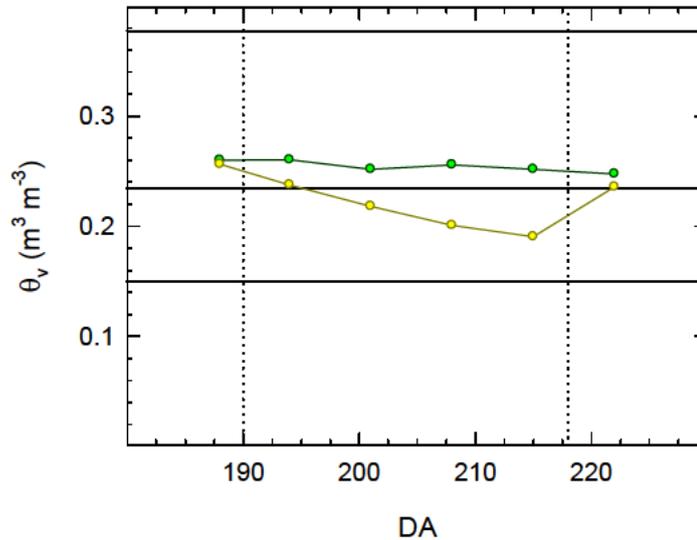


Figura 4.2. Contenido volumétrico de agua medio en el suelo hasta 0.80 m de profundidad en los tratamientos T0 (símbolos verdes) y T1 (símbolos amarillos) durante el periodo de medidas. Las líneas horizontales indican, de arriba a abajo, el contenido volumétrico de agua en el suelo a saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente. Cada punto es la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 4.1.

Para la utilización de un indicador del estado hídrico medido en las plantas con fines de programación del riego resulta imprescindible que éste sea capaz de suministrar información sobre posibles cambios en el estado hídrico de forma casi inmediata. Por esta razón se estudió la evolución de la intensidad de señal, ruido (CV) y la relación señal:ruido del FS y la MCD durante los 14 primeros días del periodo de riego deficitario y durante los 5 días del periodo de recuperación.

Durante los 14 días considerados del periodo de riego deficitario, la MCD presentó mayor intensidad de señal y menor ruido que el FS (Tabla 4.1), mientras que durante el periodo de recuperación del estrés el FS

presentó importantes niveles de variabilidad (ruido), los cuales, a pesar del mayor valor de intensidad de señal media, condujo a una menor relación señal:ruido (Tabla 4.1).

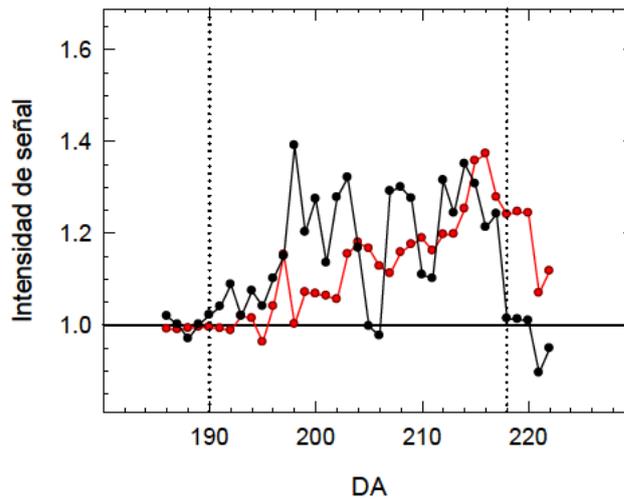


Figura 4.3. Intensidades de señal del flujo de savia (FS) (símbolos rojos) y máxima contracción diaria del tronco (MCD) (símbolos negros) durante el periodo experimental. Cada punto es la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 4.1.

Tabla 4.1. Intensidad de señal media de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y tasas diaria de flujo de savia (FS), ruido medio y relación señal:ruido desde el DA 190 al 203 y desde el DA 218 al 222. Los valores de intensidad de señal media o ruido medio para cada periodo seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de la $LSD_{0.05}$.

DA	Indicador	Intensidad de señal media	Ruido medio	Señal/ruido
190 - 203	MCD	1.15a	0.153a	7.52
	FS	1.04b	0.283b	3.68
218 - 222	MCD	0.98a	0.055a	17.82
	FS	1.16b	0.446b	2.60

4.4. Discusión

Aunque el agua aplicada a los árboles del tratamiento T0 fuese claramente superior a los requerimientos hídricos del cultivo, el hecho de que los valores de θ_v resultasen sólo ligeramente por encima de los niveles correspondientes a la capacidad de campo (Figura 4.2), los valores de Ψ_{tallo} resultasen altos y constantes (Figura 4.1C), y no se detectasen síntomas visuales confirmaron la no existencia de situaciones de exceso de agua y que estas plantas se encontraron bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo (Ortuño et al., 2006b).

Las características del déficit hídrico generado en los melocotoneros del tratamiento T1 puede considerarse como moderado ($\Psi_{\text{tallo}} = -1.54$ MPa) (Goldhamer et al., 1999; Ortuño et al., 2006a) y de lento desarrollo (-0.03 MPa d^{-1}) (Hale y Orcutt, 1987).

Teniendo en cuenta que cualquier comparación de las sensibilidades de diferentes indicadores del estado hídrico medidos en las plantas debe considerar la intensidad de un indicador en el contexto de su variabilidad (Goldhamer y Fereres, 2001; Naor y Cohen, 2003), es claro que la MCD resultó ser un indicador más adecuado que el FS para la programación del riego, ya que su respuesta al déficit hídrico fue más precoz y sensible (Figuras 4.1A, 4.1B y 4.3, Tabla 4.1). En este sentido, Remorini y Massai (2003) señalaron que las fluctuaciones del diámetro del tronco en melocotoneros eran el indicador fisiológico que antes se anticipaba en detectar cambios en el funcionamiento hídrico de los árboles. Además, Ortuño et al. (2005, 2006a) demostraron que la MCD era más precoz y sensible que el FS para detectar el déficit hídrico en limonero.

El hecho de que, durante el periodo de recuperación, el FS presentase valores superiores a la unidad, mientras que la intensidad de señal de la MCD disminuyese de forma drástica, alcanzando valores menores o cercanos a la unidad, confirmó la sensibilidad y robustez de la MCD con fines de programación del riego (Figura 4.3, Tabla 4.1).

Posiblemente, la alta sensibilidad del melocotonero a la cavitación, con la consecuente reducción de la conductividad hidráulica del xilema (Massai et al., 2000) pudo ser el mecanismo que actuó durante el periodo de recuperación, evitando la completa recuperación de las tasas de FS cuando se restauró el riego al 100% de la ET_C (Figuras 4.1A y 4.3).

Los resultados expuestos en este capítulo indican que la MCD es un indicador del estado hídrico medido en las plantas más sensible y consistente que el FS para detectar cambios en el estado hídrico del melocotonero. Además, otros aspectos complementarios, tales como que los sensores no tuvieron que reponerse durante el periodo de experimental, los mínimos medios humanos y técnicos necesarios para su mantenimiento, y la posibilidad de obtener información automática en tiempo real confirman la adecuación de la MCD como herramienta para la programación del riego (Goldhamer y Fereres, 2004).

4.5. Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage* 56, FAO, Roma.
- Cabibel, B., Isberie, C. 1997. Flux de sève et alimentation hydrique de cerisiers irrigués ou non en localisation. *Agronomie* 17: 97-112.
- Cohen, M., Goldhamer, D., Fereres, E., Girona, J., Mata, M. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 76: 55-60.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 24, Rome, 49 p.
- FAO. 1998. World Referente Base for Soil Resources. J.A. Deckers, F.O. Nachtergaele, O.C. Spaargaren, Eds. FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, Roma, 165 pp.
- Fereres, E., Goldhamer, D. 2000. Avances recientes en la programación de los riegos. *Ingeniería del Agua* 7: 47-54.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. *En Irrigation of Agricultural Crops*. Eds. B.A. Stewart and D.R. Nielsen. A.S.A. Madison, USA, Monograph 30, pp 987-1017.

- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78: 139-144.
- Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Girón, I.F., Moreno, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management* 51: 99-123.
- Fernández, J.E., Romero, R., Montañó, J.C., Díaz-Espejo, A., Muriel, J. L., Cuevas, M.V., Moreno, F., Girón, I.F., Palomo, M.J. 2008. Design and testing of an automatic irrigation controller for fruit tree orchards, based on sap flow measurements. *Australian Journal of Agricultural Research* 59: 589–598.
- Ferrara, G., Flore, J.A. 2003. Comparison between different methods of measuring transpiration in potted apple trees. *Biologia Plantarum* 46: 41-47.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Cohen, M., Girona, J., Mata, M. 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management. *Acta Horticulturae* 537: 431-445.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of American Society for Horticultural Science* 124: 437-444.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20: 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11-19.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M. 2003. Can almond trees directly dictate their irrigations needs? *California Agriculture* 57: 138-144.
- Green, S.R., Clothier, B.E. 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany* 39: 115-123.
- Green, S.R., Clothier, B.E. 1995. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetted of the root zone. *Plant and Soil* 173: 317-328.
- Hale, M.G., Orcutt, D.M. 1987. The physiology of plants under stress. John Wiley & Sons, New York.
- Huguet, J.G., Li, S., Lorendeau, J., Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67: 631-640.

- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55: 2427-2436.
- Katerji, N., Tardieu, F., Bethenod, O., Quetin, P. 1994. Behaviour of maize stem diameter during drying cycles: comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Science* 34: 165-169.
- Massai, R., Ferreira, M.I., Paço, T.A., Remorini, D. 2000. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. *Acta Horticulturae* 537: 351-358.
- Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R. 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil* 184: 85-96.
- Naor, A., Cohen, S. 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field grown apple trees. *HortScience* 38: 547-551.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2004a. Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil* 267: 263-270.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2004b. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science* 227: 275-280.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2005. Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany* 54: 155-162.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and Function* 20: 1-8.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil* 279: 229-242.
- Remorini, D., Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22: 39-46.
- SPSS Inc. 1989-2006. SPSS Professional Statistics, Chicago, Illinois. USA.
- Swanson, R.H., Whitfield, D.W.A. 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany* 32: 221-239.

5. Evaluación del uso de sensores de flujo de savia y diámetro del tronco en la programación del riego

5.1. Introducción

Si bien, a primera vista los resultados obtenidos en el capítulo anterior podrían inducir a pensar en la no conveniencia del flujo de savia (FS) para programar el riego, deben tenerse en cuenta otros hechos importantes. En primer lugar, los resultados aludidos indicaban la mayor robustez de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) para la detección del déficit hídrico, lo que no inhabilita al FS como indicador a ser utilizado en la programación del riego ya que otros autores han propuesto al FS como una prometedora herramienta para ello (Green y Clothier, 1988; Moreno et al., 1996; Eastman y Gray, 1998; Massai et al., 2000; Fernández et al., 2001; Nicolás et al., 2005). Además, recientemente, se han obtenido prometedores resultados con un controlador de riego basado en medidas de flujo de savia (Fernández et al., 2008).

Por otra parte, no existe información contrastada de programación del riego utilizando exclusivamente medidas de flujo de savia, y que si bien existe bibliografía en la que se ha demostrado la posibilidad de programar el riego sólo con medidas de la MCD (Goldhamer y Fereres, 2004; García-Orellana et al., 2007; Vélez et al., 2007; Ortuño et al., 2008), estos trabajos han sido realizados para programar riegos deficitarios capaces de inducir distintas situaciones de estrés hídrico.

Por tanto, cabe destacar que la bibliografía no contempla investigaciones sobre la posibilidad de atender plenamente los requerimientos hídricos de un cultivo mediante el riego programado con medidas del estado hídrico de las plantas. En consecuencia, el trabajo contenido en este capítulo se centró en verificar las siguientes hipótesis: a) la programación del riego puede basarse exclusivamente en medidas de la MCD o el FS, y b) la programación del riego manteniendo la intensidad de señal del indicador en valores muy próximos a la unidad puede suponer una estima de la ET_c , siempre y cuando no acontezcan pérdidas por drenaje. Para ello, se comparó la respuesta de

melocotoneros bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo con otros en los cuales el riego había sido programado manteniendo la intensidad de señal de la MCD o el FS en valores muy cercanos a la unidad, estudiándose además de la posibilidad de programar el riego sólo con medidas de la MCD o el FS, los efectos sobre el estado hídrico del suelo y la planta, la producción y las características de ésta.

5.2. Condiciones experimentales

5.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo

El ensayo tuvo lugar en la finca experimental del CEBAS (CSIC) en una parcela cercana a la descrita en el capítulo anterior. El suelo, de muy parecidas características químicas y texturales, presentó una densidad aparente y nivel de agua útil de 1.58 g cm^{-3} y 200 mm m^{-1} , respectivamente. Los contenidos volumétricos de agua en el suelo a punto de marchitez permanente, capacidad de campo y saturación fueron 0.15 , 0.35 y $0.49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente.

El experimento se realizó sobre el mismo material vegetal con cinco años de edad, que sombreaban un 54% del marco de plantación. El aclareo manual de frutos se realizó 30 días después de la plena floración (día del año, DA, 70). Este aclareo se realizó a lo largo de los ramos fructíferos, dejando un fruto cada 25 cm aproximadamente.

Los árboles se regaron en la noche utilizando un sistema de riego localizado con un solo lateral por fila de árboles y 8 emisores por planta de 2 l h^{-1} . El agua aplicada a cada tratamiento se midió utilizando contadores volumétricos.

Las prácticas culturales, es decir, las aplicaciones fitosanitarias, aplicación de herbicidas y fertilizantes, fueron las habitualmente realizadas por los agricultores de la zona, durante todo el ensayo.

5.2.2. Tratamientos

Desde el 29 de enero (DA 29) al 10 de noviembre (DA 314) de 2006, los árboles del tratamiento control (T0) se regaron diariamente por encima de la evapotranspiración del cultivo ($155\% ET_C$) a fin de conseguir condiciones no limitantes de agua en el suelo. Las necesidades hídricas del cultivo se determinaron en función de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), de un coeficiente de cultivo estacional (FAO 56, Allen et al., 1998) y del porcentaje de suelo sombreado por los árboles (Fereres y Goldhamer, 1990).

A partir del 18 de marzo (DA 77) se programó el riego a fin de mantener la intensidad de señal del FS (tratamiento T1) y la MCD (tratamiento T2) en valores muy próximos a la unidad. Para ello, cuando la intensidad de señal del FS o la MCD de al menos dos de tres días consecutivos excedió el correspondiente valor umbral de intensidad de señal la dosis de riego se aumentó un 10%, mientras que cuando al menos dos de los tres días la intensidad de señal fue inferior al valor umbral el riego se redujo un 10%. Este protocolo de riego se basó en el propuesto por Goldhamer y Fereres (2001) para árboles adultos con riego de alta frecuencia.

5.2.3. Medidas

Parámetros ambientales y estado hídrico de las plantas

Se tomaron datos micrometeorológicos de la misma estación climática automática mencionada en el apartado 4.2.3. El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se determinó en la mañana, con una periodicidad de entre 5 a 14 días, en cuatro repeticiones por tratamiento, y siguiendo el mismo procedimiento metodológico descrito en el capítulo anterior (4.2.3).

El potencial hídrico del tallo al mediodía solar (Ψ_{tallo}) se midió en

cuatro árboles por tratamiento, tomando dos hojas adultas cercanas al tronco, por planta, las cuales se cubrieron con una bolsa de plástico y papel de aluminio al menos 2 h antes de las medidas con cámara de presión.

Los DA 87 (fase I de crecimiento del fruto), 101 (fase II de crecimiento del fruto), 123 (fase III de crecimiento del fruto), 160 y 200 (postcosecha), se midieron las tasas de conductancia foliar (g_l) y fotosíntesis neta (P_n) al mediodía solar en dos hojas maduras expuestas al sol por planta (cuatro plantas por tratamiento), usando un medidor portátil de fotosíntesis (LI-6400, Li-Cor, Lincoln, USA) (Fotografía 5.1).



Fotografía 5.1. Medidor de fotosíntesis LI-COR, mod. LI-6400.

Variaciones micrométricas del tronco y flujo de savia

Para las medidas de las variaciones micrométricas del tronco y el flujo de savia, se siguieron procedimientos idénticos a los descritos en el apartado 4.2.3, utilizando cuatro árboles por tratamiento.

Calidad del fruto

La calidad de los frutos en cada tratamiento se evaluó distinguiendo entre la proporción de producción comercial y no comercial, es decir, los porcentajes de frutos con diámetro superior e inferior a 56 mm, respectivamente.

De acuerdo con la directiva 3596/90 de la CEE (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 1995), 56 mm es el diámetro mínimo para que un fruto sea considerado de categoría extra, la cual se subdivide, a su vez, en diferentes categorías: A, 73 mm > diámetro ≥ 67 mm; B, 67 mm > diámetro ≥ 61 mm y C, 61 mm > diámetro ≥ 56 mm.

Diseño estadístico y análisis

El experimento se realizó con un diseño completamente aleatorio con cuatro repeticiones, cada repetición consistió en tres filas adyacentes de 13 árboles. Las medidas se tomaron en los árboles centrales de la fila intermedia de cada repetición, los cuales presentaban una apariencia muy similar (área foliar, sección del tronco, altura, superficie de suelo sombreada, etc.) y el resto de árboles se consideraron como bordes.

Los valores de g_i , P_n y Ψ_{tallo} obtenidos en cada repetición se promediaron antes de calcular el valor medio y el error estándar correspondientes a cada tratamiento.

El modelo estadístico correspondiente al diseño del experimento fue un factorial completo, considerando el método de programación del riego y el tiempo como factores principales fijos. El análisis se ajusta al modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + T_j + RT_{ij} + \varepsilon_{k(ij)} \quad [5.1]$$

, donde Y_{ijk} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, R_i el efecto

del tratamiento de programación del riego (i tiene 3 niveles: T0, T1 y T2), T_j es el efecto del tiempo (j tiene x niveles correspondientes al número de días de medida), RT_{ij} es el efecto de interacción entre el tratamiento de programación del riego y el tiempo, $\varepsilon_{k(ij)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (k tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada ij)).

El análisis del efecto del riego en la producción y calidad de la cosecha se ajustó al modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + \varepsilon_{k(ij)} \quad [5.2]$$

, donde Y_{ij} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, R_i el efecto del tratamiento de programación del riego (i tiene 3 niveles: T0, T1 y T2), y $\varepsilon_{k(ij)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (k tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada i)).

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete estadístico SPSS 15.0.1 (SPSS Inc., 1989-2006) siguiendo el procedimiento de un modelo lineal general.

5.3. Resultados

Los valores diarios de ET_0 y el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m) se incrementaron desde el inicio del ensayo, alcanzando valores máximos en julio y disminuyendo posteriormente (Figura 5.1). Durante el ensayo, las temperaturas máximas y mínimas medias diarias fueron 30.9 y 7.7 °C, respectivamente, la humedad relativa media diaria fue de 61.1% (datos no mostrados), y los valores acumulados de ET_0 alcanzaron los 1107.4 mm (Figura 5.1). La pluviometría registrada durante el ensayo fue de 237.4 mm, la cual aconteció esencialmente en primavera y otoño (Figura 5.1).

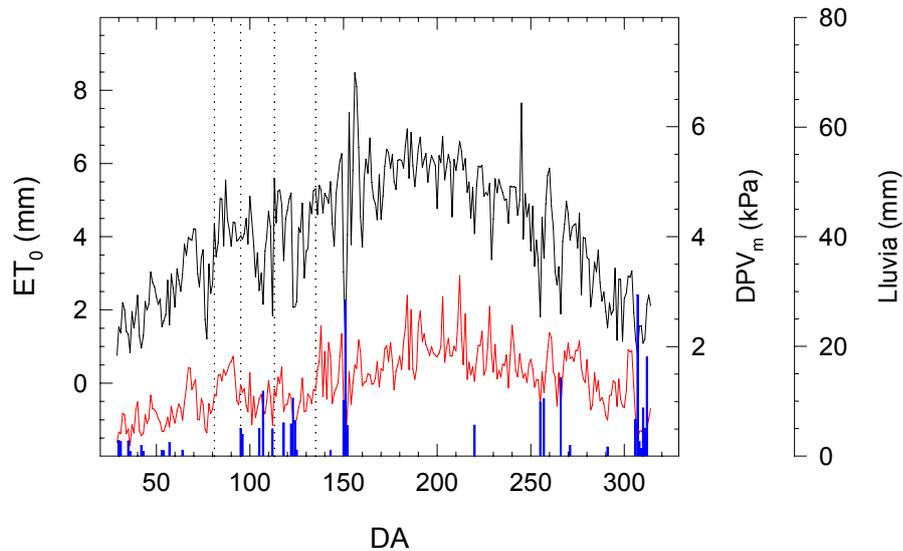


Figura 5.1. Valores diarios de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0 , línea negra), déficit de presión de vapor medio (DPV_m , línea roja) y lluvia (líneas verticales azules) en el periodo experimental.

Los niveles de θ_v en los primeros 0.80 m del perfil del suelo del tratamiento T0 se mantuvieron casi constantes y siempre muy cercanos a los de capacidad de campo (94.1% del valor de θ_v a capacidad de campo) (Figura 5.2A). Los tratamientos T1 y T2 presentaron diferentes valores de θ_v (77.8 y 81.5% del valor de θ_v a capacidad de campo, respectivamente) entre los DA 89 y 153, y entre los DA 215 y 233, los cuales, a su vez, resultaron inferiores a los del tratamiento T0 durante todo el ensayo (Figura 5.2A). El perfil de humedad del suelo en los tratamientos T1 y T2 se caracterizó por el hecho de que por debajo de los 600 mm de profundidad los valores de θ_v resultaron claramente inferiores a los de capacidad de campo, no indicando drenaje (datos no mostrados).

Los valores de Ψ_{tallo} en los árboles de los tratamientos T0, T1 y T2 oscilaron entre -0.34 y -0.95 MPa, entre -0.40 y -1.11 MPa, y entre -0.38 y -1.00 MPa, respectivamente (Figura 5.2B). A excepción del DA 138, no se detectaron diferencias significativas entre las plantas de los tratamientos T0 y T2. Sin embargo, los valores de Ψ_{tallo} en las plantas T1 fueron frecuentemente inferiores a los de T0, principalmente entre los DA 94 y

216 (fases II y III de crecimiento del fruto y tres meses después de la cosecha). Posteriormente, coincidiendo con la disminución de la demanda evaporativa y el periodo otoñal de lluvias (Figura 5.1), estas diferencias entre tratamientos disminuyeron hasta presentar valores similares, a excepción de los DA 272 y 297. No se detectaron diferencias entre tratamientos en los valores de g_l y P_n durante el periodo experimental (datos no mostrados).

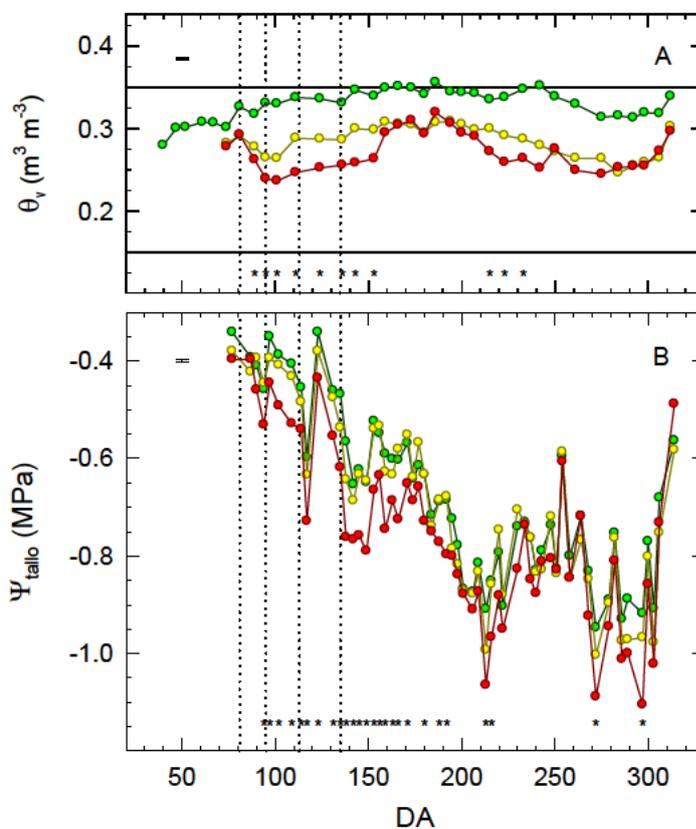


Figura 5.2. Contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) hasta 0.80 m de profundidad (A) y potencial hídrico del tallo al mediodía (Ψ_{tallo}) (B) en los tratamientos T0 (símbolos verdes), T1 (símbolos rojos) y T2 (símbolos amarillos) durante el periodo experimental. Los periodos de tiempo entre las líneas punteadas verticales indican, de izquierda a derecha, las fases I, II y III de crecimiento del fruto. Las líneas horizontales indican, de arriba a abajo, el θ_v a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente. Las barras verticales representan el doble del error estándar de la media global. Los asteriscos indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el test de la $LSD_{0.05}$. Cada punto es la media de cuatro valores.

Las tasas diarias de FS en las plantas de los tratamientos T0 y T1 oscilaron entre 11.2 y 105.2 l d^{-1} , presentando una clara tendencia a aumentar hasta primeros de agosto (DA 215) y disminuyendo posteriormente (Figura 5.3A). Los valores de la MCD en los árboles de los tratamientos T0 y T2 oscilaron de forma pronunciada con valores entre 0.02 y 0.43 mm. Los valores globales de la MCD incrementaron desde el inicio del ensayo hasta finales de julio (DA 212) y disminuyeron a partir de principios de octubre (Figura 5.3B)

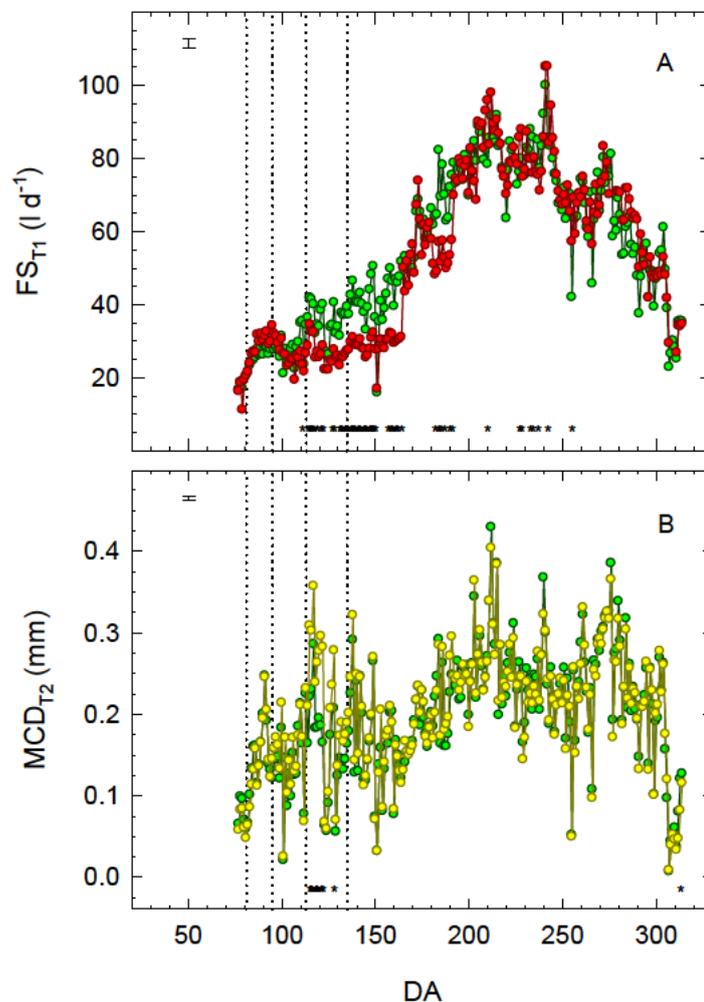


Figura 5.3. Valores diarios de flujo de savia (FS) en las plantas de los tratamientos T0 (símbolos verdes) y T1 (símbolos rojos) (A) y máxima contracción diaria del tronco (MCD) en las plantas de los tratamientos T0 (símbolos verdes) y T2 (símbolos amarillos) (B) durante el periodo experimental. Cada punto es la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 5.2.

Los mencionados valores de FS en ambos tratamientos (T0 y T1) resultaron significativamente diferentes con frecuencia, especialmente durante la fase III de crecimiento del fruto y después de la recolección (Figura 5.3A). Sin embargo, las diferencias significativas entre los valores de la MCD en los tratamientos T0 y T2 fueron muy escasas, las cuales acontecidas principalmente al inicio de la fase III de crecimiento del fruto (Figura 5.3B)

Los valores de intensidad de señal de la MCD y el FS presentaron diferentes comportamientos en ambos tratamientos de riego (Figuras 5.4A y 5.4B). Si bien, antes de la cosecha las oscilaciones de los valores de intensidad de señal de la MCD fueron relativamente pronunciados (coeficiente de variación (CV) medio de la MCD de 0.168), después de la cosecha estas oscilaciones disminuyeron sensiblemente (CV = 0.083). Por el contrario, los valores de intensidad de señal del FS oscilaron muy considerablemente, tanto antes como después de la cosecha (valores de CV de 0.182 y 0.188, respectivamente).

El agua aplicada en los tratamientos T1 y T2, programados en función de las intensidades de señal del FS y la MCD respectivamente según los tres días precedentes (Figura 5.4A y 5.4B), reflejó diferentes dosis de agua durante el ensayo. Concretamente, las dosis acumuladas de agua fueron un 34 y 7% menores en los tratamientos T1 (463.2 mm) y T2 (654.5 mm), respectivamente, en relación a la ET_C (704.9 mm) estimada. El agua aplicada a las plantas del tratamiento T0 entre el DA 77 y el 314 fue de 1089.7 mm. Por otra parte, las desviaciones en las dosis de agua aplicada al tratamiento T1 respecto a la ET_C estimada fueron particularmente pronunciadas desde el inicio del ensayo al DA 152 (crecimiento del fruto y 17 días después de la cosecha) y entre el DA 193 y el fin del ensayo, mientras que las desviaciones detectadas en el tratamiento T2 ocurrieron principalmente desde el inicio del ensayo y el DA 106 (fase I y primera mitad de la segunda fase de rápido crecimiento del fruto) y entre el DA 230 y 280 (Figura 5.4C).

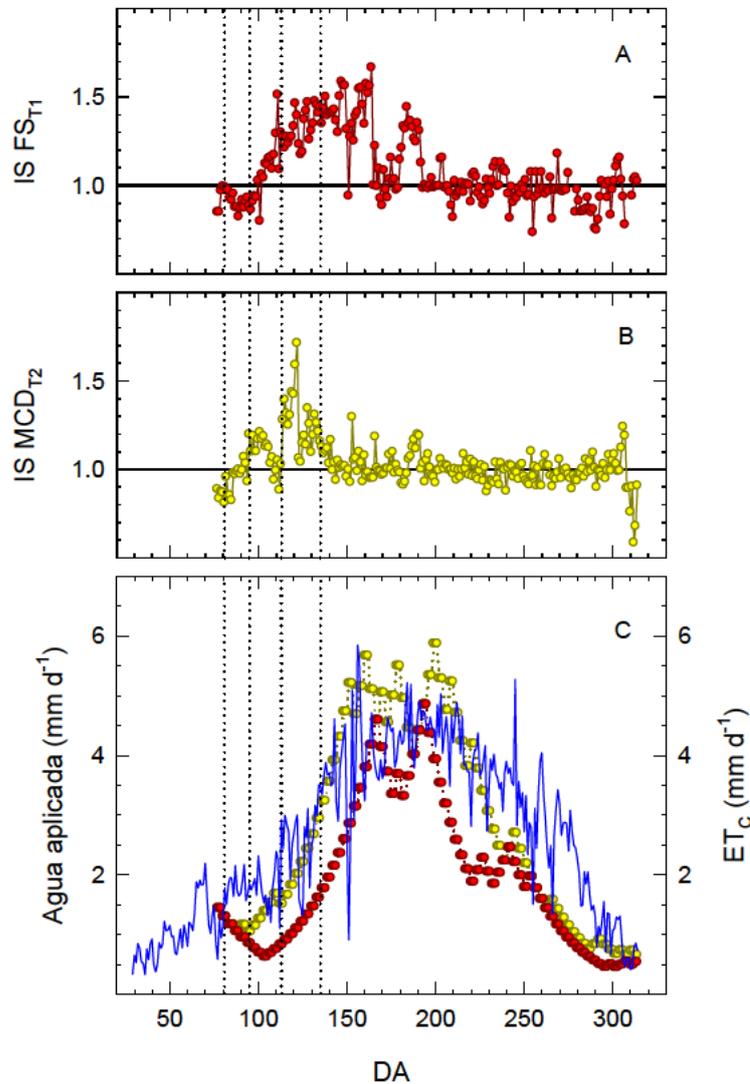


Figura 5.4. Valores de intensidad de señal (IS) del flujo de savia (FS) y la máxima contracción diaria del tronco (MCD) en las plantas de los tratamientos T1 (A) y T2 (B), respectivamente, y dosis de riego aplicado (C) en los tratamientos T1 (símbolos rojos) y T2 (símbolos amarillos) comparadas con la estima de la evapotranspiración del cultivo (ET_c, línea azul) durante el periodo de medidas. Cada dato de FS y MCD es la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 5.2.

A fin de comparar el nivel de estrés hídrico en las plantas de los tratamientos T1 y T2 se estudió la evolución de la relación entre las intensidades de señal de la MCD en ambos tratamientos de riego (T1/T2)

(Figura 5.5A), y los resultados mostraron que durante la mayor parte del periodo experimental las plantas del tratamiento T1 presentaron un nivel de estrés hídrico mayor que las plantas del tratamiento T2.

La comparación de las intensidades de señal del FS y la MCD en las plantas del tratamiento T1 mostró como en la mayoría de los días del ensayo la intensidad de señal de la MCD presentó valores más altos que los correspondientes a la intensidad de señal del FS (Figura 5.5B).

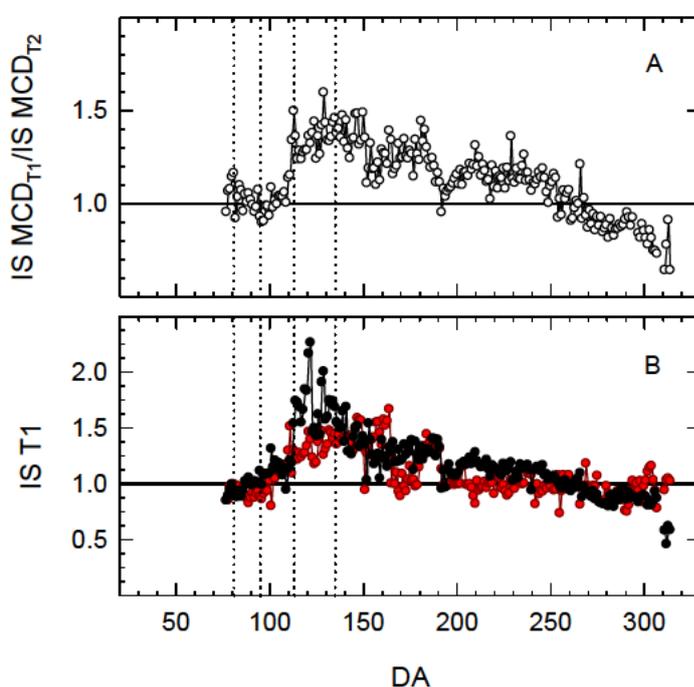


Figura 5.5. Cociente entre los valores de intensidad de señal de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) en las plantas de los tratamientos T1 y T2 ($IS_{MCD_{T1}} / IS_{MCD_{T2}}$) (A) y evolución de las intensidades de señal del FS (símbolos negros) y MCD (símbolos rojos) en las plantas del tratamiento T1 (B) durante el periodo experimental. Cada punto es la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 5.2.

Aunque atendiendo al número de frutos por árbol (carga de frutos) y por área de sección del tronco (eficiencia de la carga de frutos) no se encontraron diferencias entre tratamientos, las plantas del tratamiento T1 presentaron una menor producción y peso medio de los frutos (Tabla 5.1).

Por el contrario, las plantas de los tratamientos T0 y T2 presentaron una proporción similar de frutos de las categorías extra A, B y C y de frutos no comercializables (Tabla 5.2). Sin embargo, los frutos de las plantas del tratamiento T1 mostraron una significativa tendencia a ser más pequeños, ya que la proporción de frutos en las categorías C y no extra fue más alta que en los otros tratamientos y la proporción de frutos de la categoría A fue más pequeña (Tabla 5.2).

Tabla 5.1. Efecto de los tratamientos de riego sobre la carga de frutos (número de frutos por árbol), eficiencia de la carga de frutos (número de frutos por árbol en relación a la sección del tronco, cm^2), peso medio de los frutos (g) y producción (kg árbol^{-1}). Los valores de cada columna seguidos de letras distintas son estadísticamente diferentes según el test de la $\text{LSD}_{0.05}$.

Tratamiento	Carga de frutos	Eficiencia de la carga de frutos	Peso medio de los frutos	Producción
T0	221.0a	2.54a	125.8 a	26.4a
T1	192.4a	2.51a	117.2b	21.0b
T2	212.8a	2.54a	122.9a	24.6a

Tabla 5.2. Efecto de los tratamientos de riego sobre la distribución de las diferentes categorías cosechadas de melocotón (%) (directiva CEE 3596/90) (categorías de frutos extra: A, $73 \text{ mm} > \text{diámetro} \geq 67 \text{ mm}$; B, $67 \text{ mm} > \text{diámetro} \geq 61 \text{ mm}$; C, $61 \text{ mm} > \text{diámetro} \geq 56 \text{ mm}$, y frutos de categoría no extra, $\text{diámetro} < 56 \text{ mm}$). A los datos se les aplicó la transformada $\arcsen \sqrt{\%}$. Los valores de cada columna seguidos de letras distintas son estadísticamente diferentes según el test de la $\text{LSD}_{0.05}$.

Tratamiento	Categoría de los frutos			
	A	B	C	No extra
T0	22.6a	53.6a	20.8a	3.0a
T1	10.5b	43.3a	34.5b	11.7b
T2	20.0a	47.1a	25.0a	7.9ab

5.4. Discusión

El hecho de que los valores del Ψ_{tallo} , g_l y P_n en los árboles del tratamiento T0 fuesen similares a los de las plantas del tratamiento T2 y que no se detectara ningún tipo de síntomas confirmó la ausencia de situaciones de exceso de agua en el suelo a pesar de que el agua aplicada al tratamiento T0 fue claramente superior a las necesidades hídricas del cultivo durante el periodo experimental.

Los tratamientos de riego T1 y T2 indujeron dos situaciones diferentes en cuanto al estado hídrico de los árboles como consecuencia de los niveles de θ_v . Por una parte, el hecho de que los valores de g_l y P_n (datos no mostrados) y Ψ_{tallo} (Figura 5.2B), la producción y las características de la cosecha (Tablas 5.1 y 5.2) fuesen similares en los árboles de los tratamientos T2 y T0 indicaron que el estado hídrico de las plantas T2 no resultó modificado por el procedimiento de programación del riego. Por otra parte, y de forma opuesta, en las plantas del tratamiento T1 los valores de Ψ_{tallo} , producción y tamaño de los frutos fueron menores que en los correspondientes al tratamiento T0, evidenciando la existencia de una situación de déficit hídrico, la cual puede considerarse como moderada ya que no se produjo regulación estomática por efecto del déficit hídrico alcanzado (Besset et al., 2001; Centritto et al., 2002; Girona et al., 2005). Además, el hecho de que la intensidad de señal de la MCD en las plantas del tratamiento T1 fuese mayor que en las del T2 (Figura 5.5A) durante la mayoría del ensayo confirmó que el déficit hídrico de las plantas T1 fue superior al de las plantas T2.

El hecho de que en las plantas del tratamiento T1 la intensidad de señal de la MCD fuese mayor que la del FS (Figura 5.5B) confirmó que la MCD es un indicador más sensible que el FS para detectar el déficit hídrico (Remorini y Massai, 2003; Ortuño et al., 2005, 2006). En este sentido, cabe pensar que los fenómenos de cavitación, con la consecuente drástica reducción de la conductividad hidráulica del xilema,

y a los cuales son especialmente sensibles los melocotoneros, podrían ser responsables del retraso en la recuperación de las tasas de FS en las plantas.

Los similares valores de carga de frutos en los tres tratamientos de riego (Tablas 5.1 y 5.2) inducen a pensar que el menor tamaño de los frutos del tratamiento T1 pudo deberse al déficit hídrico observado durante el crecimiento del fruto (Figuras 5.2B y 5.5A), lo que a su vez confirma que el déficit hídrico durante la fase de rápido crecimiento del fruto retrasa el alcance del tamaño final (Li et al., 1989; Boland et al., 1993; Torrecillas et al., 2000; Girona et al., 2004).

La proximidad a la unidad de los valores de intensidad de señal de la MCD y su baja variabilidad durante el periodo postcosecha (Figura 5.4B) demuestra que las dosis de riego aplicadas se ajustaron de forma adecuada, lo que confirma la capacidad de este parámetro para ajustar el programa de riego conforme se produce la información requerida, y que la programación del riego del melocotonero puede realizarse exclusivamente con medidas de la MCD (Goldhamer y Fereres, 2004; García-Orellana et al., 2007; Vélez et al., 2007; Ortuño et al., 2008).

El hecho de que las desviaciones, respecto del valor umbral seleccionado, de las intensidades de señal del FS entre los DA 102 y 165 y entre los DA 180 y 193 (Figura 5.4A), y las de la MCD durante la fase III de crecimiento del fruto fuesen mayores de lo esperado (Figura 5.4B), sugiere que la precisión de la programación del riego disminuye en periodos en los que las necesidades de riego aumentan (Figura 5.4C) y que los aumentos del 10% de las dosis de riego son insuficientes, o que el riego tendría que programarse más frecuentemente que cada tres días.

Durante periodos en los cuales la intensidad de señal de un indicador del estado hídrico medido en las plantas adquiere valores iguales a la unidad, se evidencia que el cultivo no refleja ninguna situación de estrés asociada con el riego y, si no acontece ningún episodio de drenaje, el riego aplicado podría considerarse como una estima de la evapotranspiración actual del cultivo y compararse con la ET_C estimada.

En este sentido, tomando en consideración el periodo postcosecha durante el cual el CV de la intensidad de señal de la MCD en las plantas T2 fue de sólo 0.083 (Figura 5.4B), la ET_C estimada (584 mm) sobrevaloró en menos del 5% la evapotranspiración estimada a partir de la lámina de agua aplicada (558.1 mm) en el tratamiento programado con las medidas de la MCD (Figura 5.4C). En consecuencia, queda claro que teniendo en cuenta las modificaciones propuestas para el protocolo de riego, la MCD puede ser una prometedora herramienta para la estima de las necesidades de riego de los cultivos.

Cabe indicar que los resultados obtenidos en este capítulo sugieren que la programación del riego utilizando medidas de la MCD es más adecuada que con medidas de FS, ya que puede realizarse exclusivamente con medidas de ese indicador, es más sensible y consistente para detectar cambios en el estado hídrico del melocotonero, siendo capaz de evitar la aparición de cualquier situación de déficit hídrico, y no afectar ni a la producción ni al tamaño de los frutos.

No obstante, deberían introducirse algunos cambios en el protocolo de riego ensayado a fin de disminuir las desviaciones de la intensidad de señal de la MCD por encima de la unidad. Estas modificaciones deberían contemplar mayores frecuencias de programación del riego y/o aumentos en el porcentaje del agua a aplicar. Además, programas de riego que mantengan la intensidad de señal muy cercana a la unidad podrían constituir una herramienta práctica para estimar valores de K_C en aquellas circunstancias en las que no estén disponibles.

5.5. Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage 56, FAO, Roma.
- Besset, J., Genard, M., Girard, T., Serra, V., Bussi, C. 2001. Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach trees (cv. Big-Top). *Scientia Horticulturae* 91: 321-335.

- Boland, A.M., Mitchell, P.D., Jerie, P.H., Goodwin, I. 1993. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science* 68: 261-274.
- Centritto, M., Lucas, M.E., Jarvis, P.G. 2002. Gas exchange, biomass, whole-plant water-use efficiency and water uptake of peach (*Prunus persica*) seedlings in response to elevated carbon dioxide concentration and water availability. *Tree Physiology* 22: 699-706.
- Eastman, J., Gray, S.A. 1998. A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 49: 171-176.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. *En Irrigation of Agricultural Crops*. Eds. B.A. Stewart and D.R. Nielsen. A.S.A. Madison, USA, Monograph 30, pp 987-1017.
- Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R. Girón, I.F., Moreno, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management* 51: 99-123.
- Fernández, J.E., Romero, R., Montañó, J.C., Díaz-Espejo, A., Muriel, J.L., Cuevas, M.V., Moreno, F., Girón, I.F., Palomo, M.J. 2008. Design and testing of an automatic irrigation controller for fruit tree orchards, based on sap flow measurements. *Australian Journal of Agricultural Research* 59: 589-598.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Dejong, T.M. 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79: 308-315.
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Marsal, J. 2005. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management* 72: 97-108.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20: 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11-19.
- Green, S.R., Clothier, B.E. 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany* 39: 115-123.

- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C. 1989. Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrigation and Drainage Systems* 3: 1-12.
- Massai, R., Ferreira, M.I., Paço, T.A., Remorini, D. 2000. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. *Acta Horticulturae* 537: 351-358.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1995. Normas de calidad para frutas y hortalizas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General de Alimentación. Madrid.
- Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R. 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil* 184: 85-96.
- Nicolás, E., Torrecillas, A., Ortuño, M.F., Domingo, R., Alarcón, J.J. 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management* 72: 131-145.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2005. Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany* 54: 155-162.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Pérez-Sarmiento, F., Torrecillas, A. 2008. Assessment of maximum daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation in lemon trees. *Agricultural Water Management* (DOI.org/10.1016/j.agwat.2008.07.001).
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and Function* 20: 1-8.
- Remorini, D., Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22: 39-46.
- SPSS Inc. 1989-2006. SPSS Professional Statistics, Chicago, Illinois. USA.
- Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez, M.C. 2000. Apricot tree response to irrigation withholding at different phenological periods. *Scientia Horticulturae* 85: 201-215.
- Vélez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90: 197-204.

6. Ecuaciones de referencia de la máxima contracción diaria del tronco

6.1. Introducción

El estado hídrico de los cultivos integra, esencialmente, la disponibilidad de agua en el suelo y las condiciones climáticas, lo que complica el uso de los valores absolutos de los indicadores del estado hídrico medidos en la planta para la programación del riego. Por tanto, y a diferencia de lo que algunos investigadores utilizaron en el pasado (Bussi et al., 1999), resulta conveniente el uso del concepto de *intensidad de señal* mediante la normalización de los valores absolutos del indicador del estado hídrico respecto de su valor en condiciones no limitantes de agua en el suelo. De esta manera, valores de intensidad de señal superiores a la unidad indican una situación de estrés hídrico, mientras que valores de intensidad de señal iguales a la unidad indican la ausencia de situaciones de estrés ligadas al riego (Goldhamer y Fereres, 2004).

Habitualmente, los valores de referencia de un indicador del estado hídrico medido en la planta se obtiene manteniendo plantas de referencia bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo (García-Orellana et al., 2007; Vélez et al., 2007). Sin embargo, el riego continuado por encima de las necesidades hídricas del cultivo puede inducir efectos sobre la disponibilidad de oxígeno, la salinidad o el contenido de nutrientes en el suelo. Además, el exceso de agua origina modificaciones de las relaciones agua-planta similares a las originadas por el déficit hídrico, incluso con significativos aumentos de la máxima contracción diaria del diámetro del tronco (Ortuño et al., 2007), lo que puede originar la consiguiente confusión para programar el riego.

En consecuencia, resulta mucho más conveniente disponer de ecuaciones de referencia o líneas de base, relacionando los valores de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo con la demanda evaporativa de la atmósfera. De esta forma, se podría calcular la intensidad de señal del indicador del estado hídrico a partir de su valor actual y el valor de referencia obtenido de la correspondiente línea de base. Además, las

líneas de base poseen la ventaja adicional de poder ser incorporadas a un autómatas facilitando la toma de decisiones sobre programación del riego.

Algunos autores han señalado que, además de la humedad del suelo y las condiciones ambientales, existen otros factores capaces de afectar los valores de la MCD tales como el periodo fenológico (Marsal et al., 2002; Fereres y Goldhamer, 2003; Intrigliolo y Castel, 2004) y la carga de frutos (Intrigliolo y Castel, 2007).

En contraste con los resultados obtenidos por Fereres y Goldhamer (2003) en almendros, Ortuño et al. (2006 y 2008) en limonero, Moreno et al. (2006) en olivo e Intrigliolo y Castel (2006) en ciruelo indicaron que cuando las ecuaciones entre la MCD y los parámetros climáticos se dividían en dos periodos fenológicos (crecimiento del fruto y periodo postcosecha) las correlaciones obtenidas mejoraban respecto de la correspondiente a toda la estación de crecimiento. Este comportamiento corresponde a la idea de que las variaciones del diámetro del tronco deben de considerarse no sólo en el contexto del balance hídrico de la planta, sino también en el contexto del balance de carbono (Sevanto et al., 2003; Daudet et al., 2005), ya que en algunas especies arbóreas el contenido de azúcares en los tejidos leñosos cambia en función de la presencia o ausencia de sumideros, tales como los frutos (Flore y Layne, 1997), no existiendo información sobre el efecto de otros sumideros de azúcares como el crecimiento activo de las raíces.

Por estas razones, y teniendo en cuenta el carácter extratemprano de la variedad de melocotonero estudiado (corto periodo de crecimiento del fruto y largo periodo postcosecha), el trabajo contenido en este capítulo tuvo como objetivos a) estudiar la posibilidad de obtener ecuaciones de referencia de la MCD capaces de ser utilizadas en la programación del riego, b) analizar si las relaciones entre la MCD y las variables climáticas pueden verse afectadas por la presencia de sumideros de azúcares tales como la presencia de frutos y el crecimiento activo de las raíces y, c) estudiar la variabilidad interanual de las ecuaciones de referencia obtenidas.

Para ello, durante un primer año, en melocotoneros de cuatro años, se analizaron las relaciones entre la MCD y las variables climáticas durante el prolongado periodo postcosecha a fin de evaluar la posible incidencia del crecimiento activo de las raíces. Durante los dos años posteriores, en una parcela adyacente, se evaluó si en árboles de mayor edad el crecimiento activo de las raíces seguía condicionando las líneas de base tras la recolección, y se abordó el estudio de las ecuaciones de referencia durante el crecimiento del fruto.

6.2. Condiciones experimentales

6.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo

El ensayo tuvo lugar durante los años 2005, 2006 y 2007 en la finca experimental del CEBAS (CSIC) del Campo de la Matanza (Santomera, Murcia). Durante el primer año se utilizó la misma parcela descrita en el apartado 4.2.1, mientras que en los dos años posteriores se utilizó la descrita en el apartado 5.2.1.

En dichos apartados se describen las características del material vegetal, el suelo y agua de riego, así como de las prácticas culturales.

6.2.2. Tratamientos

Durante el año 2005 el periodo de medidas se inició el 14 de junio (día del año (DA) 165) y finalizó el 25 de octubre (DA 298). Durante los dos años siguientes las medidas se realizaron desde el 22 de marzo (DA 81) al 10 de noviembre (DA 314) y desde el 8 de marzo (DA 67) al 4 de noviembre (DA 308), respectivamente, correspondiendo el día de inicio al siguiente tras el aclareo de frutos.

Las necesidades hídricas del cultivo se determinaron en función de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), de un coeficiente de cultivo estacional (Allen et al., 1998) y del porcentaje de suelo sombreado

por los árboles (Fereres y Goldhamer, 1990). Los árboles objeto de estudio se regaron por encima de sus necesidades de riego a fin de conseguir condiciones no limitantes de agua en el suelo. Concretamente, se regaron al 128, 155 y 160% de la ET_C , durante 2005, 2006 y 2007, respectivamente, totalizando aportes de 250, 1087 y 1040 mm durante los periodos de medida de cada año.

6.2.3. Medidas

Parámetros ambientales y estado hídrico de las plantas

Los datos micrometeorológicos (temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento a 2 m de altura) se tomaron de la estación automática mencionada en el apartado 4.2.3. Los valores diarios de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) y el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m) se calcularon de acuerdo con Allen et al. (1998).

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se determinó por la mañana, con cuatro repeticiones, siguiendo el mismo procedimiento metodológico descrito en el capítulo 4.2.3.

El potencial hídrico del tallo al mediodía solar (Ψ_{tallo}) se midió en cuatro árboles, tomando dos hojas adultas cercanas al tronco, por planta, las cuales se cubrieron con una bolsa de plástico y papel de aluminio al menos 2 h antes de las medidas con cámara de presión.

Variaciones micrométricas del tronco

Para las medidas de las variaciones micrométricas del tronco se siguieron procedimientos idénticos a los descritos en el apartado 4.2.3, utilizando un árbol por repetición.

Diseño estadístico y análisis

El experimento se realizó con un diseño completamente aleatorio

con cuatro repeticiones, cada repetición consistió en tres filas adyacentes de cinco árboles. Las medidas se tomaron en el árbol central de la fila intermedia de cada repetición.

Los valores de Ψ_{tallo} obtenidos en cada repetición se promediaron antes de calcular el valor medio y el error estándar.

El modelo estadístico correspondiente al diseño del experimento fue un factorial completo, considerando el tiempo como único factor principal fijo. El análisis se ajusta al modelo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{j(i)} \quad [6.1]$$

, donde Y_{ij} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, T_i es el efecto del tiempo (i tiene x niveles correspondientes al número de días de medida) y $\varepsilon_{j(i)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (j tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada i)).

Las relaciones entre la MCD y las variables climáticas se realizaron mediante el análisis de la regresión lineal, y las diferencias entre las regresiones lineales se determinaron mediante el análisis de la covarianza.

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete estadístico SPSS 15.0 (SPSS Inc., 1989-2006) siguiendo el procedimiento de un modelo lineal general.

6.3. Resultados

Año 2005

Durante el periodo experimental el valor acumulado de ET_0 alcanzó los 625 mm, con lluvias muy escasas (65.6 mm), acontecidas desde principios de septiembre a mediados de octubre (Figura 6.1A). Los valores de θ_v fueron casi constantes durante el periodo experimental y

ligeramente superiores a los correspondientes a capacidad de campo (Figura 6.1A). De forma parecida, los valores de Ψ_{tallo} fueron altos, presentando sólo muy ligeras oscilaciones durante el ensayo (Figura 6.1B).

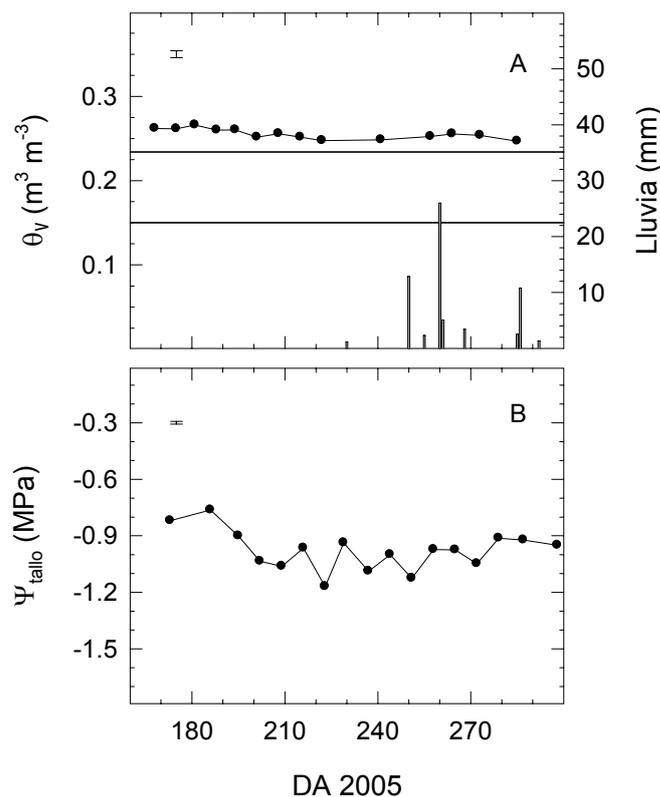


Figura 6.1. Evolución del contenido volumétrico de agua (θ_v) en los primeros 0.80 m del perfil de suelo y valores diarios de lluvia (líneas verticales) (A), y potencial hídrico del tallo al mediodía (Ψ_{tallo}) (B), durante el periodo experimental de 2005. Cada punto representa la media de cuatro valores. Las barras verticales representan el doble del error estándar de la media global. Las líneas horizontales representan, de arriba abajo, el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente, respectivamente.

En las Figuras 6.2, 6.3 y 6.4 se recogen los valores de la MCD en función de los valores de temperatura media diaria (T_m), temperatura al mediodía (T_{md}), déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m), déficit de

presión de vapor al mediodía (DPV_{md}) y ET_0 , mostrando como los aumentos en los valores de cualquiera de las variables ambientales se correspondieron con incrementos en los valores de la MCD.

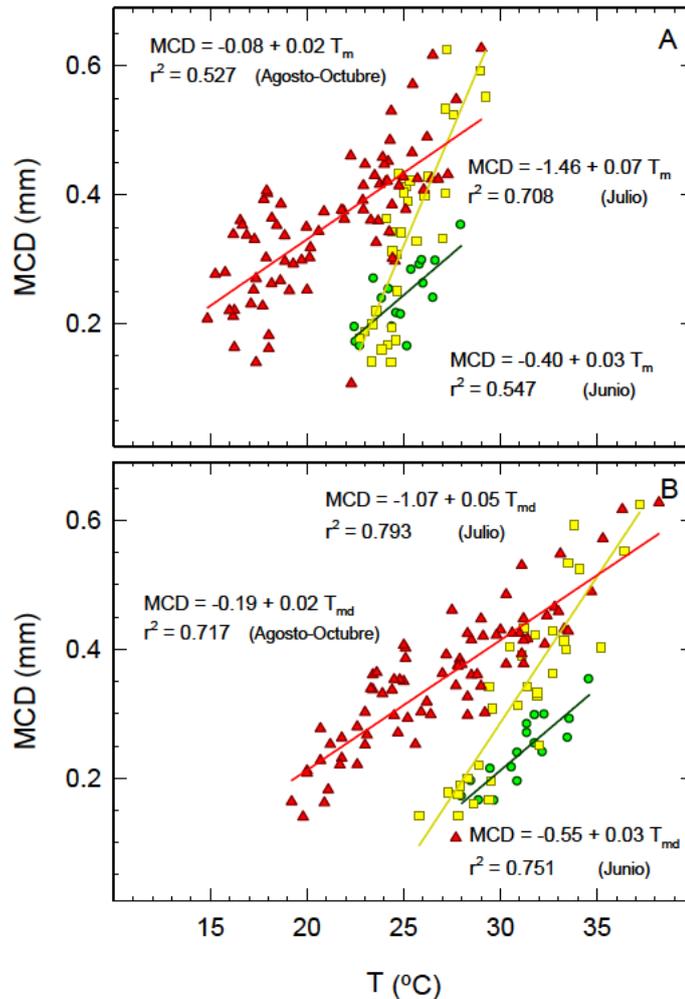


Figura 6.2. Relaciones entre la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y la temperatura media diaria (T_m) en junio (símbolos verdes), julio (símbolos amarillos) y agosto–octubre (símbolos rojos) (A), y relaciones entre la MCD y la temperatura al mediodía (T_{md}) en idénticos periodos que la figura anterior y con misma simbología (B).

Las relaciones globales entre los valores de la MCD y los valores de DPV_{md} y DPV_m (Figura 6.3) mostraron correlaciones más estrechas

que las obtenidas respecto de las otras variables ambientales (T_m , T_{md} y ET_0) (datos no mostrados). Cuando las regresiones entre la MCD y T_m , T_{md} y ET_0 se subdividieron en diferentes periodos de tiempo (junio (DA 165-181), julio (DA 182-212) y agosto-octubre (DA 213-298)) se obtuvieron ecuaciones de primer grado (Figuras 6.2 y 6.4) con coeficientes de determinación más altos que en las relaciones globales. Además, la naturaleza de la histéresis encontrada en estas relaciones demostró como para un valor dado de T_m , T_{md} y ET_0 , los valores de la MCD fueron más altos conforme progresó la estación.

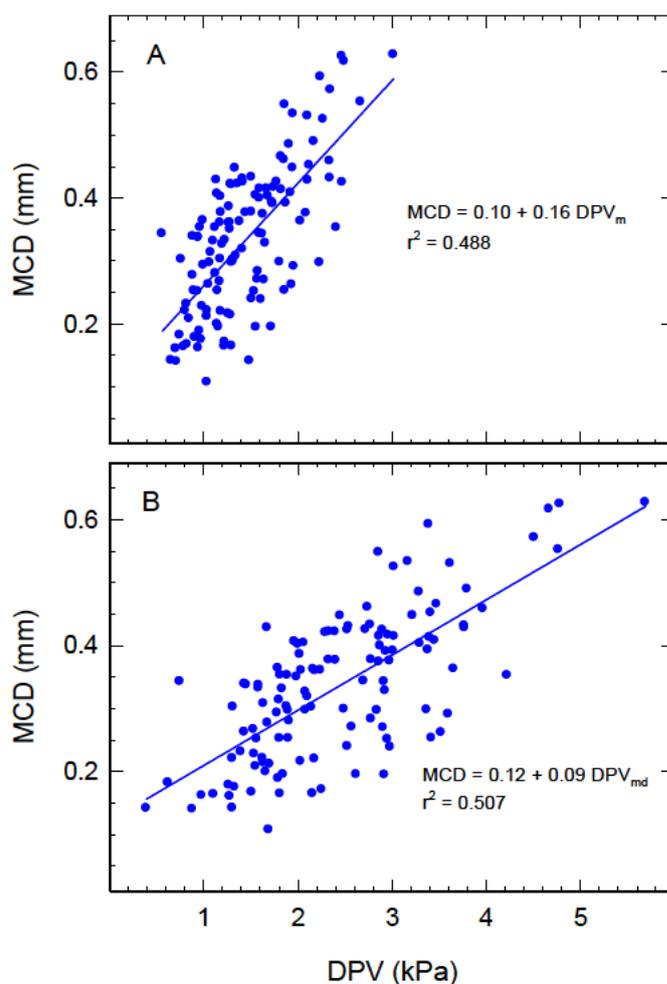


Figura 6.3. Relaciones entre la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m) (A) y al mediodía (DPV_{md}) (B) durante el periodo experimental.

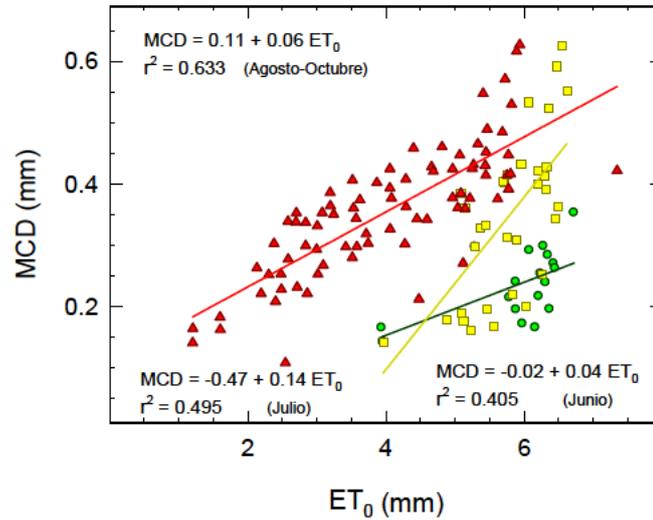


Figura 6.4. Relaciones entre la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) en junio (símbolos verdes), julio (símbolos amarillos) y agosto–octubre (símbolos rojos).

Años 2006 y 2007

Los valores de θ_v en los primeros 0.80 m de profundidad se mantuvieron cercanos a los correspondientes a capacidad de campo durante ambos años (95.9 y 99.5% de capacidad de campo en 2006 y 2007, respectivamente) (Figuras 6.5A y 6.5B). Las precipitaciones, acontecidas esencialmente en primavera y otoño (Figuras 6.5A y 6.5B), y la ET₀ totalizaron valores de 221 y 1049 mm y, 357 y 1088 mm en 2006 y 2007, respectivamente.

El Ψ_{tallo} y la MCD presentaron similares comportamientos estacionales cada año. Los valores de la MCD aumentaron gradualmente desde el inicio de los periodos de medida hasta julio (DA 212 y 204 en 2006 y 2007, respectivamente), disminuyendo posteriormente (Figuras 6.5E y 6.5F), mientras que los valores de Ψ_{tallo} disminuyeron desde el inicio de los periodos de medida, alcanzando mínimos valores en julio-agosto, y aumentaron posteriormente (Figuras 6.5C y 6.5D).

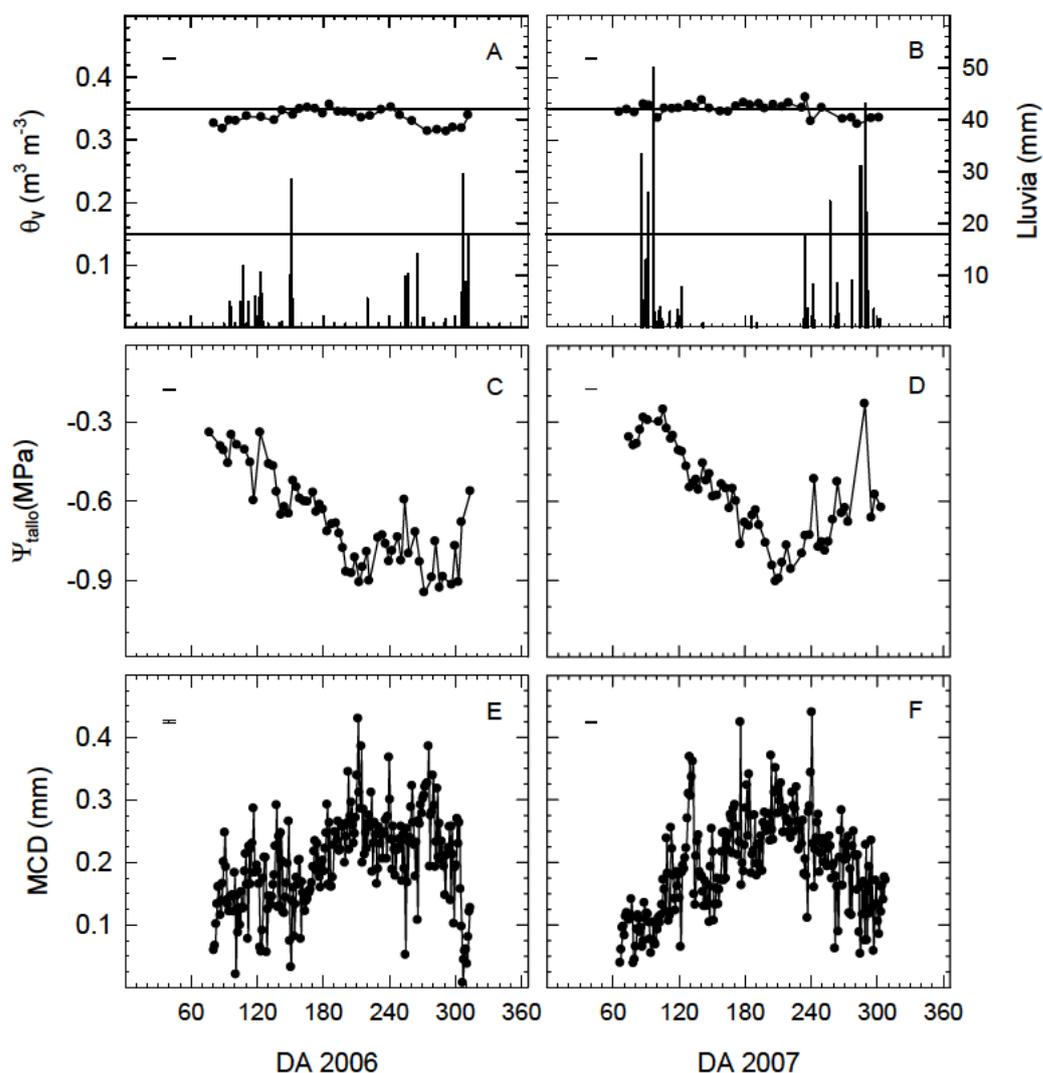


Figura 6.5. Evolución del contenido volumétrico de agua (θ_v) en los primeros 0.80 m del perfil de suelo y valores diarios de lluvia (líneas verticales) (A, B), potencial hídrico del tallo al mediodía (Ψ_{tallo}) (C, D), y máxima contracción diaria del tronco (MCD) (E, F) durante los periodos experimentales de 2006 y 2007. Cada punto representa la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 6.1.

La consideración de las relaciones entre la MCD y las variables climáticas seleccionadas (ET_0 , DPV_m , DPV_{md} , T_m y T_{md}), tanto durante la fase de crecimiento del fruto como tras la cosecha (Tablas 6.1, 6.2 y 6.3), evidenció que los aumentos en dichas variables se correspondieron con aumentos en los valores de la MCD. Los coeficientes de correlación de estas relaciones durante el crecimiento del fruto variaron entre 0.33 ($P <$

0.01) al considerar los valores de la ET_0 y 0.74 ($P < 0.001$) al considerar los valores de la T_{md} (Tabla 6.1). Durante el periodo entre la cosecha y el DA 190 los correspondientes coeficientes de correlación se situaron entre 0.29 ($P < 0.05$) (ET_0) y 0.84 ($P < 0.001$) (DPV_m) (Tabla 6.2), mientras que con posterioridad al DA 190 (máxima velocidad de crecimiento de raíces) los coeficientes de correlación se situaron en un rango entre 0.44 ($P < 0.001$) (ET_0) y 0.86 ($P < 0.001$) (DPV_m) (Tabla 6.3).

Tabla 6.1. Valores de la ordenada en el origen (a), pendiente (b), coeficiente de determinación (r^2), número de pares de datos (n) y cuadrado medio del error (MSE) de las ecuaciones de primer grado ($y = a + bx$) entre los valores de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y las variables climáticas desde el aclareo de frutos a la recolección.

Año	a	b	r^2	n	MSE
<i>MCD vs. ET_0</i>					
2006	0.0172	0.0320	0.33**	55	0.0019
2007	0.0242	0.0286	0.45***	63	0.0019
<i>MCD vs. DPV_m</i>					
2006	0.0329	0.1017	0.36**	55	0.0018
2007	0.0338	0.1027	0.39**	63	0.0021
<i>MCD vs. DPV_{md}</i>					
2006	0.0493	0.0514	0.44***	55	0.0016
2007	0.0318	0.0646	0.55***	63	0.0015
<i>MCD vs. T_m</i>					
2006	-0.2196	0.0199	0.44***	55	0.0018
2007	-0.1167	0.0162	0.68***	63	0.0011
<i>MCD vs. T_{md}</i>					
2006	-0.1153	0.0111	0.51***	55	0.0014
2007	-0.1104	0.0121	0.74***	63	0.0009

En este mismo sentido, cabe destacar que la menor dispersión de los datos alrededor de las líneas de regresión, tal y como se deduce de los menores valores de la MSE, se encontraron al considerar los valores

de T_{md} durante el crecimiento del fruto y el primero de los periodos postcosecha considerados (Tablas 6.1 y 6.2), mientras que entre el DA 191 y el final de la estación de crecimiento la menor dispersión se encontró al considerar los valores del DPV_{md} (Tabla 6.3).

Tabla 6.2. Valores de la ordenada en el origen (a), pendiente (b), coeficiente de determinación (r^2), número de pares de datos (n) y cuadrado medio del error (MSE) de las ecuaciones de primer grado ($y = a + bx$) entre los valores de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y las variables climáticas seleccionadas desde la recolección al DA 190.

Año	a	b	r^2	n	MSE
<i>MCD vs. ET_0</i>					
2006	0.0366	0.0252	0.32**	55	0.0019
2007	-0.0047	0.0363	0.29*	61	0.0034
<i>MCD vs. DPV_m</i>					
2006	0.0116	0.1014	0.84***	55	0.0005
2007	0.0187	0.1176	0.64***	61	0.0018
<i>MCD vs. DPV_{md}</i>					
2006	0.0376	0.0491	0.82***	55	0.0005
2007	-0.0088	0.0805	0.76***	61	0.0012
<i>MCD vs. T_m</i>					
2006	-0.1344	0.0132	0.54***	55	0.0013
2007	-0.2645	0.0203	0.53***	61	0.0023
<i>MCD vs. T_{md}</i>					
2006	-0.1520	0.0111	0.77***	55	0.0007
2007	-0.3807	0.0202	0.81***	61	0.0009

El análisis de la covarianza de las ecuaciones de referencia de la MCD indicó que las diferencias entre las pendientes y ordenadas en el origen en los dos años no fueron estadísticamente significativas en ningún caso, excepto durante el primer periodo posterior a la recolección al considerar la T_{md} y el DPV_{md} (datos no mostrados). Este hecho indica que sólo es posible obtener los valores de referencia de la MCD en cualquiera de los periodos considerados por medio de ecuaciones lineales de primer

orden elaboradas en función de la ET_0 , el DPV_m , y la T_m (Figura 6.6).

Tabla 6.3. Valores de la ordenada en el origen (a), pendiente (b), coeficiente de determinación (r^2), número de pares de datos (n) y cuadrado medio del error (MSE) de las ecuaciones de primer grado ($y = a + bx$) entre los valores de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y las variables climáticas seleccionadas desde el DA 191 al final de la estación de crecimiento.

Año	a	b	r^2	n	MSE
<i>MCD vs. ET_0</i>					
2006	0.1058	0.0299	0.44***	124	0.0029
2007	0.0703	0.0350	0.71***	118	0.0015
<i>MCD vs. DPV_m</i>					
2006	0.0596	0.1090	0.67***	124	0.0017
2007	0.0543	0.1166	0.86***	118	0.0007
<i>MCD vs. DPV_{md}</i>					
2006	0.0618	0.0618	0.75***	124	0.0013
2007	0.0708	0.0610	0.85***	118	0.0008
<i>MCD vs. T_m</i>					
2006	-0.1276	0.0144	0.58***	124	0.0030
2007	-0.0997	0.0138	0.66***	118	0.0017
<i>MCD vs. T_{md}</i>					
2006	-0.1374	0.0125	0.67***	124	0.0017
2007	-0.1125	0.0118	0.81***	118	0.0010

A pesar de que las relaciones entre la MCD y la ET_0 , DPV_m , y T_m fueron las únicas en no presentar diferencias interanuales en los tres periodos fenológicos considerados, las relaciones globales obtenidas con los valores de 2006 y 2007 no presentaron las mejores correlaciones durante el crecimiento del fruto y desde el DA 191 al final de la estación de crecimiento (Tabla 6.4). No obstante, cabe subrayar que los valores de r^2 fueron muy significativos ($P < 0.001$) y que los de la MSE mostraron una baja dispersión de los datos respecto de las líneas de regresión (Figura 6.6).

Tabla 6.4. Valores de la ordenada en el origen (a), pendiente (b), coeficiente de determinación (r^2), número de pares de datos (n) y cuadrado medio del error (MSE) de las ecuaciones de primer grado ($y = a + bx$) entre los valores de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y las variables climáticas seleccionadas durante 2006 y 2007.

	a	b	r^2	n	MSE					
<i>Crecimiento fruto</i>										
MCD vs. ET_0	0.0214	0.0302	0.42***	118	0.0019					
MCD vs. DPV_m	0.0342	0.1014	0.40***	118	0.0019					
MCD vs. DPV_{md}	0.0405	0.0572	0.52***	118	0.0016					
MCD vs. T_m	-0.0854	0.0134	0.49***	118	0.0016					
MCD vs. T_{md}	-0.0831	0.0102	0.61***	118	0.0013					
<i>Cosecha – DA 190</i>										
MCD vs. ET_0	0.0047	0.0331	0.34***	116	0.0028					
MCD vs. DPV_m	0.0101	0.1130	0.67***	116	0.0014					
MCD vs. T_m	-0.1938	0.0166	0.47***	116	0.0023					
<i>DA 191 – final estación</i>										
MCD vs. ET_0	0.0874	0.0326	0.56***	242	0.0023					
MCD vs. DPV_m	0.0579	0.1119	0.76***	242	0.0013					
MCD vs. DPV_{md}	0.0679	0.0608	0.80***	242	0.0010					
MCD vs. T_m	-0.1005	0.0139	0.54***	242 </tr <tr> <td>MCD vs. T_{md}</td> <td>-0.1218</td> <td>0.0120</td> <td>0.74***</td> <td>242</td> <td>0.0013</td> </tr>	MCD vs. T_{md}	-0.1218	0.0120	0.74***	242	0.0013
MCD vs. T_{md}	-0.1218	0.0120	0.74***	242	0.0013					

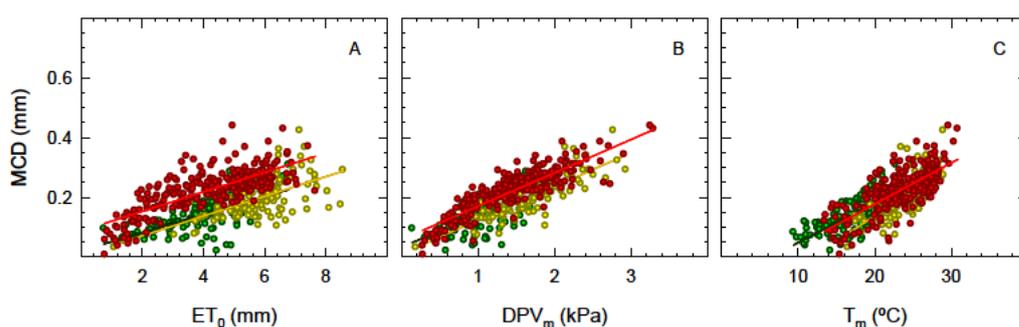


Figura 6.6. Relaciones entre la máxima contracción diaria del tronco (MCD) y la evapotranspiración diaria del cultivo de referencia (ET_0) (A), déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m) (B), y temperatura media diaria (T_m) (C) durante la fase de crecimiento del fruto (símbolos verdes), desde recolección al DA 190 (símbolos amarillos) y desde el DA 191 al final de la estación de crecimiento (símbolos rojos) de los años 2006 y 2007. Cada punto es la media de cuatro valores. Las ecuaciones se reflejan en la Tabla 6.4.

6.4. Discusión

Aunque durante los tres años del experimento el riego aplicado fuese claramente superior a las necesidades hídricas del cultivo, el hecho de que los niveles de θ_v fuesen relativamente cercanos a los correspondientes a capacidad de campo (Figuras 6.1A, 6.5A y 6.5B), los valores de Ψ_{tallo} fuesen altos (Figuras 6.1B, 6.5C y 6.5D), y no se desarrollase ninguna sintomatología, indicó que aunque los árboles se encontraron bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo no se produjeron situaciones de exceso de agua en el mismo (Ortuño et al., 2007).

El hecho de que las medidas de la MCD se relacionasen con las de T_m , T_{md} , DPV_m , DPV_{md} y ET_0 (Figuras 6.2, 6.3 y 6.4) confirmó la idea de que los valores de la MCD no sólo están influenciados por los niveles de humedad del suelo, sino por las condiciones climáticas (Alarcón et al., 2000; Fereres y Goldhamer, 2003; Ortuño et al., 2006), por lo que para interpretar los valores de este indicador del estado hídrico medido en las plantas es necesaria su normalización respecto de los valores bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo (Goldhamer y Fereres, 2001; Remorini y Massai, 2003).

El hecho de que de todas las relaciones obtenidas entre los valores de la MCD y variables climáticas (Figuras 6.2, 6.3 y 6.4, Tablas 6.1, 6.2 y 6.3), la T_{md} fuese la variable que con mayor frecuencia presentó las relaciones más estrechas con la MCD resulta difícil de explicar, ya que los valores de la MCD reflejan la evolución a lo largo del día del diámetro del tronco, y hubiese sido de esperar que sus valores correlacionasen mejor con algún parámetro indicativo de la demanda evaporativa medido sobre una base diaria. No obstante, debe resaltarse que otros autores como Fereres y Goldhamer (2003), Moreno et al. (2006) y Ortuño et al. (2006) ya señalaron que la MCD se correlacionaba adecuadamente tanto con la T_{md} como con la T_m . Además, de acuerdo con Intrigliolo y Castel (2006), la temperatura del aire es una variable climática de alta utilidad para

predecir los valores de la MCD dada la sencillez y bajo precio de las medidas.

Por otra parte, cabe resaltar que estos comportamientos corresponden a relaciones obtenidas durante determinados periodos fenológicos y en años aislados, porque cuando se aplicó el análisis de la covarianza a las distintas ecuaciones obtenidas en 2006 y 2007 quedó patente que sólo es posible obtener valores de referencia de la MCD, en cualquiera de los periodos considerados, por medio de ecuaciones de primer orden elaboradas en función de la ET_0 , el DPV_m , y la T_m (Tabla 6.4), hecho concordante con los resultados obtenidos por Ortuño et al. (2008) en limonero.

La ausencia de diferencias interanuales en las relaciones de la MCD con la ET_0 y DPV_m (Figura 6.6) deriva del hecho de que la MCD puede considerarse como un buen indicador de la transpiración siempre y cuando el agua en el suelo no se agote de forma importante (Huguet et al., 1992; Ortuño et al., 2006). Sin embargo, resulta difícil de explicar la estrecha relación con los valores de la T_m (Figura 6.6) ya que la temperatura del aire no es un indicador adecuado de la demanda evaporativa (Hatfield y Fuchs, 1990).

Zweifel et al. (2001) demostraron que el agua almacenada en las plantas contribuye a las tasas diarias de transpiración incluso en árboles adecuadamente regados, por lo que ésta desempeña un importante papel no sólo en periodos de déficit hídrico sino siempre que acontece transporte de agua en el interior de las plantas. En consecuencia, el hecho de que las relaciones entre la MCD y las variables climáticas fuesen lineales, incluso en momentos de alta demanda evaporativa, puede atribuirse a un eficiente transporte de agua desde los tejidos de reserva cuando la demanda evaporativa aumentó de forma considerable.

Los mayores valores de las ordenadas en el origen de las regresiones entre la MCD y las variables climáticas en el periodo agosto–octubre que en junio del 2005 (Figuras 6.2 y 6.4), pudo haberse debido a una posible reducción del volumen de suelo humedecido por el sistema

de riego localizado, aumentando la proporción de raíces en el suelo seco (Intrigliolo y Castel, 2006). Sin embargo, los altos valores del Ψ_{tallo} durante todo el ensayo (Figura 6.1B) demuestran que si hubiese ocurrido tal hipótesis no habría afectado al estado hídrico de las plantas.

De acuerdo con Sevanto et al. (2003) y Daudet et al. (2005), las fluctuaciones diarias del diámetro del tronco deben de ser interpretadas tanto en el contexto del balance hídrico de la planta como en el del balance de carbono. En las especies del género *Prunus* el contenido de azúcares en los tejidos leñosos aumenta al producirse una disminución en los sumideros, tales como los frutos (Flore y Layne, 1997), lo que conlleva una disminución del potencial hídrico en los tejidos del floema y, en consecuencia, una disminución del gradiente de potencial entre el xilema y el floema. Esto podría explicar parcialmente la razón por la cual después de la cosecha (finales de mayo) los valores de la MCD fueron bajos (junio) y aumentaron cuando un nuevo sumidero demandante de azúcares apareció como consecuencia del agudo incremento en la velocidad de crecimiento de las raíces (de finales de junio a finales de octubre) (M.C. Ruiz-Sánchez, datos no publicados). En este sentido, Intrigliolo y Castel (2006) señalaron diferentes ecuaciones de referencia para el periodo de crecimiento del fruto y postcosecha, pero no detectaron diferentes ecuaciones dentro del periodo siguiente a la recolección.

El conjunto de los resultados obtenidos demostró que a pesar de las dispersiones encontradas es posible elaborar ecuaciones de referencia de la MCD respecto de las variables climáticas. Además, para la elaboración de estas líneas de base es necesario considerar que las variaciones diarias del diámetro del tronco tienen que contemplarse no sólo en el contexto del balance hídrico de la planta sino en el del balance de carbono, lo que obliga a considerar periodos fenológicos concretos, evitando la consideración conjunta de toda la estación de crecimiento. Para la obtención de ecuaciones de referencia de la MCD en cualquiera de los periodos fenológicos considerados, la ET_0 , el DPV_m , y la T_m

resultaron ser las variables climáticas más adecuadas, ya que permitieron obtener líneas de base con representatividad interanual.

6.5. Bibliografía

- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez, P., Torrecillas, A. 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil* 227: 77-85.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage* 56, FAO, Roma.
- Bussi, C., Huguet, J.G., Besset, J., Girard, T. 1999. Irrigation scheduling of an early maturing peach cultivar using tensiometers and diurnal changes in stem diameter. *Fruits* 54: 57-66.
- Daudet, F.A., Ameglio, T., Cochard, H., Archilla, O., Lacoïnte, A. 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany* 56: 135-144.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. Eds. B.A. Stewart and D.R. Nielsen. A.S.A. Madison, USA, Monograph 30, pp 987-1017.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78: 139-144.
- Flore, J.A., Layne, D.R. 1997. Prunus. En: *Photoassimilates Distribution in Plants and Crops: Sink-Source Relationship* (E. Zamski, H. Scheffer, Eds.) Marcel Dekker, New York, p. 825-849.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20: 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11-19.
- Hatfield, J.L., Fuchs, M.F. 1990. Evapotranspiration models. En: Hoffman GJ, Howell TA, Solomon KH (eds) *Management of farm irrigation systems*. ASAE Monograph, St. Joseph, pp 33-60.

- Huguet, J.G., Li, S., Lorendeau, J., Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67: 631-640.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23: 93-102.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2006. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiology* 26: 303-311.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree Physiology* 27: 89-96.
- Marsal, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, J., Rufat, J., Girona, J. 2002. Phenology and drought affects the relationship between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 77: 411-417.
- Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F., Torrecillas, A. 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* 84: 290-294.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Water status indicators of lemon trees in response to flooding and recovery. *Biologia Plantarum* 51: 292-296.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W., Torrecillas, A. 2008. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* (DOI 10.1007/s00271-008-0126-z).
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil* 279: 229-242.
- Remorini, D., Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22: 39-46.
- Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M., Nikinmaa, E. 2003. Sugar transport together with environmental conditions controls time lags between xylem and stem diameter changes. *Plant Cell and Environment* 26: 1257-1265.
- SPSS Inc. 1989-2006. SPSS Professional Statistics, Chicago, Illinois. USA.

Vélez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90: 197-204.

Zweifel, R., Item, H., Hasler, R. 2001. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology* 21: 869-877.

7. Programación del riego usando ecuaciones de referencia de la máxima contracción diaria del tronco

7.1. Introducción

Los resultados descritos en los correspondientes capítulos anteriores han dejado patente las ventajas de la programación del riego utilizando medidas de la máxima contracción diaria del tronco (MCD), así como la posibilidad de obtener ecuaciones de referencia de este parámetro con validez interanual utilizando como variables climáticas la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m) o la temperatura media diaria (T_m). Igualmente, se analizaron algunas limitaciones del protocolo de riego utilizado, y se propuso como una de las posibles modificaciones la programación diaria del riego.

Si bien en la bibliografía existente sobre programación del riego utilizando exclusivamente valores de la MCD se han utilizado árboles de referencia bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo (García-Orellana et al., 2007; Vélez et al., 2007; Ortuño et al., 2008a, b), es evidente que, al menos en teoría, resultaría más interesante utilizar ecuaciones de referencia de la MCD.

Las ventajas teóricas de esta opción se basan en la posibilidad de ser incorporadas a autómatas de riego y sin los riesgos de mantener árboles regados por encima de sus necesidades. Las situaciones de exceso de agua en el suelo, incluso de mínima duración, originan modificaciones de las relaciones agua-planta similares a las originadas por el déficit hídrico, induciendo aumentos de la MCD (Ortuño et al., 2007), lo que puede originar problemas para programar el riego. Además, el riego por encima de las necesidades del cultivo puede inducir efectos sobre la disponibilidad de oxígeno, la salinidad o el contenido de nutrientes en el suelo.

Por estas razones, se decidió realizar un ensayo para analizar a) la respuesta del cultivo a la programación diaria del riego utilizando medidas de la MCD, y b) comparar, durante el periodo de crecimiento del fruto, la

programación diaria del riego utilizado árboles de referencia y líneas de base en función de la T_m .

7.2. Condiciones experimentales

7.2.1. Material vegetal y condiciones de cultivo

El ensayo tuvo lugar el año 2008 en la finca experimental del CEBAS (CSIC) en la misma parcela descrita en el apartado 5.2.1.

En dicho apartado se describen las características del material vegetal, el suelo y agua de riego, así como de las prácticas culturales.

7.2.2. Tratamientos

Desde el día 5 de marzo (DA 65) al 27 de julio (DA 209) de 2008, los árboles del tratamiento control (T0) se regaron diariamente por encima de la evapotranspiración del cultivo ($141\% ET_C$) a fin de conseguir condiciones no limitantes de agua en el suelo. Las necesidades hídricas del cultivo se determinaron de acuerdo con los procedimientos indicados en el apartado 5.2.2.

A partir del 11 de marzo (DA 71) el riego de los tratamientos T1 y T2 se programó a fin de mantener la intensidad de señal de la MCD en valores muy próximos a la unidad. El tratamiento T1 se extendió hasta el 27 de julio (DA 209), mientras que el tratamiento T2 se mantuvo hasta la recolección de los frutos el día 29 de abril (DA 120). En el caso del tratamiento T1 la intensidad de señal se calculó obteniendo los valores de referencia de la MCD a partir de las líneas de base propuestas en función de la T_m ($MCD = 0.0134 T_m - 0.0854$, $r^2 = 0.49^{***}$ durante la fase de crecimiento del fruto; $MCD = 0.0166 T_m - 0.1938$, $r^2 = 0.47^{***}$ desde la recolección al DA 190; $MCD = 0.0139 T_m - 0.1005$, $r^2 = 0.54^{***}$ desde el DA 191 al final del ensayo; Tabla 6.4 y Figura 6.6). En el caso del tratamiento T2 se utilizaron como referencia los árboles del tratamiento T0.

En ambos casos, la programación del riego se realizó diariamente, aumentando un 3% la dosis de riego cada vez que la intensidad de señal era superior a la unidad, y reduciendo un 3% cada vez que la intensidad de señal era inferior a dicho valor umbral.

7.2.3. Medidas

Parámetros ambientales y estado hídrico de las plantas

Los datos micrometeorológicos se tomaron de la misma estación climática automática mencionada en el apartado 4.2.3.

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se determinó por la mañana, con cuatro repeticiones, siguiendo el mismo procedimiento metodológico descrito en el capítulo 4.2.3.

El potencial hídrico del tallo al mediodía solar (Ψ_{tallo}) se midió en cuatro árboles por tratamiento, tomando dos hojas adultas cercanas al tronco, por planta, las cuales se cubrieron con una bolsa de plástico y papel de aluminio al menos 2 h antes de las medidas con cámara de presión.

Variaciones micrométricas del tronco

Para las medidas de las variaciones micrométricas del tronco se siguieron procedimientos idénticos a los descritos en el apartado 4.2.3, utilizando un árbol por repetición.

La programación diaria del riego se realizó sin necesidad de desplazarse a la parcela experimental, ya que los datos registrados en los dataloggers eran recibidos en un ordenador en el CEBAS mediante comunicación GSM. Tras el procesado de los mismos, se enviaba la orden de apertura y cierre de electroválvulas correspondiente a todos los tratamientos vía radio, utilizando una plataforma ADCON.

Calidad del fruto

La calidad de los frutos en cada tratamiento se evaluó de la forma descrita en el apartado 5.2.3.

Diseño estadístico y análisis

El experimento se realizó con un diseño completamente aleatorio con cuatro repeticiones, tal y como se describe en el apartado 5.2.3.

Los valores de Ψ_{tallo} obtenidos en cada repetición se promediaron antes de calcular el valor medio y el error estándar correspondientes a cada tratamiento.

El modelo estadístico correspondiente al diseño del experimento, durante el periodo de crecimiento del fruto, fue un factorial completo, considerando el método de programación del riego y el tiempo como factores principales fijos. El análisis se ajusta al modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + T_j + RT_{ij} + \varepsilon_{k(ij)} \quad [7.1]$$

, donde Y_{ijk} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, R_i el efecto del tratamiento de programación del riego (i tiene 3 niveles: T0, T1 y T2), T_j es el efecto del tiempo (j tiene x niveles correspondientes al número de días de medida), RT_{ij} es el efecto de interacción entre el tratamiento de programación del riego y el tiempo, $\varepsilon_{k(ij)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (k tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada ij)).

El análisis del efecto del riego en la producción y calidad de la cosecha se ajustó al modelo:

$$Y_{ij} = \mu + R_i + \varepsilon_{j(i)} \quad [7.2]$$

, donde Y_{ij} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, R_i el efecto del tratamiento de riego (i tiene 3 niveles: T0, T1 y T2), y $\varepsilon_{k(i)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (k tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada i)).

El modelo estadístico correspondiente al diseño del experimento, durante el periodo postcosecha, fue un factorial completo, considerando el riego y el tiempo como factores principales fijos. El análisis se ajusta al modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + T_j + RT_{ij} + \varepsilon_{k(ij)} \quad [7.3]$$

, donde Y_{ijk} es el valor observado para la variable considerada, μ el efecto común debido a la media propia de la variable en la población, R_i el efecto del tratamiento de riego (i tiene 2 niveles: T0 y T1), T_j es el efecto del tiempo (j tiene x niveles correspondientes al número de días de medida), RT_{ij} es el efecto de interacción entre el tratamiento de riego y el tiempo, $\varepsilon_{k(ij)}$ es el efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental) (k tiene 4 niveles: 1, 2, 3 y 4 (dentro de cada ij)).

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete estadístico SPSS 15.0.1 (SPSS Inc., 1989-2006) siguiendo el procedimiento de un modelo lineal general.

7.3. Resultados

Durante el periodo experimental, los valores diarios de ET_0 alcanzaron un total de 708 mm, presentando, al igual que el déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m), una tendencia global ascendente (Figura 7.1). Las precipitaciones sumaron un total de 141.8 mm, aconteciendo fundamentalmente en primavera (Figura 7.1). Las temperaturas máximas y mínimas medias diarias fueron 26.4 y 14.6 °C,

respectivamente, y la humedad relativa media diaria fue del 58.8% (datos no mostrados).

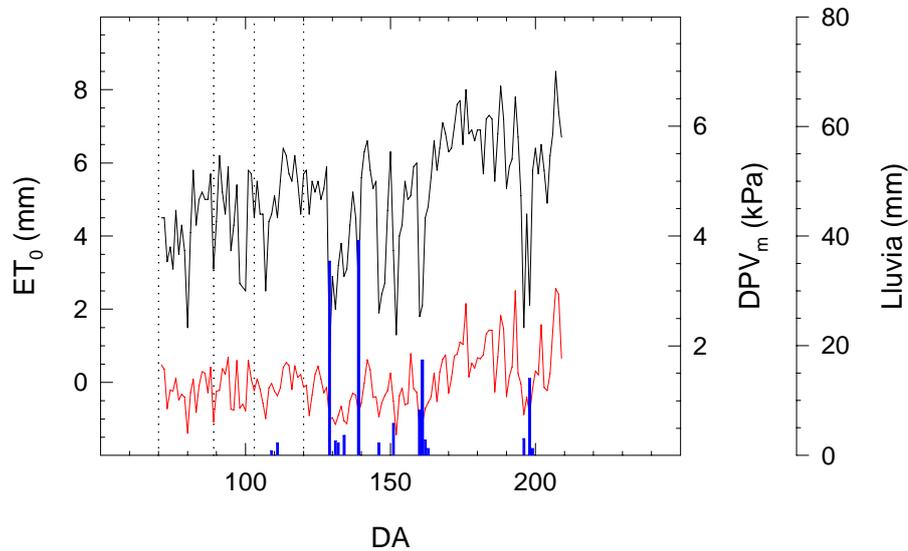


Figura 7.1. Valores diarios de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0 , línea negra), déficit de presión de vapor medio (DPV_m , línea roja) y lluvia (líneas verticales azules) durante el periodo experimental. Los periodos de tiempo entre las líneas punteadas verticales indican, de izquierda a derecha, las fases I, II y III de crecimiento del fruto.

Los primeros 0.80 m del perfil del suelo del tratamiento T0 presentaron valores de θ_v prácticamente constantes y muy cercanos a los correspondientes a capacidad de campo (101.9% del valor de θ_v a capacidad de campo) (Figura 7.2A). Por el contrario, en el suelo del tratamiento T1 disminuyeron progresivamente los niveles de θ_v durante la fase de crecimiento del fruto (77.8% del valor de θ_v a capacidad de campo), aumentando posteriormente hasta alcanzar valores cercanos a los de capacidad de campo (Figura 7.2A). El suelo del tratamiento T2 presentó valores de θ_v bastante constantes (88.2% del valor de θ_v a capacidad de campo), los cuales a partir del DA 92 resultaron

estadísticamente diferentes a los de los otros tratamientos. El perfil de humedad del suelo en los tratamientos T1 y T2 se caracterizó por el hecho de que por debajo de los 600 mm de profundidad los valores de θ_v resultaron claramente inferiores a los de capacidad de campo, indicando la inexistencia de drenaje (datos no mostrados).

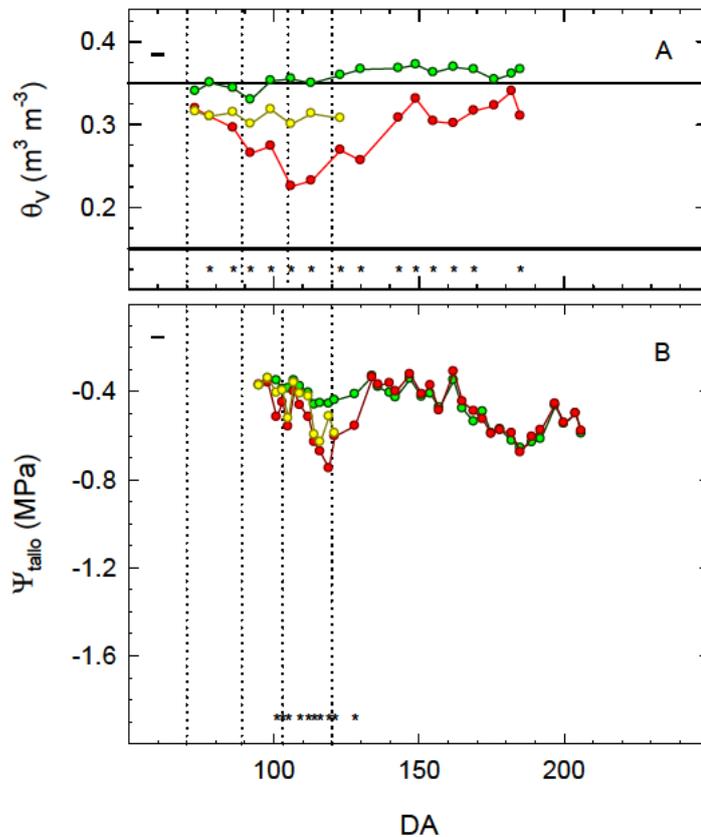


Figura 7.2. Contenido volumétrico de agua en el suelo hasta 0.80 m de profundidad (A) y potencial hídrico del tallo al mediodía (Ψ_{tallo}) (B) en los tratamientos T0 (símbolos verdes), T1 (símbolos rojos) y T2 (símbolos amarillos) durante el periodo experimental. Los periodos de tiempo entre las líneas punteadas verticales indican, de izquierda a derecha, las fases I, II y III de crecimiento del fruto. Las líneas horizontales indican, de arriba a abajo, el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente. Las barras verticales representan el doble del error estándar de la media global. Los asteriscos indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el test de la $LSD_{0.05}$. Cada punto es la media de cuatro valores.

De forma similar al caso anterior, los niveles de Ψ_{tallo} en los árboles del tratamiento T0 presentaron mínimas variaciones (de -0.35 a -0.66 MPa) durante todo el ensayo, y los árboles del tratamiento T1 disminuyeron progresivamente los niveles de Ψ_{tallo} durante la fase de crecimiento del fruto, incrementando posteriormente hasta alcanzar valores similares al control (T0) después del DA 128 (Figura 7.2B). Los niveles de Ψ_{tallo} en los árboles del tratamiento T2 fueron similares a los correspondientes en los árboles del T0, excepto algunos días concretos (DA 105, 114, 116, y 121) en los que resultaron inferiores, e iguales a los presentados en los árboles del tratamiento T1 (Figura 7.2B).

Los valores de intensidad de señal de la MCD en los árboles de los tratamientos T1 y T2 presentaron comportamientos claramente diferenciables, esencialmente durante el periodo de crecimiento del fruto (Figuras 7.3A y 7.3B). En este periodo, los valores de intensidad de señal de la MCD en las plantas del tratamiento T1 oscilaron de forma muy acusada (coeficiente de variación (CV) medio de 0.568), obteniéndose un valor medio de intensidad de señal de 1.47 (Figura 7.3A), mientras que los valores de intensidad de señal de la MCD en las plantas del tratamiento T2 presentaron un valor medio de 1.10 y una variabilidad muy baja (CV = 0.089) (Figura 7.3B). Por otra parte, con posterioridad a la recolección de los frutos, el comportamiento observado en las plantas del tratamiento T1 se mantuvo durante unos días y posteriormente cambió sustancialmente, ya que entre el DA 140 y el final del ensayo se obtuvo un valor medio de intensidad de señal de 1.07 y un CV de 0.231 (Figura 7.3A).

El agua aplicada cada día a los tratamientos T1 y T2 reflejó de manera distinta el comportamiento de la intensidad de señal de la MCD durante día precedente (Figuras 7.3A y 7.3B), ya que aportaron diferentes dosis de agua durante el periodo de crecimiento del fruto (Figura 7.3C). Concretamente, las plantas del tratamientos T1 recibieron 62.1 mm y las del tratamiento T2 recibieron 101.6 mm, lo que supuso un 48 y 78.5% de

la ET_C estimada (Figura 7.3C). Por otra parte, cabe destacar que el comportamiento descrito para las plantas del tratamiento T1 varió considerablemente con posterioridad a la recolección, ya que el agua aplicada a partir de ese momento supuso el 92.6% de la ET_C estimada.

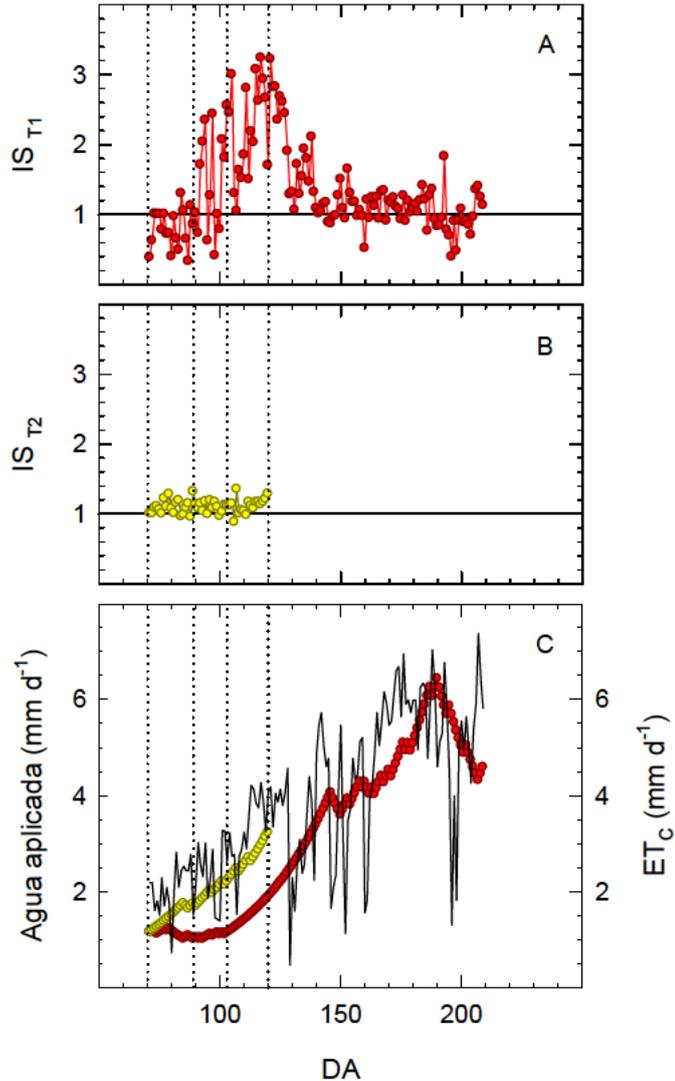


Figura 7.3. Valores de intensidad de señal (IS) de la máxima contracción diaria del tronco (MCD) en las plantas de los tratamientos T1 (A) y T2 (B), y dosis de riego aplicado (C) en los tratamientos T1 (símbolos rojos) y T2 (símbolos amarillos) comparadas con la estima de la evapotranspiración del cultivo (ET_C , línea negra) durante el periodo experimental. Cada dato es la media de cuatro valores. Otros símbolos como en la Figura 7.1.

Las plantas del tratamiento T1 presentaron una significativa disminución de la producción y del peso medio de los frutos respecto de los otros tratamientos, si bien el número de frutos por árbol y la eficiencia de la carga de frutos resultaron similares en los tres tratamientos (Tabla 7.1). Por otra parte, las plantas de los tratamientos T0 y T2 presentaron una proporción similar de frutos de las categorías extra A, B y C, y de frutos no comercializables (Tabla 7.2). Destaca el menor peso medio de los frutos del tratamiento T1 debido a una mayor proporción de frutos de categoría no extra y menor de frutos de categoría A (Tabla 7.2).

Tabla 7.1. Efecto de los tratamientos de riego sobre la carga de frutos (número de frutos por árbol), eficiencia de la carga de frutos (número de frutos por árbol en relación a la sección del tronco, cm^2), peso medio de los frutos (g) y producción (kg árbol^{-1}). Los valores de cada columna seguidos de letras distintas son diferentes según el test de la $\text{LSD}_{0.05}$.

Tratamiento	Carga de frutos	Eficiencia de la carga de frutos	Peso medio de los frutos	Producción
T0	547a	3.52a	1235a	62.84a
T1	478a	3.28a	107.0b	49.33b
T2	471a	3.40a	123.3a	58.30a

Tabla 7.2. Efecto de los tratamientos de riego sobre la distribución de las diferentes categorías cosechadas de melocotón (%) (directiva CEE 3596/90) (categorías de frutos extra: A, 73 mm > diámetro \geq 67 mm; B, 67 mm > diámetro \geq 61 mm; C, 61 mm > diámetro \geq 56 mm, y frutos de categoría no extra, diámetro < 56 mm). A los datos se les aplicó la transformada $\arcsen \sqrt{\%}$. Los valores de cada columna seguidos de letras distintas son diferentes según el test de la $\text{LSD}_{0.05}$.

Tratamiento	Categoría de los frutos			
	A	B	C	No extra
T0	30.0a	30.0a	18.7a	21.3a
T1	7.3b	30.0a	29.3a	33.3b
T2	23.3a	35.3a	24.7a	16.7a

7.4. Discusión

El hecho de que los valores de θ_v en los primeros 0.80 m de profundidad en el tratamiento T0 fuesen sólo el 101.9% del valor correspondiente a capacidad de campo, el Ψ_{tallo} en los árboles del tratamiento T0 fuesen similares a los del tratamiento T2, y no se detectase ninguna sintomatología confirmó la ausencia de situaciones de exceso de agua en el suelo a pesar de que el agua aplicada al tratamiento T0 fuese claramente superior a las necesidades hídricas del cultivo durante el periodo experimental.

Durante la fase de crecimiento del fruto, los árboles de los tratamientos T1 y T2 experimentaron dos situaciones hídricas claramente diferenciables. Por una parte, el hecho de que los tratamientos T2 y T0 presentasen similares producciones y características de la cosecha (Tablas 7.1 y 7.2), y sólo hubiese diferencias significativas en los valores de Ψ_{tallo} en las plantas de ambos tratamientos en cuatro ocasiones (Figura 7.2B), indicaron que el estado hídrico de las plantas T2 no resultó modificado sensiblemente por el procedimiento de programación del riego. Por otra parte, el hecho de que en las plantas del tratamiento T1 la producción y tamaño de los frutos fuesen inferiores a los del tratamiento T0 (Tablas 7.1 y 7.2), y los valores de Ψ_{tallo} disminuyesen progresivamente (Figura 7.2B), evidenciaron una situación de claro déficit hídrico.

Teniendo en cuenta que el número de frutos por árbol y la eficiencia de la carga de frutos fue similar en los tres tratamientos, cabe pensar que el déficit hídrico observado en el tratamiento T1 durante el crecimiento del fruto fue capaz de condicionar el tamaño de los mismos (Tablas 7.1 y 7.2), confirmando la sensibilidad al déficit hídrico de la fase de crecimiento del fruto (Li et al., 1989; Boland et al., 1993; Torrecillas et al., 2000; Girona et al., 2004).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con las plantas del tratamiento T2, puede resaltarse la capacidad de la intensidad de señal

de la MCD para ajustar el programa de riego de forma diaria, sin inducir situaciones de déficit hídrico de consideración, ni afectar a la producción. Además, si se tienen en cuenta los resultados descritos en el Capítulo 5, debe subrayarse que la programación diaria del riego supone un claro aumento de la precisión, ya que la variabilidad durante la fase de crecimiento del fruto se redujo a la mitad (Figuras 5.4B y 7.3B).

La elevada variabilidad durante la fase de crecimiento del fruto de los valores de intensidad de señal de la MCD en el tratamiento T1, frente a la baja encontrada en el caso del tratamiento T2 (Figuras 7.3A y 7.3B) induce a concluir que la utilización de valores de referencia, procedentes de árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo, es mucho más precisa para programar el riego que la utilización de ecuaciones de referencia.

Sin embargo, esta afirmación parece evidente exclusivamente durante el mencionado periodo, no pudiéndose generalizar a todos los periodos fenológicos, ya que la ecuación de referencia utilizada para el periodo estudiado tras la recolección permitió aportar el 92.6% de la ET_c como consecuencia de un claro aumento de la precisión del riego, esencialmente a partir del DA 140 (Figura 7.3A).

Resulta difícil de explicar la falta de precisión de la ecuación de referencia utilizada durante la fase de crecimiento del fruto, pudiéndose pensar que posiblemente sea necesario contar con datos de un mayor número de años para disminuir el grado de incertidumbre asociado al uso de la ecuación.

De la consideración del conjunto de resultados obtenidos en este capítulo cabe concluir que la programación diaria del riego utilizando medidas de la MCD aumenta la precisión del riego en relación a la observada programando cada tres días (capítulo 5).

La utilización de árboles de referencia resulta mucho más precisa que las ecuaciones de referencia para el cálculo de la intensidad de señal de la MCD durante la fase de crecimiento del fruto, sugiriéndose la

elaboración de una nueva ecuación de referencia en base a datos de más años.

La aceptable precisión de la programación del riego obtenida tras la recolección utilizando ecuaciones de referencia induce a pensar en que una vez mejorada la precisión de estas ecuaciones podrán ser incorporadas a autómatas de riego, evitando la complejidad de mantener, en la misma parcela, árboles en condiciones no limitantes de agua en el suelo.

7.5. Bibliografía

- Boland, A.M., Mitchell, P.D., Jerie, P.H., Goodwin, I. 1993. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science* 68: 261-274.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Dejong, T.M. 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79: 308-315.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C. 1989. Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrigation and Drainage Systems* 3: 1-12.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Water status indicators of lemon trees in response to flooding and recovery. *Biologia Plantarum* 51: 292-296.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., Conejero, W., García-Orellana, Y., Torrecillas, A. 2008a. Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. *Australian Journal of Agricultural Research* (Enviado a publicar).
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W., Torrecillas, A. 2008b. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* (DOI 10.1007/s00271-008-0126-z).
- SPSS Inc. 1989-2006. SPSS Professional Statistics, Chicago, Illinois. USA.

- Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez, M.C. 2000. Apricot tree response to irrigation withholding at different phenological periods. *Scientia Horticulturae* 85: 201-215.
- Velez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90: 197-204.

8. Conclusiones

1. La máxima contracción diaria del tronco resultó ser un indicador más sensible y consistente que el flujo de savia para diagnosticar cambios en el estado hídrico del melocotonero. Además, las bajas necesidades de mantenimiento del instrumental, junto con el suministro de información en tiempo real confirmaron sus potencialidades como herramienta para la programación automática del riego.
2. La programación del riego del melocotonero puede realizarse utilizando exclusivamente medidas de la máxima contracción diaria del tronco, ya que las dosis de riego se pueden ajustar de forma precisa conforme se genera la información suministrada por este indicador, no induciendo ninguna situación de déficit hídrico ni afectando la producción ni la calidad del melocotón.
3. Por el contrario, la programación del riego utilizando medidas de flujo de savia mostró una inferior precisión en los ajustes de las dosis de riego, induciendo situaciones de déficit hídrico moderado y afectando el tamaño de los frutos recolectados.
4. La programación del riego manteniendo la intensidad de señal de la máxima contracción diaria del tronco en valores muy cercanos a la unidad puede ser una prometedora herramienta para la estima de las necesidades de riego de los cultivos.
5. Los ajustes diarios de las dosis de riego suponen un claro aumento de la precisión del riego en periodos de alta variabilidad como el crecimiento del fruto.

6. Los resultados obtenidos demostraron que es posible elaborar ecuaciones de referencia de la máxima contracción diaria del tronco respecto de las variables climáticas, si bien, sólo cuando se utilizan valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia, el déficit de presión de vapor medio diario o la temperatura media diaria es posible obtener ecuaciones de referencia con validez interanual.
7. Para la elaboración de estas líneas de base es necesario considerar que las variaciones diarias del diámetro del tronco tienen que contemplarse no sólo en el contexto del balance hídrico de la planta sino en el del balance de carbono, lo que obliga a considerar periodos fenológicos concretos, evitando la consideración conjunta de toda la estación de crecimiento.
8. La comparación de la programación del riego utilizando líneas de base y árboles de referencia mostró una mayor precisión con la segunda metodología durante la fase de crecimiento del fruto. Sin embargo, la aceptable precisión obtenida tras la recolección utilizando ecuaciones de referencia induce a pensar en que una vez mejorada la precisión de estas ecuaciones podrán ser incorporadas a autómatas de riego, evitando la complejidad de mantener, en la misma parcela, árboles en condiciones no limitantes de agua en el suelo.
9. Los resultados obtenidos abren nuevas expectativas para la investigación sobre riego, fundamentalmente sobre requerimientos hídricos de los cultivos y el desarrollo de estrategias precisas de riego deficitario controlado. En este último caso, la dendrometría puede constituir una herramienta precisa para detectar la ocurrencia de los períodos críticos de crecimiento de los frutos.

9. Abreviaturas y símbolos

9.1. Alfabetizables

ABA	Ácido abscísico
ATP	Adenosina trifosfato
CMNDT	Tasa de crecimiento del mínimo diámetro del tronco
CMXDT	Tasa de crecimiento del máximo diámetro del tronco
CRA	Contenido relativo de agua
CU	Coefficiente de uniformidad
CV	Coefficiente de variación
cv	Cultivar
CWSI	Crop water stress index
DA	Día del año
DPV	Déficit de presión de vapor
dS	Decisiemens
E	Aporte o pérdida de agua por escorrentía superficial
E	Evaporación desde el suelo
ES	Error estándar de la media global
ET	Evapotranspiración
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FS	Flujo de savia

FDT	Fluctuaciones del diámetro del tronco
G	Flujo de calor del suelo
H	Calor sensible
HR	Humedad relativa
IS	Intensidad de señal
J	Densidad de flujo de savia
L	Lluvia
LVDT	Linear variable displacement transducer
MCD	Máxima contracción diaria del tronco
MNDT	Mínimo diámetro del tronco
MXDT	Máximo diámetro del tronco
NADPH	Nicotinamida-adenina dinucleótido fosfato
Q	Caudal de savia
R	Riego
RL	Requerimientos de lavado para controlar la salinidad
SPSS	Statistical package for the social sciences
T	Transpiración
TDR	Time domain reflectometry
V	Velocidad del pulso de calor

9.2. No alfabetizables

$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
CE_{ar}	Conductividad eléctrica del agua de riego
$\text{CE}_{\text{es}}^{-100\%}$	Conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo para una reducción de los rendimientos del 100%
C_i	Concentración interna de CO_2
CRA	Contenido relativo de agua
DPV_m	Déficit de presión de vapor medio diario
DPV_{md}	Déficit de presión de vapor al mediodía
E_a	Eficiencia de la aplicación
ET_C	Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar
$\text{ET}_{C_{aj}}$	La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar
ET_0	Evapotranspiración del cultivo de referencia (gramíneas)
ET_{rl}	Evapotranspiración en riego localizado
F_l	Fracción volumétrica de agua en la madera
F_m	Fracción volumétrica de madera
g_l	Conductancia foliar
K_C	Coefficiente de cultivo
K_r	Factor de corrección de la ET_C
N_n	Necesidades netas de la plantación

9. Abreviaturas y símbolos

N_t	Necesidades totales de la plantación
P_{fresco}	Peso fresco
$P_{\text{máx}}$	Peso máximo
P_n	Fotosíntesis neta
P_{seco}	Peso seco
R_i	Efecto del tratamiento de riego
R_n	Radiación neta
RT_{ij}	Efecto de interacción entre el tratamiento de riego y el tiempo
T_j	Efecto del tiempo
T_m	Temperatura del aire media diaria
T_{md}	Temperatura del aire al mediodía
V_w	Volumen molar parcial del agua
X_d	Distancia al calentador desde la sonda aguas abajo
X_u	Distancia al calentador desde la sonda aguas arriba
Y_{ijk}	Valor observado para la variable considerada
ΔH	Variación de humedad del suelo
$\varepsilon_{k(ij)}$	Efecto de la unidad experimental o repetición
θ_v	Contenido volumétrico de agua en el suelo
λET	Flujo de calor latente

μ	Efecto común debido a la media propia de la variable en la población
μ	Presión de vapor de agua
μ_w	Potencial químico del agua en la planta
μ_w^0	Potencial químico del agua pura a la misma presión y temperatura
Ψ	Potencial hídrico
Ψ	Potencial hídrico foliar
Ψ_g	Potencial gravitacional
Ψ_m	Potencial matricial
Ψ_p	Potencial de turgencia o presión
Ψ_s	Potencial osmótico
Ψ_{tallo}	Potencial hídrico del tallo