

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN CÍTRICOS CON BASE EN SENSORES DE MEDIDA DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO Y DE LA PLANTA

J.E. Vélez Sánchez

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Universidad Nacional de Colombia
Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia
anjavelez@yahoo.com

D. Sebastiano Intrigliolo

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)
Departamento de Recursos Naturales
Apartado oficial. 46113 Moncada (Valencia), España

J.R. Castel Sánchez

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)
Departamento de Recursos Naturales
Apartado oficial. 46113 Moncada (Valencia), España

Resumen: Se ha realizado un experimento de riego deficitario en una parcela de "Clementina de Nules/Citrango carrizo" en el que se estudiaron tres programaciones diferentes de riego por goteo basadas en: i) información del suelo (Watermark), ii) de la planta (dendrómetros) y iii) riego deficitario fijo. Todas ellas se compararon con un control bien regado durante todo el año al 115 % de la evapotranspiración de un lisímetro de pesada (ETlis) situado en la misma parcela. Los tratamientos diferenciales de riego, se aplicaron tras la caída fisiológica de frutos, durante el periodo de crecimiento del fruto, desde mediados de julio hasta octubre. Durante el resto del año todos los tratamientos se regaron al 115 % de la ETlis. Al tratamiento regado con base en la información de la planta (MCD1.25) se le aplicó semanalmente un volumen de agua variable para mantener la máxima contracción diaria del tronco (MCD) en torno al 125 % de la del control. Mientras fue posible programar el riego para mantener el valor del MCD en un 125 % de la del control, en el tratamiento WMK, los sensores no respondieron a los ciclos de secado y humedecimiento por lo que no se pudo regar dicho tratamiento en base a los umbrales establecidos. Ningún tratamiento de riego difirió significativamente del control en cuanto a producción y calidad de la fruta, obteniéndose ahorros de agua en todos ellos cercanos a un 30 %. Por lo tanto, no queda demostrado el valor añadido de regar en función de la información derivada de los dendrómetros.

INTRODUCCIÓN

España es el principal país mediterráneo productor de cítricos con el 6 % de la producción mundial (6.175.400 toneladas en 303.800 ha, FAO, 2003). La producción de mandarinas alcanzó el 23 % del total, y dentro de éste grupo, las clementinas representaban el 85.4 %, de las cuales un tercio son clementina de Nules (FAO, 2003).

El consumo de agua en el regadío agrícola representa cerca del 87 % del total mundial y su demanda va en aumento. El agotamiento de los recursos hídricos, los altos costos del agua y la

energía, la disminución de los precios internacionales de la fruta y la globalización de los mercados, exigen mejoras en la eficiencia de riego.

Una de las alternativas propuestas para frutales es el riego deficitario controlado (RDC), el cual se basa en aportes reducidos de agua en periodos determinados y en cubrir las necesidades hídricas durante el resto del ciclo fenológico del árbol (Behboudian y Mills, 1997). González-Altozano y Castel (2003) determinaron en Clementina de Nules, que durante la fase inicial del crecimiento lineal del fruto se pueden aplicar moderados recortes de riego, sin mermas en la producción ni en calidad de la fruta. Por otra parte,

cuando se aplica el RDC es importante evaluar el estado hídrico del suelo y de la planta, para poder controlar y modular el déficit hídrico impuesto (Feres y Goldhamer, 1990). En los últimos años, los avances de la electrónica e informática han permitido abaratar la utilización de sensores para monitorizar constantemente el estado del suelo y de la planta (Leib *et al.*, 2003; Cohen *et al.*, 2001).

En este sentido, la máxima contracción diaria (MCD) calculada con los sensores de desplazamiento lineal (LVDT "Linear Variable Differential Transformer"), es un buen indicador del estado hídrico de la planta (Goldhamer y Feres, 2001). Sin embargo dado que la variación diaria del MCD en árboles bien regados depende también de las condiciones ambientales (Intrigliolo y Castel 2006; Moriana y Feres, 2004) se requiere de una ecuación de referencia previamente establecida para la programación del riego basada en esta variable (Goldhamer y Feres, 2004). Otra estrategia posible es la utilización de árboles control bien regados situados en la misma parcela para la obtención de los valores de referencia.

En el pasado en muchos estudios han evaluado la utilidad de los dendrómetros como indicadores de estrés (Goldhamer y Feres 2001; Intrigliolo y Castel 2004; Ortuño *et al.* 2006), pero solamente Goldhamer y Feres (2004) han analizado la respuesta de almendros a una programación del riego basada en los dendrómetros, mediante una ecuación de referencia previamente establecida. En este ensayo el objetivo principal ha sido evaluar la posibilidad de una programación del riego basada en mantener el MCD ratio (MCDi/MCD control) en un valor predeterminado. Así pues se ha comparando la respuesta agronómica a estrategias de riego basadas en la medida del estado hídrico del suelo, o de riego deficitario fijo tradicional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en la finca experimental del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), situada en Moncada, Valencia, España (39° 30' N, 0° 24' E, altitud 68 m).

La parcela experimental tiene una superficie aproximada de 1 ha. Fue plantada en 1985 con clementina de Nules (*Citrus clementina*, Hort ex Tan) injertada sobre Citrange carrizo (*Citrus sinensis* x *Poncirus trifoliata*, Raf.), al marco de 6 x 3.85 m.

El suelo típico de la zona es de textura franco arcillo-arenosa y su profundidad está limitada a

unos 60 cm por la presencia de una capa de carbonato cálcico cementada (horizonte petrocálcico). La densidad aparente media de 1.49 t m⁻³. La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente corresponden a una humedad gravimétrica del 27 % y 15 %, respectivamente.

Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica del IVIA, de 50 x 15 m, con césped regado y ubicada al lado de la parcela. El agua de riego utilizada, era procedente de un pozo, con pH 7.3, C.E. 1.4 dS/m (a 25° C.) y un contenido medio de cloruro de 120 g/m³. La determinación de la lámina de riego para el tratamiento control se hizo con base en la evapotranspiración medida con un lisímetro de pesada (ETlis), de 16 m² (4 x 4m) y 1.5 m de profundidad, y que se encuentra ubicado en la misma parcela (Castel, 2001). El porcentaje de área sombreada del árbol del lisímetro en el mes de julio de 2003 fue de 38.7 %.

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones por tratamiento (12 parcelas elementales en total). Cada parcela elemental estaba formada por 5-6 filas contiguas de seis árboles cada una (total 30-36 árboles por parcela elemental). En los 16 árboles interiores centrales de cada parcela se determinó la producción y calidad de la fruta.

De marzo a mediados de julio, todos los tratamientos se regaron al 115 % de ETlis, y durante el periodo de mediados de julio a fin de temporada del riego (octubre, con la llegada de las lluvias), se aplicaron los tratamientos diferenciales siguientes:

- *Tratamiento control*: regado durante todo el año al 115 % de ETlis.
- *Tratamiento MCD1.25*: durante el periodo del 17 de julio al 19 de octubre, coincidiendo con casi toda la fase de crecimiento lineal del fruto, se regó con dosis de riego deficitaria variable, a fin de mantener la MCD de este tratamiento en un 25 % por encima de la MCD del tratamiento control. Durante el periodo de riego deficitario este tratamiento recibió una dosis de riego correspondiente al 64 % de la del tratamiento control.
- *Tratamiento WMK*: durante el mismo periodo que el utilizado para tratamiento MCD.1.25, se redujo la dosis de forma variable a fin de intentar mantener el potencial hídrico del suelo (Ψ_{suelo}) entre -30 a -40 kPa. Durante el periodo de riego deficitario este tratamiento recibió una dosis

correspondiente al 66 % de la del tratamiento control.

- *Tratamiento Rdfijo*: durante el periodo de riego deficitario se regó con dosis deficitaria constante correspondiente al 46 % del control.

Los árboles se regaron con un sistema de goteo, con seis goteros por planta de 4 litros/hora cada uno. El volumen de agua aplicado a cada tratamiento se controló variando la duración del riego, manteniendo igual la frecuencia, que osciló entre dos y seis días por semana. El agua aplicada se midió semanalmente mediante contadores volumétricos (calibre 13 mm).

Las prácticas culturales llevadas a cabo fueron las comunes para la zona de cultivo. Utilizando el sistema de riego, se aplicaron fertilizantes una vez por semana desde el 24 de marzo al 5 de octubre. Las cantidades aplicadas fueron 65-44-100 kg/ha*año de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente.

Medida del estado hídrico del suelo y la planta

El contenido de humedad del suelo se determinó gravimétricamente (Θ_g) seis veces durante el ensayo, tomándose tres muestras alteradas por parcela experimental en las proximidades del bulbo, y a 25 cm de profundidad.

El potencial matricial del suelo (Ψ_{suelo}) se midió continuamente con ocho sensores de matriz granular (Watermark Mod. 200ss, Irrrometer Co.) por tratamiento, instalados a 30 cm de profundidad, y separados a 25 cm del emisor y de la línea de goteo.

Las ecuaciones de calibrado utilizadas para convertir los valores de resistencia eléctrica (R_e , k) medida con los sensores a valores de potencial matricial del suelo (Ψ_{suelo} , kPa), fueron calculadas mediante pruebas de laboratorio y comprobadas con las propuestas por Allen (2000). Las ecuaciones de calibración empleadas, corregidas en función de la temperatura del suelo (T_s , °C) mediante $f(T_s) = [1 + 0.018 * (T_s - 24)]$, fueron: 1) si $0 < R_e < 1$ $\Psi_{\text{suelo}} = -20 * [r * f(T_s) - 0.55]$; 2) si $1 < R_e < 8$ $\Psi_{\text{suelo}} = (-3.213 * R_e - 4.093) / (1 - 0.00973 * R_e - 0.1205 * T)$; 3) si $R_e > 8$ $\Psi_{\text{suelo}} = -2.25 - 5.239 * R_e * f(T_s) - 0.0675 R_e^2 * f(T_s)^2$.

El potencial hídrico foliar se midió con cámara de presión (mod. 5100A, Soil Moisture Equip. Corp. USA). Se realizaron medidas en hojas an-

tes del amanecer (Ψ_a) y a medio día solar, cubriéndolas dos horas antes con bolsas de plástico de cierre hermético, y recubriéndolas de papel de aluminio (Ψ_t). Tanto para Ψ_a como para Ψ_t se utilizaron tres hojas por árbol, en tres árboles representativos por tratamiento, realizando las medidas al comienzo de las restricciones y posteriormente cada mes para Ψ_a y cada 15 días para Ψ_t .

Variaciones del diámetro de los troncos

Se realizaron medidas continuas de las variaciones del diámetro del tronco con sensores de desplazamiento lineal (LVDT, Schlumberger Mod. DF-2.5), en tres árboles por tratamiento, en los tratamientos MCD1.25, WMK, Rdfijo y Control. En cada tronco se fijó un sensor por encima del injerto, a unos 20 cm del suelo en la parte norte de cada árbol, mediante porta sensores construidos de invar (una aleación con un coeficiente térmico de dilatación mínimo). A partir de las medidas de la variación del diámetro del tronco se calculó la máxima contracción diaria (MCD) como diferencia entre el máximo y el mínimo diámetro alcanzado por el tronco cada día, según Goldhamer y Fereres (2001). La toma de datos de los sensores, LVDT y Watermark, se automatizó mediante equipo de adquisición de datos y multiplexor (CR10X+(AM25T y AM416)) de Campbell Scientific Inc.

Determinación de la producción

Se hizo mediante la recolección comercial de la cosecha en los 16 árboles de cada parcela en grupos de cuatro. Del total de producción se tomaron al azar 10 cajas de 20 kg de cada parcela y se determinó la distribución de calibres por peso mediante una calibradora (Fomesa SA). Los análisis de calidad de fruta, incluyendo porcentaje de corteza, porcentaje de zumo, porcentaje de pulpa, azúcares solubles totales (°Brix), acidez total e índice de madurez, se realizaron en una muestra de 50 frutos por parcela experimental. El índice de madurez se calculó como (Sólidos solubles totales): (Acidez)*10.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante un análisis de la varianza, y mediante el test de Dunnett para comparaciones de los distintos tratamientos frente al control. Para ello, se utilizó el procedimiento "glm" del programa SAS/STAT (SAS Institute Inc., 1994).

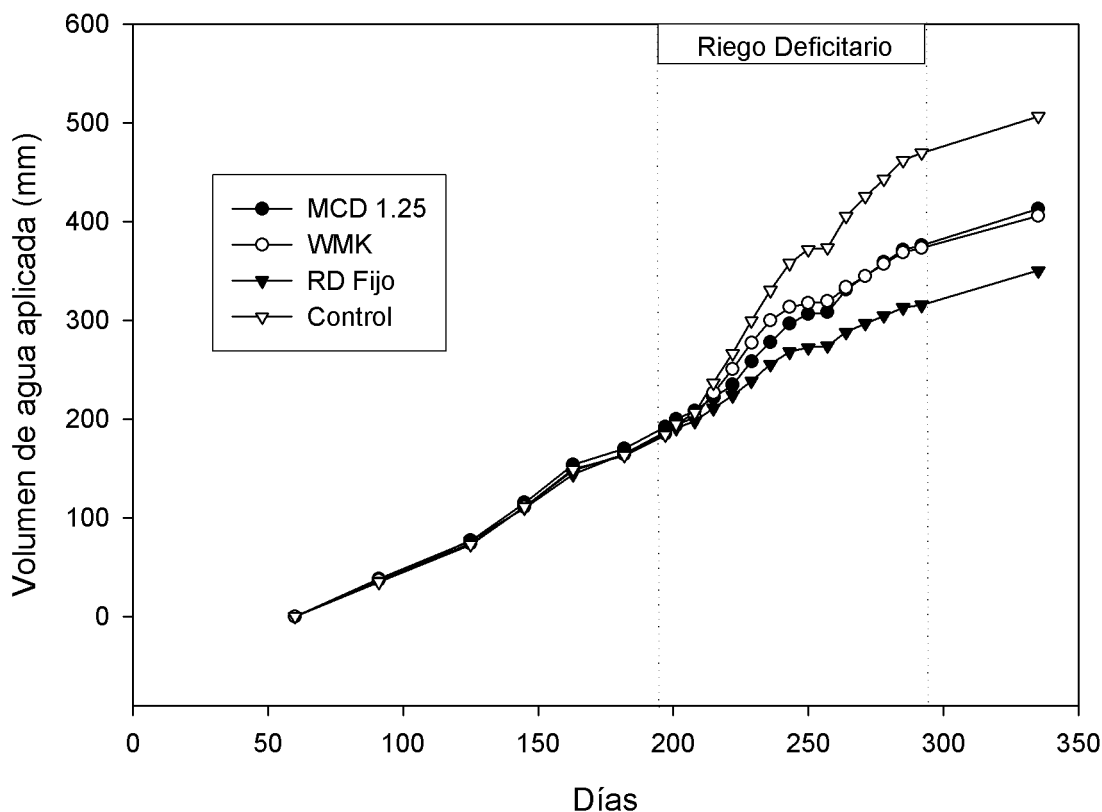


Figura 1. Volumen de agua aplicado en mm, en los distintos tratamientos de riego

Periodo	Agua aplicada, mm						
	ET _o	ET _{lis}	P	MCD1.25	WMK	RD fijo	Control
1 Marzo -16 julio (sin restricciones)	542	242	159	192	185	185	184
Total deficitario (17jul.a 19oct.)	354	233	126	184	188	131	285
19-Octubre-1 Dic (Sin restricciones)	54	49	26	37	33	35	37
Total año	950	524	311	413	406	351	506
Porcentaje de agua aplicada con respecto al control durante el periodo deficitario (%)				64	66	46	
Porcentaje de agua aplicada con respecto al control durante todo el año (%)				82	80	69	

Tabla 1. Evapotranspiración potencial (ET_o), evapotranspiración del lisímetro (ET_{lis}), precipitación total (P), y agua aplicada en los tratamientos MCD1.25, WMK, RDfijo y Control. Todos los datos expresados en mm

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Volúmenes de agua aplicada

Durante el periodo de restricción de riego la precipitación total (P) fue de 126 mm, la evapotranspiración potencial (ET_o), calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen

et al., 1998), fue de 354 mm y las láminas aplicadas mediante el riego fueron 285, 184, 188 y 131 mm para los tratamientos Control, MCD1.25, WMK y RDfijo, respectivamente (Tabla 1 y Figura 1). Las reducciones de riego representaron un ahorro de agua anual de 93, 100 y 155 mm para el MCD1.25, WMK y RDfijo, respectiva-

mente. Esto equivale a un ahorro relativo del 18, 20 y 31 %, respectivamente, e implica un ahorro de: 90, 96 y 149 horas de bombeo año⁻¹ (para 6 goteros de 4 l h⁻¹), y 94, 100 y 156 Euros ha⁻¹ año⁻¹ (con una bomba de 1.1 KVA h⁻¹, al precio medio de 0.95 Euros KVA h⁻¹).

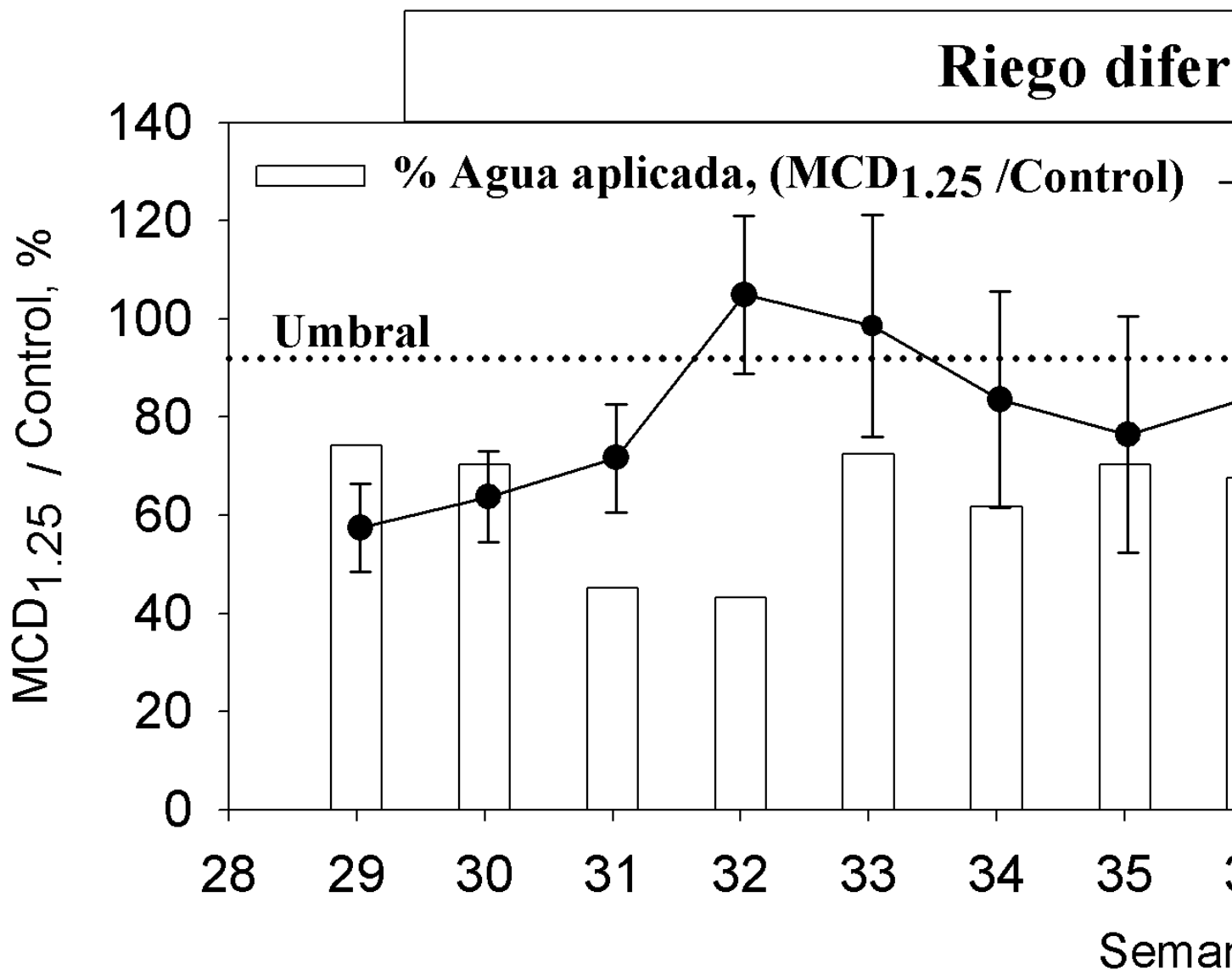


Figura 2. Evolución del ratio MCD1.25/MCDcontrol y porcentaje de agua aplicada en el tratamiento MCD1.25 con respecto al tratamiento control. Los datos corresponden a las semanas en las cuales se aplicó el riego deficitario. Las barras de error representan el error estándar de la determinación MCD1.25/MCDcontrol

Manejo del riego con base en el ratio (MCD 1.25/MCD control)

Dada la variabilidad natural entre árboles, an-

tes del inicio de los tratamientos diferenciales de riego, la relación MCD 1.25/MCD control era de 0.74, por lo que el valor de referencia a mantener equivalía a 0.74*1.25=0.92. Incrementando

o disminuyendo la cantidad de agua semanal en un 10 %, en función de la variación observada en el ratio se intentó que su evolución se fuera aproximando al umbral prefijado (Figura 2). Aunque la evolución de dicho ratio no fue del todo estable (Figura 2) siguió una pauta esperable, esto es, aumentando en aquellas semanas en las que se recortó más el agua (semanas 31 y 32) y disminuyendo cuando se aumentó la aplicación de agua (semana 37), y se acercó al valor umbral únicamente hacia el final del periodo de riego deficitario. Dicha inestabilidad se debe en parte a la importante variabilidad observada en la determinación del ratio $MCD\ 1.25/MCD\ control$, con un coeficiente de variación medio del 31 %.

Estos resultados indican que es posible automatizar el riego con base en este ratio, pero habrá que mejorar la toma de decisiones acerca de las variaciones de los volúmenes de agua a aplicar de semana en semana. Por ejemplo, la Figura 2 muestra que hacia finales del periodo de riego, cuando las variaciones en las cantidades de agua a aplicar fueron más moderadas, las evoluciones del ratio $MCD1.25/MCDcontrol$ fue más estable. Nuestros resultados también aconsejan aumentar el número de sensores a utilizar en el futuro para contrarrestar la importante variabilidad observada. Sin embargo, este hecho implica una mayor inversión económica para el agricultor.

La estrategia de riego aquí ensayada, permite realizar una programación basada en el MCD

relativo cuando no se tiene una ecuación de referencia previamente establecida. Disponer de unos árboles de referencia bien regados en la misma parcela, puede llevarse a cabo sin sectorizarla, por ejemplo instalando emisores de mayor caudal en aquellos árboles que van a emplearse como referencia. En este sentido, habrá que cuidar la elección de los árboles de referencia, asegurando que reciban una dosis óptima de riego, pero no excesiva, evitando pues situaciones de anoxia y de excesivo lavado de nutrientes.

Manejo del riego con base en los sensores Watermak

En el tratamiento WMK se aplicaron dosis de riego deficitarias variables para intentar mantener la tensión del suelo entre -30 kPa y -40 kPa. Debido a que los sensores no respondieron de forma clara a los ciclos de secado y humedecimiento (Figura 3), esto no fue posible. Probablemente, en este tipo de suelo y con la alta frecuencia de riego utilizada (hasta seis días a la semana, durante los meses de julio y agosto) no hubo un secado tal que fuera detectado por el sensor, pues éste tiene una respuesta lenta (Thompson *et al.* 2006) y poca sensibilidad en el rango húmedo ($\Psi_{suelo} > -10\ kPa$; Bausch y Bernard, 1996). Estos resultados plantean dudas acerca de la utilidad de dichos sensores para la programación del riego, en particular con riegos de alta frecuencia.

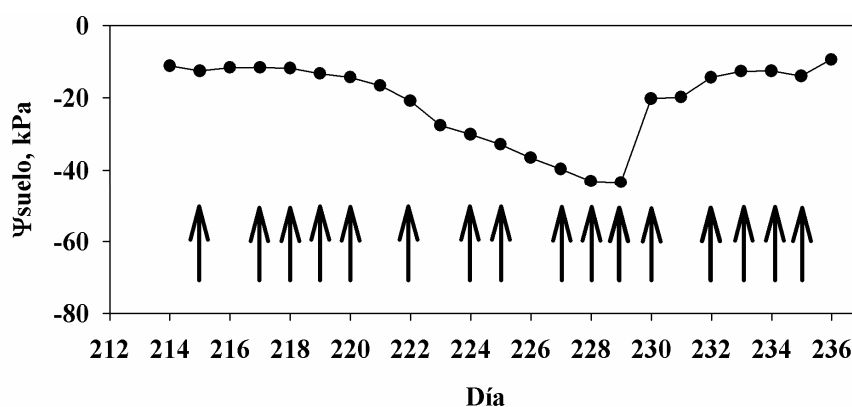


Figura 3. Detalle de la evolución diaria del Ψ_{suelo} en el tratamiento WMK del 2 al 24 de agosto de 2003. Los valores mostrados son los tomados al medio día y las flechas indican los días que se regó

Relaciones Hídricas

Durante el periodo de restricciones hídricas la humedad volumétrica media (θ_v) en el tratamiento control fue del 25.1 % cercana a la capacidad de campo (27 %), mientras que los tratamientos

MCD1.25, WMK y RDfijo tuvieron una θ_v media de 18.0, 18.6 y 19.3 % respectivamente, por encima del valor umbral cercano a 15 % encontrado por Ginestar (1995) en este mismo huerto. Así pues, los árboles de los tratamientos deficitarios MCD1.25, WMK y RDfijo, agotaron en

promedio el 75, 70 y 64 % de la reserva del suelo respectivamente, que se recuperaba con las lluvias. No obstante, estos valores son solo aproximados dada la alta variabilidad observada en nuestras medidas de humedad del suelo y por ello su relativamente baja precisión.

Aunque los Watermak no respondieron bien a los ciclos de secado y humedecimiento se observa que el Ψ_{suelo} del tratamiento control se mantuvo durante todo el ensayo con valores entre -10 y -20 kPa, mientras que en los tratamientos con restricciones el Ψ_{suelo} tuvo una tendencia a disminuir (Figura 4a).

Con la imposición del déficit hídrico el Ψ_a y Ψ_t , tal como era esperable, tendieron a disminuir (Figura 4b y 4c). En el RD fijo, al que se le aplicó la menor lámina (131 mm/periodo), se observaron los valores mínimos tanto de Ψ_a (-1.04 MPa) como de Ψ_t (-2.03 MPa), después de 29 días de iniciarse el recorte de agua (día 225). Los tratamientos MCD1.25 y WMK, con láminas de 184 y 188 mm/periodo, respectivamente, tuvieron valores similares de Ψ_a en torno a -0.50 a -0.84 MPa y entre -0.78 y -1.78 MPa de Ψ_t , mientras que en el tratamiento control, el Ψ_a osciló entre -0.56 y -0.73 MPa y el Ψ_t entre -0.75 y -1.70 MPa a lo largo de la estación. En la evolución de ambos indicadores de potencial se aprecia también la influencia de la lluvia, ya que en el día 250 cuando la precipitación fue de 32 mm los valores de a y t de todos los tratamientos prácticamente se igualaron. Cabe destacar que los valores mínimos alcanzados de Ψ_a , incluso en el tratamiento de mayor res-

tricción, son mayores al umbral propuesto durante este periodo (-1.2 MPa), a partir del cual el crecimiento del fruto puede ser irreversiblemente afectado (González-Altozano y Castel 2003).

La MCD está relacionada con el uso de reservas hídricas del tronco y, por tanto, teóricamente debe ser mayor en los árboles con riego deficitario (Huguet *et al.*, 1992). Los valores de MCD en los tratamientos MCD1.25 y RDfijo (Figura 4d), fueron claramente superiores a los del control, entre los días 210 y 240 cuando hubo mayores diferencias en Ψ_a y Ψ_t . De hecho, antes del comienzo de las restricciones y después la lluvia del día 250 cuando todos los tratamientos tenían valores similares de Ψ_a y Ψ_t , la MCD, en los tratamiento con restricciones, era igual o incluso menor que la del control.

Producción y Calidad

En el tratamiento MCD1.25 la producción, su distribución por calibres y la calidad de fruta no difirieron significativamente ($p < 0.05$) del control a pesar del importante ahorro de agua obtenido (Tabla 2). Esto posiblemente, se debe a que el periodo en el que se impuso el déficit, es relativamente poco sensible al estrés hídrico (González-Altozano y Castel 2003). Además, en este tratamiento, al medir en continuo el estado hídrico de la planta se evitó que el déficit hídrico experimentado sobrepasara el umbral de -1.2 MPa, a partir del cual el crecimiento del fruto puede ser irreversiblemente afectado (González-Altozano y Castel 2003) y por ello que repercutiera negativamente sobre la producción.

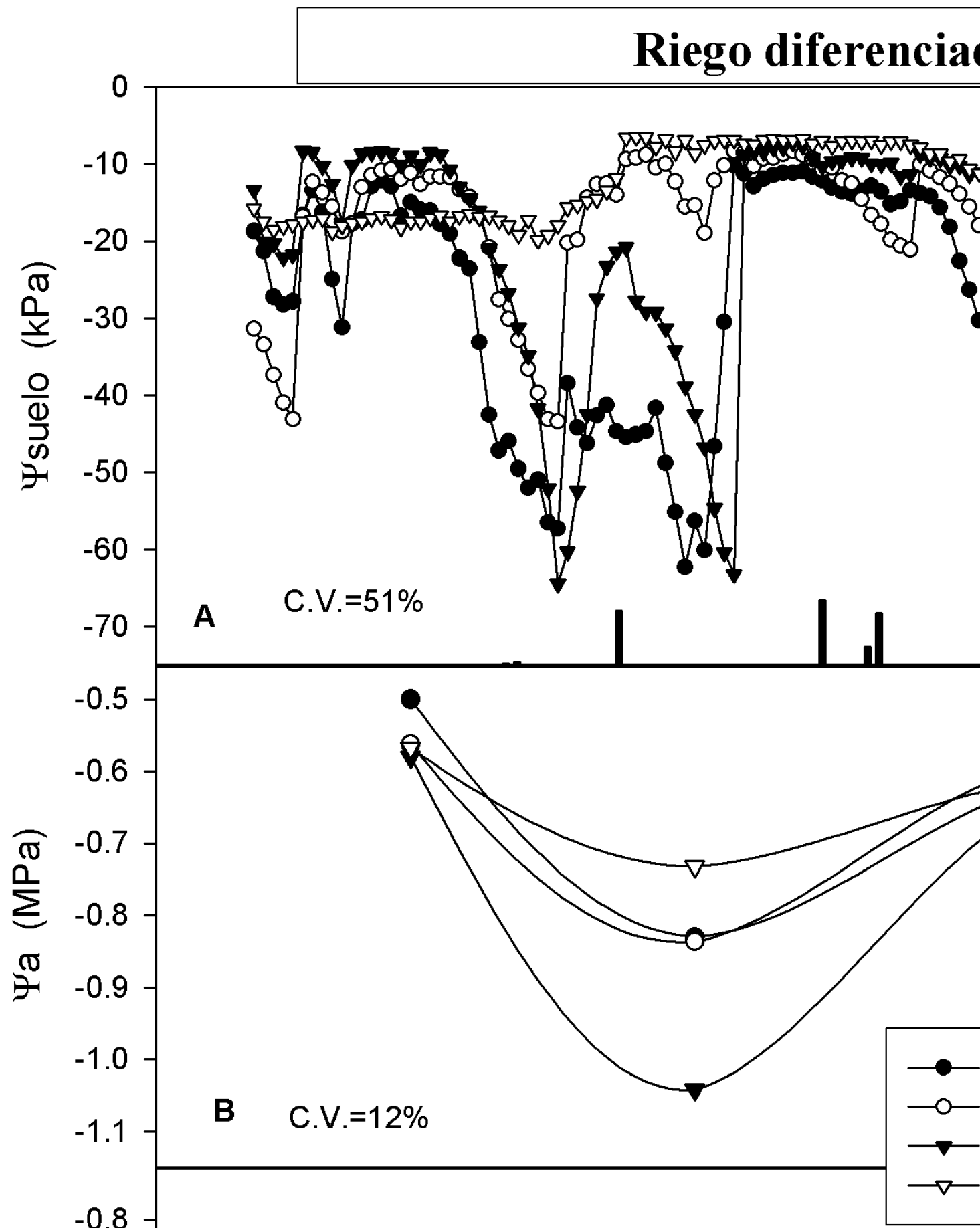


Figura 4. Evolución de los indicadores del estado hídrico del suelo y de la planta en los distintos tratamientos de riego: a) Potencial matricial del suelo (Ψ_{suelo}) los valores mostrados son los tomados a medio día, b) Potencial hídrico de hoja medido al alba (Ψ_a), c) Potencial hídrico de tallo medido a mediodía (Ψ_{tallo}), d) Máxima contracción diaria (MCD). C.V. es el coeficiente de variación medio de cada indicador. En A se incluyen también las lluvias ocurridas durante el periodo experimental

Parámetro	Tratamientos				
	MCD1.25	WMK	RD fijo	Control	Prob
Producción kg/árbol	103.6	101.6	100.4	95.2	0.509
Peso medio fruto, g	93.7	96.2	91.7	98.8	0.063
Número frutos/árbol	1103	1080	1150	968	0.339
Sólidos solubles totales, °Brix	12.8	13.4	13.1	12.8	0.088
Acidez, g/l	8.75	9.05	9.42	7.96	0.082
Índice Madurez	14.7	14.9	13.9	16.1	0.098
Espesor corteza, mm	2.24	2.20	2.21	2.16	0.824
% Zumo	39.6	41.1	38.6	38.7	0.302
% Pulpa	36.5	34.6	36.4	38.0	0.356
% Corteza	23.1	23.5	23.3	22.5	0.291
% Calibre 1 (<39g)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.684
% Calibre 2 (39-58g)	2.8	2.4	3.9*	1.7	0.019
% Calibre 3 (58-85g)	26.1	22.9	28.7	19.6	0.213
% Calibre 4 (85-105g)	33.3	32.08	32.2	32.1	0.921
% Calibre 5 (105-124g)	21.9	23.8	19.8	25.4	0.378
% Calibre 6 (124-160g)	12.5	15.9	12.2	17.5	0.063
% Calibre 7 (160-184g)	2.1	2.1	2.2	2.5	0.691
% Calibre 8 (>184g)	1.0	0.7	0.8	1.0	0.025

Tabla 2. Parámetros de producción y calidad de la fruta en los tratamientos MCD1.25, WMK, RDfijo y Control. En la columna Prob se incluye el nivel de significación estadística del efecto de los tratamientos a partir del ANOVA. El asterisco indica diferencias estadísticamente significativas frente al tratamiento control basado en test de Dunnett a $P < 0.05$

En almendro Goldhamer y Fereres (2004) habían demostrado previamente que era posible obtener ahorros de agua entorno a un 10 % mediante una estrategia de riego basada en la medida en continuo de los dendrómetros. Sin embargo, su estudio no incluía un tratamiento de riego deficitario tradicional, que pudiera confirmar la eficacia de la medida en continuo del estado hídrico de los árboles para programar el riego.

En nuestro estudio en el tratamiento RDfijo, al que se le aplicó una dosis de agua incluso, algo menor que la del MCD1.25, la producción final tampoco difirió significativamente ($p < 0.05$) del control. Únicamente en este tratamiento, se detectó un ligero aumento de frutas de calibre 2 (39 a 58 g) con respecto al tratamiento control (Tabla 2). Así pues, nuestros resultados muestran que es posible programar el riego en base a los dendrómetros, sin embargo no se han encontrado ventajas adicionales frente a una estrategia de riego deficitario tradicional.

CONCLUSIONES

Nuestro estudio representa el primer intento, hasta ahora publicado, de programar el riego en base a la MCD relativa a un tratamiento control. Los resultados muestran que es posible automatizar la programación del riego con base en este parámetro, pero habrá que mejorar los algoritmos que relacionan la cantidad de agua a aplicar en función de la señal medida con los dendrómetros para intentar que la evolución de la MCD relativa al control sea más estable y cercana al umbral prefijado. En cambio, no fue posible programar el riego en base a la información derivada de los Watermark ya que estos no respondieron a los ciclos de secado. La programación del riego basada en los dendrómetros dio resultados similares al tratamiento con riego deficitario fijo, consiguiéndose ahorros de agua cercanos al 30 % frente al tratamiento control.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por

CICYT, proyecto AGL2000-0387-C05-03. Los autores quieren agradecer a F. Galindo la ayuda prestada en las determinaciones de campo y al Servicio de Tecnología del Riego por los datos agroclimáticos facilitados. Se agradecen también los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos.

REFERENCIAS

- Allen, R., (2000). Calibration for the watermark 200ss soil water potential sensor to fit the 7-19-96 "calibration #3" table from Irrometer. Univ. Idaho, Kimberley, Idaho.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage, Paper 56. FAO, Rome.
- Bausch, W. y Bernard, T.M., (1996). Validity of the watermark sensor as a soil moisture measuring device. En: Camp, C.R., Sadler, E.J. y Voder, R.E. (eds.), *Evapotranspiration and irrigation scheduling*, Proceedings of the International Conference, pp 933–1108, American Society of Agricultural Engineering.
- Behboudian, M.H. y Mills, T.M., (1997). Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews*, 21, 125–131.
- Castel, J.R., (2001). Determinación de la evapotranspiración de cítricos mediante lisimetría de pesada. *Riegos y Drenajes XXI*, 56, 9–14.
- Cohen, M., Goldhamer, D.A., Fereres, E., Girona, J. y 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.
- Fao. (2003). *Agricultura 21; Enfoques; Revista gestión moderna del riego*; Departamento de Agricultura. FAO, Roma.
- Fereres, E. y Goldhamer, D.A., (1990). Deciduous fruit and nut trees. En: Stewart B.A. y Nielsen, D.R. (eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*, A.S.A. Madison, Wis. Mon., n°30. pp. 987–1017.
- Ginestar, C., (1995). Efectos del estrés hídrico en distintos periodos fenológicos en plantaciones de cítricos jóvenes regadas por goteo. Universidad Politécnica Valencia, Tesis Doctoral.
- Goldhamer, D.A. y Fereres, E., (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20, 15–125.
- Goldhamer, D.A. y Fereres, E., (2004). Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 23, 11–19.
- González-Altozano, P. y Castel, J.R., (2003). Riego deficitario controlado en "clementina de nules". I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 1, 81–92.
- Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y. y 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. y Castel, J.R., (2004). continuous measurement of plant and soil water status in plum. *Irrigation Science*, 23, 93–102.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R., (2006). Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator of plum trees. *Tree Physiology*, 26, 303–311.
- Leib, B.G., Jabro, J.D. y Matthews, G.R., (2003). Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Science*, 168, 396–408.
- Moriana, A. y Fereres, E., (2004). Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae*, 664, 407–412.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruíz-Sánchez, M.C., Alarcón, J. y Torrecillas, A., (2006). Stem and leaf water potential, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees: structure and functioning*, 20, 1–8.
- Sas Institute (1994). *Sas/Stat User's Guide*. Sas Inst. Inc., Cary, N.C., USA.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Agüere, T., Valdez, L.C. y Fernández, M.D., (2006). Evaluation of the watermark sensors for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science*, 24, 185–202.