

A-05

USO DE SENSORES EN SUELO Y PLANTA PARA EL MANEJO DEL RIEGO EN EL CULTIVO DEL ALMENDRO

Blaya Ros, P.J.¹, Blanco Montoya, V.¹, Torres Sánchez, R.², Temnani Rajjaf, A.¹, Soto Valles, F.², Jiménez Buendía, M.² Domingo Miguel, R.¹

¹ Dpto. de Producción Vegetal, Universidad Politécnica de Cartagena, Pase Alfonso XIII, 48. 30203, Cartagena. pedro.blaya@upct.es; victor.blanco@upct.es; abdelmalek91@gmail.com; rafael.domingo@upct.es

² Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Dpto. de Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena (ETSII-UPCT). roque.torres@upct.es; pencho.soto@upct.es; manuel.jimenez@upct.es.

Resumen

Con el objeto de evaluar la idoneidad de distintos indicadores del estado hídrico del suelo y planta para el manejo del riego se realizó un ensayo, en almendros cv. 'Marta' en 2017, a partir de dos tratamientos de riego: un CTL, regado al 115% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y otro de riego deficitario controlado (RDC) regado al 100% de ET_c , a excepción de la fase de llenado de grano, fase IV (junio – mediados de agosto) cuando se aplicó el 30% de ET_c . RDC supuso ahorros de agua del 36% respecto a CTL. A partir de ambos tratamientos se determinó la intensidad de señal (IS), coeficiente de variación (CV) y sensibilidad de los indicadores: potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m), potencial de tallo a mediodía (Ψ_t), conductancia estomática máxima (g_s) y tasa de asimilación foliar neta máxima (A_{ml}). Ψ_m presentó la mayor sensibilidad del conjunto de los indicadores estudiados, a pesar de su alta variación. De ahí, que, para optimizar la programación del riego en almendro, sea conveniente la utilización conjunta de Ψ_m con otro indicador en planta.

1- Introducción

En climas áridos y semiáridos, donde ocurren fuertes déficits hídricos estacionales, es prioritario optimizar y racionalizar el uso del agua en la agricultura, por tratarse del principal destinatario de los recursos hídricos disponibles.

Los procedimientos tradicionales de programación del riego se basan en estimas de la ET_c (Allen et al., 2006). Sin embargo, la determinación de ET_c suele llevar asociadas ciertas incertidumbres debido a los efectos de la arquitectura del dosel vegetal, fracción de suelo sombreado y manejo del suelo. Por ello y de cara a la confección de programas de riego más técnicos y científicos será necesario: i) conocer la respuesta agronómica del cultivo al déficit hídrico y sus mecanismos de adaptación y tolerancia al estrés, y ii) disponer de indicadores del estado hídrico del suelo y planta sensibles y robustos para la aplicación de estrategias de riego que han sido validadas en ensayos de campo.

Existen numerosos indicadores del estado hídrico del suelo y la planta (Jones, 2007), siendo los primeros los más frecuentemente utilizados en el manejo del riego. El potencial matricial y contenido volumétrico de humedad del suelo han sido y son ampliamente utilizados en la programación del riego, debido a que pueden ser registrados de forma automática y a su sensibilidad a las condiciones hídricas del suelo (Intrigliolo y Castel, 2006), las que a su vez pueden ser una medida indirecta del estado hídrico de la planta. Sin embargo, la ubicación de los sensores de suelo debe realizarse teniendo en cuenta la distribución y densidad radical, lo que incrementa la incertidumbre cuando la humedad del suelo varía en tres dimensiones como es el caso del riego localizado. Aunque, los

indicadores en planta suelen reflejar con mayor precisión el estado hídrico del cultivo, por su carácter fisiológico, estos presentan mayor dificultad de medida e interpretación, de ahí la necesidad de seguir profundizando en su conocimiento.

2- Objetivo

Este trabajo tiene por objetivo evaluar diferentes indicadores del estado hídrico del suelo y planta de uso frecuente en el estudio de las relaciones hídricas en plantas con el fin de mejorar el manejo del riego en almendro.

3- Materiales y Métodos

El ensayo se llevó a cabo en almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb) cv. 'Marta' injertados sobre 'Mayor' (*Prunus dulcis* vs *Prunus persica*) durante 2017. La parcela experimental, de 1 ha de superficie, pertenece a la Estación Experimental Agroalimentaria 'Tomás Ferro' (ETSIA-UPCT), ubicada en La Palma, Cartagena (37° 41' N, 0° 57' E). Los árboles, de 17 años de edad y diámetro de tronco de 23,49 cm, están dispuestos a marco de 7 m x 6 m. El sistema de riego por goteo consta de dos laterales por hilera de árboles y emisores autocompensantes de 4 L h⁻¹ a un metro de separación (12 emisores árbol⁻¹). El agua de riego utilizada presentó una conductividad eléctrica (CE_{25°C}) de 1,07 dS m⁻¹. Ambos tratamientos recibieron idénticos cuidados agrícolas.

Los datos agrometeorológicos fueron proporcionados por la red SIAM de la Región de Murcia (CA12) ubicada cerca de la parcela experimental. Las condiciones meteorológicas fueron típicas del clima mediterráneo con veranos secos y calurosos e inviernos suaves y húmedos. La evapotranspiración de referencia (ET₀) acumulada en el periodo 60 – 319 DDA (día del año) fue de 1115 mm, la ET₀ media durante el periodo de estudio fue de 4,29 mm día⁻¹, la precipitación total 93,80 mm. La temperatura media diaria tuvo un valor promedio de 20,78 °C, con un valor máximo de 31,29 °C (DDA 209). El valor máximo de déficit de presión de vapor (DPV) medio diario fue de 2,69 kPa (DDA 179).

Se ensayaron 2 tratamientos de riego según un diseño de bloques al azar con 3 repeticiones y 12 árboles por repetición. Los tratamientos de riego fueron: i) control, CTL, regado al 115% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y ii) riego deficitario controlado, RDC₃₀, regado al 100% de ET_c, a excepción de la fase de llenado de grano, fase IV (junio – mediados de agosto) cuando se aplicó el 30% de ET_c. Las dosis de riego se calcularon semanalmente a partir de la estimación de ET_c según la metodología FAO:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times K_L$$

donde, ET₀ es la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006); K_c, coeficiente de cultivo (Steduto et al., 2012); K_r, coeficiente corrector por localización dependiente de la superficie del suelo cubierta por las copas de los árboles (Fereres y Castel, 1981).

Para la medida del potencial matricial del agua en el suelo, Ψ_m, se instalaron sensores capacitivos de compensación térmica (MPS-6, Decagon devices Inc, USA), dos por árbol y en dos árboles por repetición, a 2,5 m del tronco, 23 cm del emisor y a 25 y 45 cm de profundidad. Ψ_m fue medido antes del riego, entre las 7:00 – 8:00 (hora solar), con un lector portátil (ProCheck, Decagon devices Inc, USA). El potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) se midió periódicamente con una cámara de presión tipo Scholander (mod. SF-PRES-70, SolFranc Tecnologías, S.L., España) en hojas no transpirantes, envueltas con una lámina de polietileno negro y cubierta con papel de aluminio al menos 2 horas antes de las medidas (Hsiao, 1990). Los niveles de conductancia estomática máxima (g_s) y tasa de asimilación foliar neta máxima (A_{mi}) se midieron con un equipo portátil (CIRAS2, PPSsystem, USA). Las hojas, en número similar al utilizado para la determinación de Ψ_t, fueron seleccionadas del tercio medio de las ramas soleadas y medidas a saturación de luz (radiación fotosintéticamente activa, PAR ≈ 1500 mmol m⁻² s⁻¹).

Se determinó la intensidad de señal (IS), coeficiente de variación (CV) y sensibilidad de los indicadores del estado hídrico indicados. IS de Ψ_t y Ψ_m se calculó como la relación entre los valores (V) de RDC y CTL ($IS = V_{RDC} \cdot V_{CTL}^{-1}$) y para g_s y A_{ml} como $IS = V_{CTL} \cdot V_{RDC}^{-1}$. La sensibilidad se determinó mediante las expresiones:

i) $S = \frac{IS}{CV}$ propuesta por Goldhamer y Fereres (2001).

ii) $S^* = \frac{IS - 1}{CV}$ propuesta por de la Rosa et al. (2014).

El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa IBM SPSS Statistics v.24, a partir del análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia del 95%.

4- Resultados y Discusión

Los volúmenes de riego aplicados durante la campaña fueron 7770 y 4975 m³ ha⁻¹ para CTL y RDC, respectivamente. RDC supuso un ahorro de agua del 36% respecto a CTL, resultado similar al obtenido por Espadafor et al. (2017) en almendro.

Las evoluciones de Ψ_m , en las profundidades de 25 y 45 cm, mostraron la influencia del régimen diferencial de riego (Figura 1). El tratamiento CTL mantuvo valores propios de capacidad de campo ($\Psi_m \approx -25$ kPa), a excepción de dos periodos: i) uno de supresión del riego por motivos de uniformizar la fecha de recolección (fase IV; DDA 193 – 207), si bien al finalizar dicho periodo de supresión y antes de aplicar el déficit hídrico en RDC, ambos tratamientos se regaron los DDA 208-209, y ii) el derivado de las tareas de limpieza en el canal del trasvase Tajo-Segura durante los DDA 280 - 294 (fase V). La reducción de Ψ_m por supresión del riego durante este segundo periodo no afectó de igual manera al estado hídrico del cultivo (Figura 2) al tratarse de periodo de baja demanda climática. Ψ_m disminuyó durante el periodo de restricción hídrica (fase IV), llegando a alcanzar valores mínimos de -1157 y -1439 kPa a 25 y 45 cm de profundidad, respectivamente. Estos valores fueron inferiores a los encontrados por Puerto et al. (2013) en almendro e Intrigliolo y Castel (2006) en ciruelo. Al inicio de la fase V, y antes de alcanzar valores Ψ_m similares a CTL, RDC presentó una recuperación más lenta que la ocurrida en el cambio del 100 al 30% ET_c, debido, principalmente, al agotamiento de la reserva hídrica del suelo producido durante la fase IV y la alta demanda climática de este periodo.

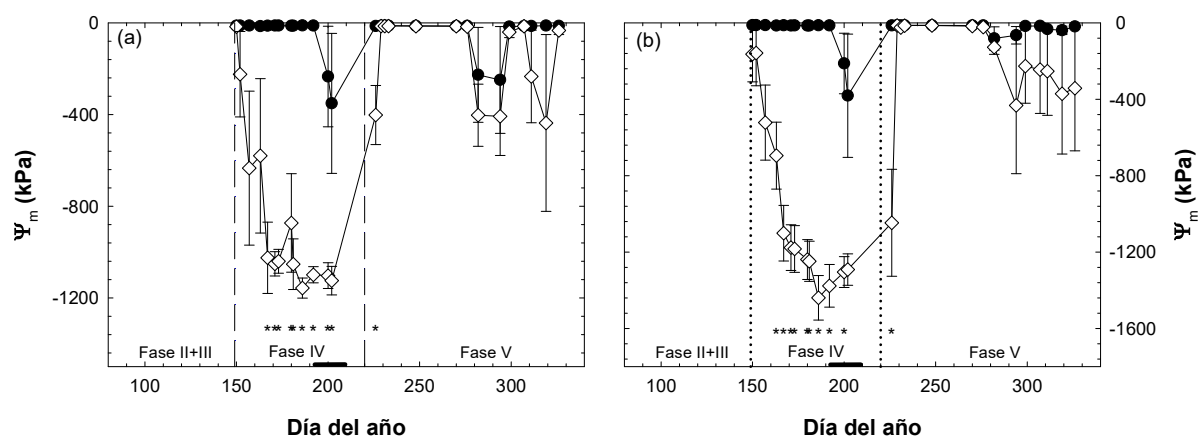


Figura 1. Evolución del potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m) a 25 cm y 45 cm (a) y (b) respectivamente, en 2017. Las líneas verticales de puntos separan las fases fenológicas. Las barras verticales representan el error estándar de la media. La barra horizontal negra representa el periodo de supresión del riego por motivos de recolección. Cada punto es la media de 6 medidas por tratamiento. Los asteriscos indican diferencias significativas según el test de Rango Múltiple de Duncan ($p < 0,05$).

La figura 2 muestra la evolución del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) para los dos tratamientos. Los valores medios de Ψ_t de CTL ($\Psi_t \approx -0,69$ MPa) fueron similares a los observados por Puerto et al. (2013) en almendros bajo condiciones no limitantes de agua. Ambos tratamientos mostraron valores semejantes de Ψ_t durante los periodos en los que se regaban para satisfacer las necesidades hídricas de la planta. Sin embargo, durante los meses de mayor demanda evaporante y coincidiendo con la fase IV, periodo de déficit hídrico, RDC obtuvo valores de Ψ_t significativamente inferiores a los observados en el tratamiento CTL. El valor Ψ_t mínimo alcanzado fue de $-2,26$ MPa (DDA 200). Ψ_t de RDC durante la fase IV disminuyó de forma rápida debido al acelerado agotamiento de la reserva hídrica del suelo (Figura 1); por el contrario, al reanudar el riego durante la fase V, llevó un periodo de 35 días para volver a alcanzar valores próximos a $-1,0$ MPa, pero sin alcanzar los niveles del tratamiento control. Esta tendencia fue similar a la observada por Romero et al. (2004) en almendro sometidos a riego deficitario controlado.

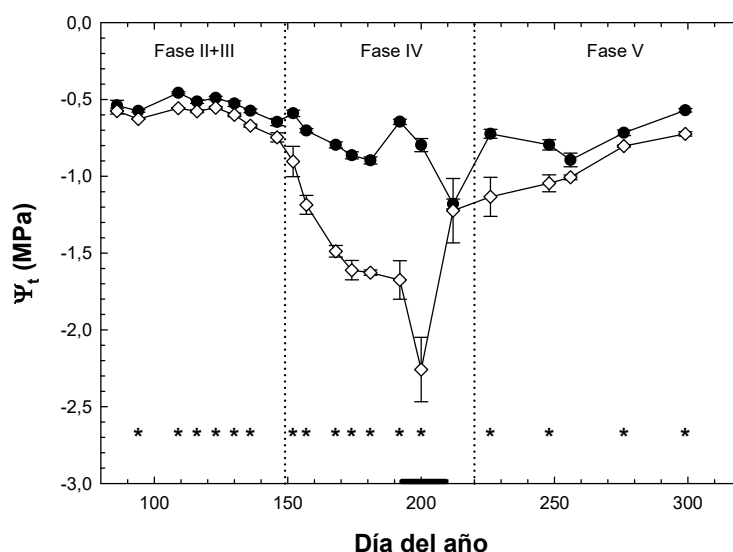


Figura 2. Evolución del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) durante 2017. Las líneas verticales de puntos separan las fases fenológicas. Las barras verticales representan el error estándar de la media. La barra horizontal negra representa el periodo de supresión del riego por motivos de recolección. Cada punto es la media de 6 medidas por tratamiento. Los asteriscos indican diferencias significativas según el test de Rango Múltiple de Duncan ($p < 0,05$).

Los parámetros de intercambio gaseoso a escala foliar, medidos en días soleados (Figura 3), fueron similares en ambos tratamientos en los periodos en los que se cubrieron las necesidades hídricas del cultivo (fases II+III y fase V). A nivel del tratamiento control, los valores g_s y A_{ml} presentaron fluctuaciones relativas respecto a la media muy similares a los de Ψ_t . Sin embargo, las diferencias relativas entre ambos tratamientos respecto a CTL fueron muy superiores en Ψ_t . Sorprendentemente, los valores superiores de A_{ml} tuvieron lugar tras la cosecha lo que pudiera estar asociado con la pérdida de hojas durante la recolección. Contrariamente, g_s se mantuvo relativamente estable en pre y poscosecha. Los valores g_s y A_{ml} en RDC tuvieron un comportamiento acorde con la restricción hídrica impuesta en la fase IV. Las reducciones en g_s y A_{ml} fueron del orden del 50% y 35% respectivamente, y de orden similar a las indicadas por Egea et al. (2014) en almendro. Tras el periodo de supresión de riego, finales de la fase IV e inicios de la fase V, A_{ml} y g_s presentaron valores similares en ambos tratamientos, con una velocidad de recuperación superior en el tratamiento RDC. Durante la fase V, g_s y A_{ml} fueron similares en ambos tratamientos como consecuencia de la satisfacción de las necesidades hídricas y la disminución de la demanda climática. La comparación de las figuras 1, 2 y 3 indica una recuperación de A_{ml} y g_s durante este periodo fue similar a la observada en Ψ_m y Ψ_t .

confirmando la sensibilidad de este conjunto de parámetros al déficit hídrico (Intrigliolo y Castel, 2004; Romero et al., 2004).

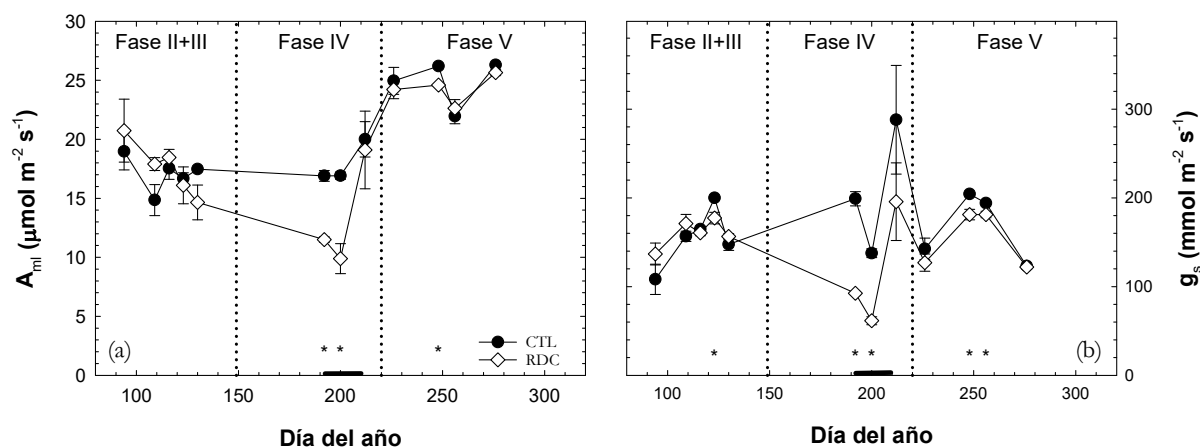


Figura 3. Evolución de la (a) tasa de asimilación foliar neta máxima (A_m) y (b) conductancia estomática máxima (g_s) durante 2017. Las líneas verticales de puntos separan las fases fenológicas. Las barras verticales representan el error estándar de la media. La barra horizontal negra representa el periodo de supresión del riego por motivos de recolección. Cada punto es la media de 6 medidas por tratamiento. Los asteriscos indican diferencias significativas según el test de Rango Múltiple de Duncan ($p < 0,05$).

Durante la fase IV del ciclo del almendro, periodo no crítico, todos los indicadores estudiados reflejaron el nivel de déficit hídrico aplicado (Figura 4). De los indicadores del estado hídrico estudiados, Ψ_m fue el indicador que presentó mayor IS y sensibilidad. Igualmente, fue el que mostró mayor CV, 38% para 25 cm y 43% para 45 cm de profundidad (Tabla 1). Este coeficiente de variación, similar al encontrado por otros autores (Intrigliolo y Castel, 2006), podría atribuirse a la variabilidad espacial del contenido de humedad del suelo e irregular distribución del agua en la zona radical (Naor y Cohen, 2003). Los indicadores hídricos de planta, Ψ_t , g_s y A_m , mostraron una alta sensibilidad a los cambios del contenido de humedad del suelo. Ψ_t fue el indicador hídrico de planta que mayor IS y sensibilidad mostró, junto con el menor CV (6%), valores similares a los observados por Ortuño et al. (2006) en limón e Intrigliolo y Castel (2006) en ciruelo.

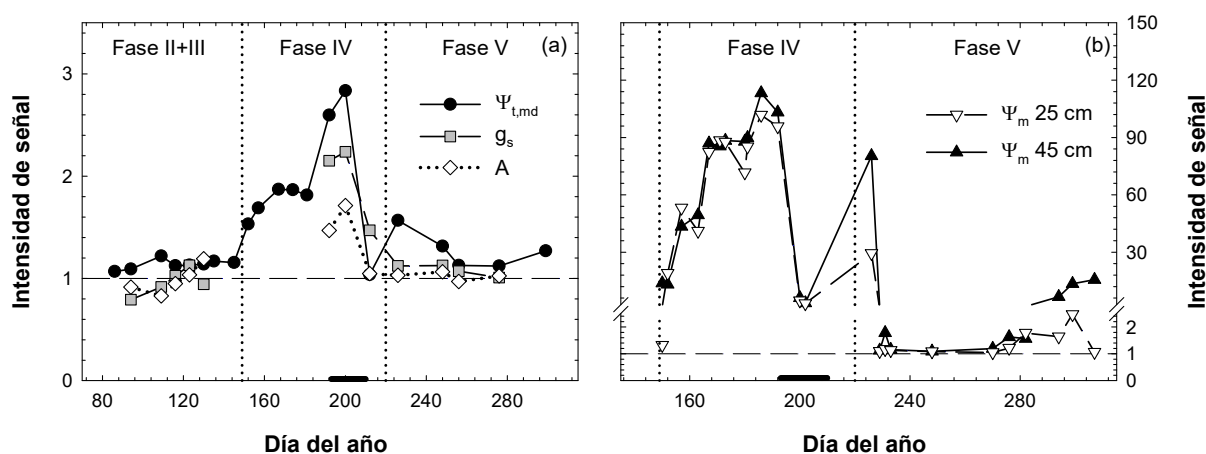


Figura 4. Intensidad de señal (a) del potencial de tallo (Ψ_t), conductancia estomática máxima (g_s), fotosíntesis neta (A_m) y (b) del potencial matricial (Ψ_m) a 25 y 45 cm. Cada punto es la media de 6 medidas para Ψ_t , g_s , A_m y Ψ_m . Las líneas verticales discontinuas

separan las fases fenológicas. La barra horizontal negra representa el periodo de supresión del riego por motivos de recolección.

Tabla 1. Valores medios de la intensidad de señal (IS), coeficiente de variación (CV) y de la sensibilidad (S y S*) para los diferentes indicadores hídricos estudiados.

Indicador		Fase II + III	Fase IV	Fase V	Ciclo completo
Ψ_t	IS	1,14	1,90	1,21	1,46
	CV	0,03	0,09	0,04	0,06
	S	38,00	21,11	30,25	24,33
	S*	4,67	10,00	5,25	7,65
g_s	IS	0,96	1,95	1,08	1,25
	CV	0,08	0,18	0,06	0,10
	S	12,00	10,83	18,00	12,50
	S*	-0,50	5,28	1,33	2,50
A_{ml}	IS	0,98	1,41	1,02	1,10
	CV	0,14	0,19	0,03	0,11
	S	7,42	7,42	34,00	10,00
	S*	-0,14	2,16	0,67	0,91
Ψ_m (25 cm)	IS	-	56,55	7,08	30,80
	CV	-	0,34	0,42	0,38
	S	-	166,32	16,86	81,05
	S*	-	163,38	14,48	78,42
Ψ_m (45 cm)	IS	-	60,33	11,51	35,02
	CV	-	0,25	0,61	0,43
	S	-	241,32	18,87	81,44
	S*	-	237,32	17,23	79,12

5- Conclusiones

De los indicadores estudiados, Ψ_m fue el más sensible, seguido de Ψ_t , A_{ml} y g_s . Sin embargo, e independientemente de la alta sensibilidad al déficit hídrico de Ψ_m , su alto coeficiente de variación indica la necesidad de disponer de un mayor número de sensores o puntos de medida para representar adecuadamente el estado hídrico a nivel de parcela que en el caso de Ψ_t , o ir acompañado de la medida de algún otro en planta para conocer con mayor precisión el estado hídrico real del cultivo.

6- Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España, MINECO (Ref. AGL2016-77282-C3-3-R) y la Fundación Séneca de la Región de Murcia (Grupo de excelencia 2016-2019, Ref. 19895/GERM/15). Pedro José Blaya agradece a la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) la beca de iniciación a la actividad investigadora que le fue concedida.

7- Bibliografía

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, (ed). FAO - irrigation and drainage

- paper 56. FAO, Rome, FAO. ed. Roma.
- de la Rosa, J.M., Conesa, M.R., Domingo, R. & Pérez-Pastor, A. (2014). A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees. *Scientia Horticulturae* 169, 147-153.
- Egea, G., González-Real, M.M., Martín-Gorriz, B. & Baille, A. (2014). Leaf-to-branch scaling of C-gain in field-grown almond trees under different soil moisture regimes. *Tree Physiology* 34, 619-629.
- Espadafor, M., Orgaz, F., Testi, L., Lorite, I.J., González-Dugo, V. & Fereres, E., (2017). Responses of transpiration and transpiration efficiency of almond trees to moderate water deficits. *Scientia Horticulturae* 225, 6-14.
- Fereres, E. & Castel, J.R., 1981. Drip Irrigation Management. Division of Agricultural Sciences, University of California (Leaflet 21259).
- Goldhamer, D.A. & Fereres, E. (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20, 115-125.
- Hsiao, T.C., 1990. Measurements of plant water status. *Agronomy* 30, 243-279.
- Intrigliolo, D.S. & Castel, J.R. (2006). 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. (2004). Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23, 93-102.
- Jones, H.G. (2007). Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* 58, 119-130.
- 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., 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.
- Puerto, P., Domingo, R., Torres, R., Pérez-Pastor, A. & García-Riquelme, M. (2013). Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage: Water relations and yield. *Agricultural Water Management* 126, 33-45.
- Romero, P., Navarro, J.M., García, F. & Botía Ordaz, P. (2004). Effects of regulated deficit irrigation during the pre-harvest period on gas exchange, leaf development and crop yield of mature almond trees. *Tree Physiology* 24, 303-312.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, (ed). FAO - irrigation and drainage paper 66. FAO, Rome.