



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO Y SALINIDAD DEL SUELO: EFECTOS SOBRE EL MELOCOTÓN TARDÍO DE CALANDA

Autora

Eva T. Medina Pueyo

Directores

Dr. Ramón Aragüés Lafarga

Dr. Joaquín Aibar Lete

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL
Escuela Politécnica Superior de Huesca
Noviembre 2014

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas las personas que de un modo u otro han hecho posible la realización de este trabajo, y en particular:

Al Dr. Ramón Aragüés Lafarga, por su perfecta dirección y su profesionalidad, pero principalmente por todo lo que aprendo día a día, el trato cercano y la complicidad que siempre hemos tenido y por confiar en mi trabajo y mis capacidades haciendo que cada día me valore más a mi misma como profesional.

Al Dr. Joaquin Aibar Lete, por su tiempo, sus consejos y correcciones como codirector de este Trabajo Fin de Grado.

A los Dres. Jose María Faci González y Antonio Martínez Cob, por todo lo que me enseñaron, su cercanía y por la ayuda desinteresada que siempre me brindaron.

A Ramón, Jose y Antonio, quisiera decirlos que sois mi referente a seguir y un pilar fundamental en mi evolución tanto a nivel profesional como personal. Sois los “padres adoptivos” que me visteis nacer en este mundo de la investigación y sin vosotros me sentiré un poco “huérfana”. Os recuerdo con cariño y os tengo siempre presentes. Gracias.

A José Luis Espada y Antonio Rabinad, gestor y encargado de la finca experimental AFFRUCAS, por poner a nuestra disposición sus instalaciones y estar siempre abiertos y disponibles ante cualquier petición de ayuda, consulta o sugerencia.

A todos los miembros del grupo de investigación “Riego, Agronomía y Medioambiente”, especialmente (1) a Nacho Clavería y Wided Zribi, por la ayuda prestada pero sobre todo por su amistad, (2) al personal de campo Miguel, Jesús, Juanma y Ricardo, parte fundamental del grupo y sin cuya colaboración sería imposible hacer este tipo de trabajos (3) a Marisa, Tere y Lola, personal de laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos, por el increíble trabajo de análisis llevado a cabo, (4) a Luis, Olga, Mónica, Kosana y a todo aquel que ha colaborado en el desarrollo del proyecto.

Al Departamento de Suelos y Riegos y al Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), por darme la oportunidad de realizar este Trabajo Fin de Grado y trabajar en un sitio en el que me siento plenamente realizada y feliz con lo que hago.

Al Programa Consolider-Ingenio por la financiación del proyecto RIDECO CSD2006-00067 (Programa Integral de Ahorro y Mejora Productiva del Agua de Riego en la Horticultura Española) dentro de cuyas actividades se ha realizado este Trabajo Fin de Grado.

A mis amigas, porque a pesar de no entender muy bien de qué va el proyecto y preguntarme infinitas veces cuando acabo han sabido apoyarme cuando estaba ausente y comprender que necesitaba mi tiempo.

Por último pero más importante a Kike, a mis padres y mis hermanos. Sois mi razón de ser y sin vosotros nada tendría sentido. A mi sobrina Leyre, porque solo con verla sonreír es suficiente para que todo vaya mejor. Gracias por vuestro apoyo y vuestros continuos ánimos.

RESUMEN

El riego deficitario en frutales es una práctica de creciente implantación dado que permite ahorrar agua, controlar el crecimiento vegetativo del árbol y aumentar la productividad. Sin embargo, esta estrategia puede producir problemas de salinización y sodificación del suelo, especialmente en zonas áridas o semiáridas regadas con aguas de baja calidad.

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado son analizar la respuesta a tres tratamientos de riego (1) de la salinidad y sodicidad del suelo y (2) del vigor y producción de una plantación de melocotonero tardío (D. O. Calanda) regada por goteo con aguas de salinidad moderada en Caspe (Zaragoza).

Los tratamientos de riego fueron: "Control" (riego al 100% de la evapotranspiración del melocotonero, ET_c), "Riego Deficitario Sostenido" (RDS, riego al 62.5% de la ET_c durante toda la estación de riego) y "Riego Deficitario Controlado" (RDC, riego al 100% de la ET_c en toda la estación de riego excepto en la fase II de endurecimiento del hueso regada al 50% de la ET_c).

El ahorro de agua de riego respecto al Control fue muy importante (42%) en el RDS y escaso (9%) en el RDC debido a la corta duración de la fase II de este melocotonero tardío.

Al principio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011 se tomaron muestras de suelo (0-60 cm de profundidad) sobre las que se analizó la humedad gravimétrica (HG) y la salinidad (conductividad eléctrica, C_{Ee}; cloruro, Cl_e; sodio, Na_e) y sodicidad (relación de adsorción de sodio, RAS_e) en el extracto saturado del suelo.

La HG al principio y final de la estación de riego fue similar ($p > 0.05$) en el Control y RDC, pero disminuyó un 13% ($p < 0.05$) en el RDS debido a que el suministro insuficiente de riego provocó la extracción de agua del suelo por el melocotonero.

Los valores de C_{Ee}, Cl_e, Na_e y RAS_e al principio y final de la estación de riego fueron similares ($p > 0.05$) en los tratamientos Control y RDC, pero aumentaron ($p < 0.05$) el 54% (C_{Ee}), 91% (Cl_e), 64% (Na_e) y 47% (RAS_e) en el tratamiento RDS debido al insuficiente suministro de agua que provocó la

reducción de la fracción de lavado (FL), el incremento del déficit hídrico (DH) y el consiguiente aumento de la evapo-concentración de las sales aportadas por el riego. La variación porcentual diaria de la CEe estuvo correlacionada ($p < 0.01$) con la FL (negativamente) y el DH (positivamente), por lo que ambos parámetros permiten aproximar (para situaciones similares a las de este trabajo) los niveles máximos de riego deficitario compatibles con valores adecuados de salinidad del suelo.

La respuesta vegetativa (sección de tronco) y productiva (producción, peso medio de fruto, número de frutos, precocidad y productividad) del melocotonero no se vio afectada ($p > 0.05$) por los tratamientos de riego. Por lo tanto, el RDS ahorró un volumen de riego del 42% y aumentó un 67% la eficiencia en el uso del agua sin afectar negativamente a la respuesta del melocotonero. Sin embargo, este riego deficitario disminuyó la humedad y aumentó la salinidad y sodicidad del suelo a lo largo de la estación de riego.

Aunque estos resultados deben validarse con estudios de mayor duración, cabe concluir que en zonas áridas o semiáridas caracterizadas por bajas precipitaciones, elevadas evapotranspiraciones y aguas de riego de baja calidad, la sostenibilidad de los riegos deficitarios severos no está garantizada y los mismos deben aplicarse con precaución y con un seguimiento detallado de la salinidad y sodicidad en la zona de raíces de los cultivos.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN, REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y OBJETIVOS	1
1.1 EI PROYECTO 'RIDECO – CONSOLIDER'	2
1.2 EL CULTIVO DEL MELOCOTONERO	3
1.3 ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO	7
1.4 RIEGO DEFICITARIO Y SALINIDAD EDÁFICA	9
1.5 OBJETIVOS	13
2. MATERIAL Y MÉTODOS	14
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	15
2.1.1 Ubicación del ensayo	15
2.1.2 Diseño experimental	16
2.2 METEOROLOGÍA	17
2.3 RIEGO	18
2.3.1 Volumen de riego	18
2.3.2 Calidad de agua de riego	19
2.4 FRACCIÓN DE LAVADO Y DÉFICIT HÍDRICO	20
2.5 SUELO	21
2.5.1 Muestreo de suelo	21
2.5.2 Análisis del suelo	22
2.6 MELOCOTONERO	23
2.6.1 Fenología	23
2.6.2 PAR interceptado	23
2.6.3 Evapotranspiración	25
2.6.4 Sección de tronco	26
2.6.5 Frutos: producción, precocidad, productividad, eficiencia del uso del agua	26

2.6.6	Análisis iónico foliar.....	27
2.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	28
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
3.1	METEOROLOGÍA.....	30
3.2	RIEGO.....	32
3.2.1	Volumen de riego	32
3.2.2	Calidad de agua de riego	34
3.3	FRACCIÓN DE LAVADO Y DÉFICIT HÍDRICO	35
3.4	SUELO.....	37
3.4.1	Humedad gravimétrica (HG)	37
3.4.2	Salinidad	42
3.4.3	Relación salinidad (CEe) - humedad gravimétrica (HG).....	53
3.4.4	Relación salinidad (CEe) – fracción de lavado (FL) – déficit hídrico (DH)	54
3.5	ÁRBOL.....	59
3.5.1	Fenología	59
3.5.2	PAR interceptado	60
3.5.3	Evapotranspiración del cultivo.....	61
3.5.4	Sección de tronco	63
3.5.5	Frutos: producción, precocidad, productividad, eficiencia del uso del agua	64
3.5.6	Análisis iónico foliar.....	68
3.5.7	Efecto de la salinidad del suelo sobre la producción, precocidad, productividad, eficiencia del uso del agua y concentración iónica foliar	69
4.	CONCLUSIONES.....	73
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores meteorológicos mensuales del año 2011 y del año medio (2004-2013) registrados en la estación meteorológica de Caspe (Red SIAR): precipitación (P), temperatura media (T^a), humedad relativa media (HR), velocidad media del viento a 2.0 m del suelo (VV) y evapotranspiración de referencia (ET _o).	31
Tabla 3.2. Volumen de riego aplicado en el año 2011 en los tratamientos T1, T2 y T3 durante las fases de crecimiento del melocotonero F1, F2 y F3 y riego total aplicado en las tres fases.	32
Tabla 3.3. Valores mensuales, totales anuales (Total) y totales entre las fechas de muestreo del suelo inicial (4 de abril) y final (9 de septiembre) (Total-fm) del riego (R en los tratamientos T1, T2 y T3), precipitación (P) y evapotranspiración del melocotonero (ET _c) en el año 2011. Se presentan asimismo los valores de fracción de lavado (FL) y déficit hídrico (DH) en cada tratamiento de riego.....	35
Tabla 3.4. Humedad gravimétrica media del suelo (HG) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en cada repetición (Bloque) en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. Para la media de las cinco repeticiones se presentan también el número de muestras (N), la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV). No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre fechas de muestreo dentro de cada bloque o su media, ni entre bloques o su media dentro de cada fecha de muestreo.....	38
Tabla 3.5. Humedad gravimétrica media (HG) del suelo medida en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada tratamiento y posición de muestreo, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).....	39
Tabla 3.6. Porcentajes de variación relativa de la humedad gravimétrica (HG) entre abril y septiembre de 2011 [(HG sep–HG abr)/HG abr] en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G), 25 cm (posición M) y 0 + 25 cm del gotero.....	40
Tabla 3.7. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CE _e) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en cada repetición (Bloque) en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. Para la media de las cinco repeticiones se	

presentan también el número de muestras (N), la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV). Para cada bloque, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre bloques dentro de cada fecha de muestreo. 42

Tabla 3.8. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CEe) medida en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada tratamiento y posición de muestreo, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). 44

Tabla 3.9. Porcentajes de variación relativa de la CEe entre abril y septiembre de 2011 $[(CEe \text{ sep} - CEe \text{ abr}) / CEe \text{ abr}]$ en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G), 25 cm (posición M) y 0 + 25 cm del gotero. 45

Tabla 3.10. Concentración media en el extracto saturado del suelo del cloruro (Cle), sodio (Nae) y relación de adsorción de sodio (RASe) de las muestras de suelo recogidas en los tres tratamientos de riego a 0 cm (posición G) y 25 cm del gotero (posición M) al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada parámetro analítico, fechas de muestreo con distinta letra tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). 48

Tabla 3.11. Concentración media en el extracto saturado del suelo del cloruro (Cle), sodio (Nae) y relación de adsorción de sodio (RASe) medida en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada parámetro analítico, tratamiento y posición de muestreo, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada parámetro analítico, fecha y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). 49

Tabla 3.12. Porcentajes de variación relativa de Cle, Nae y RASe entre abril y septiembre $[(Y \text{ sep} - Y \text{ abr}) / Y \text{ abr}]$ en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) y para la media de los tres tratamientos a 0 cm (posición G), 25 cm (posición M) y 0+25 cm del gotero. 50

Tabla 3.13. Valores medios de CEe en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) medidos en cada fecha de muestreo inicial y final de la estación de no riego (ENR) 2010-2011, estación de riego (ER) 2011 y estación de no riego (ENR) 2011-2012. Los valores de riego (R), precipitación (P), evapotranspiración (ETc), fracción de lavado (FL) y déficit hídrico (DH) se han calculado para los períodos entre fechas de muestreo. Se presentan asimismo los días acumulados entre fechas de muestreo. Para cada tratamiento de riego, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias de CEe significativamente diferentes ($p < 0.05$) con respecto al muestreo anterior. Para cada fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias de CEe significativamente diferentes ($p < 0.05$).....	55
Tabla 3.14. Fechas de los principales estados fenológicos en el melocotonero en el año 2011.....	59
Tabla 3.15. Valores medios mensuales del coeficiente de cultivo (K_c) y valores totales mensuales y anuales de la evapotranspiración de referencia (ETo) y de la evapotranspiración del melocotonero (ETc) en el año 2011.....	62
Tabla 3.16. Sección media del tronco inicial (Si) y final (Sf), y crecimiento relativo del tronco (C.Rel) en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. N = número de árboles. Para cada variable analizada, no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).....	63
Tabla 3.17. Sección media del tronco inicial (Si) y final (Sf) y crecimiento relativo del tronco (C.Rel) en cada repetición (Bloque) en el año 2011. N = número de árboles. Para cada variable analizada, no hay diferencias significativas entre bloques ($p > 0.05$).....	64
Tabla 3.18. Valores medios de producción, peso medio de fruto y número de frutos en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. N = número de árboles, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada variable analizada, no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).	65
Tabla 3.19. Valores medios de producción, peso medio de fruto y número de frutos en cada repetición (Bloque) en el año 2011. N = número de árboles, DE= desviación estándar, CV= coeficiente de variación. No hay diferencias significativas entre bloques en ninguna de las variables analizadas ($p > 0.05$). 65	65
Tabla 3.20. Concentraciones medias de Na y Cl en hoja medidas en los árboles control (N) de cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. Para cada tratamiento e ion analizado, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen concentraciones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha e ion analizado, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen concentraciones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación de la finca experimental AFFRUCAS en Caspe, Zaragoza.	15
Figura 2.2. Vista general de una línea de árboles en la finca AFFRUCAS en Caspe, Zaragoza.	16
Figura 2.3. Esquema general del ensayo en la finca AFFRUCAS en Caspe, Zaragoza. T1, T2 y T3 son los tratamientos de riego. Fase 1: inicio de riego a inicio de endurecimiento de hueso; Fase 2: endurecimiento del hueso; Fase 3: fin de endurecimiento de hueso a fin de riego.	17
Figura 2.4. Contadores volumétricos instalados en una línea de árboles para la medida del riego aplicado en las dos líneas portagoteros de los tratamientos de riego T1, T2 y T3.	18
Figura 2.5. Esquema del muestreo de suelo para el estudio de la salinidad. ...	21
Figura 2.6. Fotografías del muestreo inicial y final del suelo para el estudio de la salinidad.	22
Figura 2.7. Fotografías de la evolución del estado fenológico del melocotonero según escala Baggiolini: A) Plena floración; B) Caída de pétalos; C) Cuajado de fruto; D) Inicio de endurecimiento de hueso; E) Crecimiento de fruto; F) Embolsado.	24
Figura 2.8. (A) Ceptómetro y (B) esquema de las medidas de PAR interceptado en un árbol.	25
Figura 2.9. Medida del perímetro de tronco con cinta métrica.	26
Figura 2.10. Cosecha del melocotón en la finca AFFRUCAS.	27
Figura 3.1. Distribución de la precipitación mensual en el año 2011 y en el año medio (2004-2013) en la estación meteorológica de Caspe (Red SIAR). .	31
Figura 3.2. Valores mensuales del volumen de agua aplicada durante la estación de riego del año 2011 en los tratamientos de riego T1, T2 y T3.	33
Figura 3.3. Evolución de la CE del agua de riego a lo largo de la estación de riego del año 2011.	34
Figura 3.4. Evolución en el año 2011 de la fracción de lavado (FL) y del déficit hídrico (DH) en los tratamientos de riego T1, T2 y T3. El recuadro azul indica el periodo entre los muestreos inicial y final del suelo.	36
Figura 3.5. Humedad gravimétrica media (HG) de las dos fechas de muestreo (abril + septiembre) del año 2011 medida a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en los tratamientos de riego T1, T2 y T3. Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, posiciones de muestreo con distinta letra minúscula tienen	

medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$)..... 41

Figura 3.6. Humedad gravimétrica media (HG) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en abril y septiembre de 2011 en los tratamientos de riego T1, T2 y T3. Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). 41

Figura 3.7. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CEe) de las dos fechas de muestreo (abril + septiembre) del año 2011 medida a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, posiciones de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$)..... 45

Figura 3.9. Concentración media en el extracto saturado del suelo de (a) Cle (b) Nae y (c) RASe de las dos fechas de muestreo (abril + septiembre) del año 2011 medida a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada parámetro analítico y tratamiento, posiciones de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada parámetro analítico y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). 51

Figura 3.10. Concentración media en el extracto saturado del suelo de (a) Cle (b) Nae y (c) RASe de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en abril y septiembre de 2011 en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada parámetro analítico y tratamiento, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada parámetro analítico y fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$)..... 52

Figura 3.11. Regresiones lineales normales y forzadas por el origen de (a) Cle vs. Nae, (b) CEe vs. Cle, (c) CEe vs. Nae y (d) CEe vs. RASe para todas las muestras de suelo recogidas en el año 2011..... 53

Figura 3.12. Regresión potencial de HG vs. CEe para el conjunto de todas las muestras de suelo recogidas en 2011.	54
Figura 3.13. Conductividad eléctrica media (0 + 25 cm de distancia al gotero) del extracto saturado del suelo (CEe) medida en los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en cada una de las cuatro fechas de muestreo, y fracción de lavado calculada entre fechas de muestreo. Se presentan asimismo las variaciones relativas de CEe en abril 2011 respecto a septiembre 2010, septiembre 2011 respecto a abril 2011, y febrero 2012 respecto a septiembre 2011.	56
Figura 3.14. Conductividad eléctrica media (0 + 25 cm de distancia al gotero) del extracto saturado de suelo (CEe) medida en los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en cada una de las cuatro fechas de muestreo, y déficit hídrico calculado entre fechas de muestreo. Se presentan asimismo las variaciones relativas de CEe en abril 2011 respecto a septiembre 2010, septiembre 2011 respecto a abril 2011, y febrero 2012 respecto a septiembre 2011.	57
Figura 3.15. Regresiones lineales de la variación porcentual diaria de la CEe media (0 + 25 cm de distancia al gotero) (Δ CEe) con (a) la fracción de lavado (FL) y (b) el déficit hídrico (DH) del conjunto de valores de la estación de riego (ER) y de no riego (ENR) para los tratamientos de riego T1, T2 y T3.	58
Figura 3.16. Evolución del PAR interceptado por el cultivo (IPAR) a lo largo de la estación de riego del año 2011.	60
Figura 3.17. Evolución diaria de la evapotranspiración de referencia (ET _o) y de la evapotranspiración del melocotonero (ET _c) en el año 2011.	62
Figura 3.18. (a) precocidad, (b) productividad y (c) eficiencia del uso de agua de riego (EUAR) medidos en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. Tratamientos con distinta letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).	66
Figura 3.19. Relación del vigor con (a) la producción y (b) la productividad en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011.	67
Figura 3.20. Relación entre la producción del melocotonero y la CEe media (abril y septiembre a 0 y 25 cm de distancia al gotero) medida en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011.	69
Figura 3.21. Relación entre la (a) precocidad, (b) productividad y (c) eficiencia del uso de agua de riego (EUAR), y la CEe media (abril y septiembre a 0 y 25 cm de distancia al gotero) medida en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011.	70

Figura 3.22. Relaciones entre la productividad y las concentraciones foliares de (a) Na y (b) Cl medidas en septiembre del año 2011 en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3..... 71

Figura 3.23. Relaciones de (a) la producción y (b) la productividad relativa con la CEE media (abril y septiembre a 0 y 25 cm de distancia al gotero) medidas en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011. Las funciones FAO de respuesta del melocotonero a la salinidad en suelos con y sin yeso se representan a efectos comparativos..... 72

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

CE	Conductividad eléctrica del agua de riego, dS/m.
CEe	Conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo, dS/m.
CC	Humedad a capacidad de campo, %.
Cle	Concentración de cloruro en el extracto saturado del suelo, meq/l.
C.Rel	Crecimiento relativo anual de la sección de tronco.
CV	Coeficiente de variación, %.
DE	Desviación estándar.
DH	Déficit hídrico, mm.
E	Evaporación, mm.
ENR	Estación de no riego.
ER	Estación de riego.
ET	Evapotranspiración, mm.
ETc	Evapotranspiración del cultivo, mm.
ETo	Evapotranspiración de referencia, mm/día.
EUAR	Eficiencia de uso del agua de riego, g/mm.
FL	Fracción de lavado.
G	Posición de muestreo del suelo junto al gotero, a 0 cm del gotero.
HG	Humedad gravimétrica del suelo, %.
HR	Humedad relativa media del aire, %.
IPAR	Radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo.
Kc	Coeficiente de cultivo.
M	Posición de muestreo del suelo en el medio, a 25 cm del gotero.
N	Número de muestras.
Nae	Concentración de sodio en el extracto saturado del suelo, meq/l.
P	Precipitación, mm.

PS	Porcentaje de saturación del suelo, %.
R	Riego, mm.
RAS _e	Relación de adsorción de sodio del extracto saturado del suelo, (mmol/l) ^{0.5} .
RD	Riego deficitario.
RDC	Riego deficitario controlado.
RDS	Riego deficitario sostenido.
S _i	Sección inicial de tronco, cm ² .
S _f	Sección final de tronco, cm ² .
SPR	Secado parcial de raíces.
T ^a	Temperatura media del aire, °C.
T1	Tratamiento de riego 1, Control.
T2	Tratamiento de riego 2, RDS.
T3	Tratamiento de riego 3, RDC.
T _c	Transpiración del cultivo, mm.
VV	Velocidad del viento, m/s.

1. INTRODUCCIÓN, REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y OBJETIVOS

1.1 EL PROYECTO ‘RIDECO – CONSOLIDER’

Este Trabajo Fin de Grado se ha realizado en la Unidad de Suelos y Riegos del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) como parte de un proyecto nacional desarrollado entre los años 2007 y 2012 titulado “**Programa Integral de Ahorro y Mejora de la Productividad del Agua de Riego en la Horticultura Española (RIDECO)**” que fue financiado con el código CSD2006-00067 por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) dentro del programa CONSOLIDER.

El objetivo fundamental del proyecto RIDECO fue analizar las ventajas y limitaciones del riego deficitario controlado (RDC) como técnica capaz de reducir el consumo del agua de riego e incrementar su productividad (definida como la producción o su valor económico por unidad de agua consumida) en el sector hortofrutícola de España. Entre las limitaciones potenciales del RDC, el proyecto RIDECO estudió los problemas de salinización del suelo derivados de aplicaciones de agua insuficientes para el lavado de las sales acumuladas por evapo-concentración. En particular, la aplicación del RDC se enfocó a los cultivos leñosos más importantes en España como olivo, almendro, nogal, albaricoquero, ciruelo, melocotonero, peral, manzano, cítricos y viña.

El equipo de investigación de RIDECO, liderado por el doctor Dr. Elías Fereres (Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC), se compuso de cinco grupos pertenecientes al CITA-DGA y E.E. AULA DEL CSIC (Zaragoza), IRTA y UdL (Lérida), IVIA (Valencia), CEBAS-CSIC (Murcia) y UCO e IAS-CSIC (Córdoba). Estos grupos están localizados en las principales áreas hortofrutícolas de España (Valles del Ebro y Guadalquivir, y regiones de Valencia y Murcia). La información detallada de RIDECO y de los grupos citados puede consultarse en <http://www.rideco-consolider.es/>.

Los principales objetivos del proyecto RIDECO-CONSOLIDER fueron:

- El desarrollo de mejores técnicas de manejo en RDC para la mayoría de especies arbóreas y vides cultivadas en España.
- La determinación de la ET de plantaciones sometidas a condiciones de déficit hídrico y el ahorro neto de agua de riego derivado de la aplicación de técnicas de RDC.

- El diseño de programas para la aplicación del RDC y su correspondiente monitorización y necesidades de automatización.
- El análisis de la sostenibilidad del RDC evaluando la salinidad y otros riesgos asociados a las técnicas de RDC.
- La determinación de las vías para normalizar el uso de las técnicas de RDC en el manejo del riego.

Entre las actividades llevadas a cabo por el grupo de Zaragoza, el CITA realizó diferentes ensayos sobre cultivos de melocotonero, nectarina, cerezo y viñas de uva de mesa en la zona de Caspe (Zaragoza), estudiando la influencia de distintas estrategias de riego deficitario y tipos de acolchados sobre la salinidad edáfica, la evapotranspiración, aspectos agronómicos del cultivo y calidad de frutos.

El ensayo del que forma parte este Trabajo Fin de Grado se llevó a cabo entre los años 2008 y 2012 en la finca AFFRUCAS de Caspe en el Valle Medio del Ebro, donde se desarrollaron la gran mayoría de los ensayos del grupo RIDECO-Zaragoza. En este trabajo se presentan los resultados del ensayo del año 2011 relacionados con el análisis de la salinidad del suelo y la respuesta del melocotonero en una plantación sujeta a distintas estrategias de riego deficitario.

1.2 EL CULTIVO DEL MELOCOTONERO

El melocotonero (*Prunus persica* (L.) Batsch) es un frutal de hueso de la familia de las Rosáceas, de porte reducido, caducifolio y que puede alcanzar los 6 metros de altura. Es originario de China, país que representa más de la mitad de la producción mundial de melocotón. En España, el cultivo del melocotonero se extiende a un total de 51500 hectáreas con una producción total de unas 737500 toneladas, de las cuales aproximadamente el 75% se dedica a consumo en fresco. La producción de melocotón se concentra en el noreste de España con un 70% de la producción nacional repartida entre Aragón, Cataluña y Murcia, siendo Aragón la comunidad que mayor superficie dedica a este cultivo (13500 hectáreas) con una producción de unas 200500 toneladas de melocotón (MAGRAMA, 2012).

Según el momento de maduración y cosecha, el melocotonero se clasifica como temprano (cosecha en julio) o tardío cuyo ciclo se extiende hasta septiembre u octubre, como es el caso del Melocotón de Calanda. En el mercado se considera "Melocotón de Calanda" a los frutos comercializados con el sello del Consejo Regulador de la especie *Prunus pérsica* procedentes de la variedad población autóctona "Amarillo tardío" y sus clones seleccionados 'Jesca', 'Evaisa' y 'Calante', cultivados en la zona suroriental de la depresión del Ebro entre las provincias de Teruel y Zaragoza (BOA 2013). La variedad 'Calrico' empleada en este trabajo es un clon seleccionado de la población "Amarillo tardío".

La principal característica del Melocotón de Calanda es la técnica tradicional del embolsado individual de los frutos en el árbol, el cual se realiza manualmente entre los meses de junio y julio cuando el fruto aun esta verde. La bolsa de papel parafinado cubre el fruto hasta el momento de la cosecha y posterior manipulación protegiéndolo de tratamientos, caídas, plagas, insectos, etc. De esta manera el melocotón consigue el tamaño, aspecto y dulzor característico tan apreciado por los consumidores.

Más del 85% de la superficie de melocotón se cultiva bajo la técnica del riego por goteo dado que mejora la productividad de los árboles y aumenta la eficiencia del agua de riego. Para un correcto manejo del riego es necesario conocer el ciclo del cultivo y sus fases de crecimiento. Al igual que otras especies de frutales de hueso, el melocotonero presenta un patrón de crecimiento que sigue una doble curva sigmoidea que se caracteriza por dos etapas de rápido crecimiento (Fase I y III) separadas por una fase intermedia en la cual el crecimiento del fruto es más lento (Fase II):

- **Fase I:** Etapa de crecimiento exponencial. En este período, inmediatamente posterior a la floración, se produce la división celular y es crítico para el tamaño final del fruto. Cualquier estrés ambiental (calor, frío, deficiencias hídricas o de nutrientes) tiende a acortar esta fase y a afectar el tamaño final del fruto.
- **Fase II:** Endurecimiento de hueso. En esta etapa el fruto incrementa su tamaño lentamente, mientras el embrión se endurece, y por el contrario el crecimiento vegetativo del árbol es muy rápido.

- **Fase III:** Etapa de crecimiento rápido del mesocarpio, que produce un rápido incremento del tamaño y el peso del fruto.
- **Fase IV:** Maduración del fruto.

Atendiendo a estas fases, se pueden establecer periodos críticos en los que un déficit hídrico podría afectar de manera significativa a la producción y calidad de los frutos, en función de si la variedad es temprana o tardía. En general los periodos de mayor sensibilidad al déficit hídrico son el momento de crecimiento rápido del fruto (fases I y III) y los de menor sensibilidad la fase II de endurecimiento de hueso y en postcosecha (Chalmers *et al.*, 1981).

En variedades de ciclo corto, las fases I a III son muy rápidas y de corta duración y por tanto son muy sensibles a estrés hídrico; sin embargo, un déficit en postcosecha no tendría efectos perjudiciales. Abrisqueta *et al.* (2010) observaron en melocotonero temprano descensos del 35% en el crecimiento de la sección de tronco y del 50% en el peso de poda en un tratamiento de riego deficitario sostenido al 50% de la ETc (evapotranspiración del cultivo) durante todo el ciclo del cultivo en comparación con un tratamiento control, e importantes descensos del 42% y 55% en la producción y en el peso medio de fruto. Sin embargo, valores similares fueron obtenidos en un tratamiento de riego deficitario controlado al 100% de la ETc en la fase III y 25% en el resto de fases, indicando que aunque el déficit hídrico en postcosecha en variedades tempranas es una práctica ampliamente extendida, éste debe ser limitado si no se quiere afectar a la producción.

En variedades de ciclo largo como el melocotón de Calanda, la Fase II se considera óptima para aplicar un riego deficitario ya que el crecimiento del fruto es muy lento y no se ve afectado por el déficit hídrico, aunque no así el crecimiento vegetativo que durante este periodo es muy sensible a la falta de agua. Girona *et al.* (2003) obtuvieron mejoras significativas en diferentes parámetros productivos tras tres años de riego deficitario controlado (RDC) en la fase II de un cultivo de melocotón tardío en comparación con el tratamiento control, mientras que el número de flores y cuajado de frutos se vio disminuido cuando el déficit hídrico se aplicó en post cosecha. Goldhamer *et al.* (2002) obtuvieron descensos del 6-14% de la producción en distintas combinaciones

de RDC y SPR (secado parcial de raíces) aunque estos no fueron significativos en comparación con el tratamiento control.

Además de la variedad, otro factor muy importante a tener en cuenta es la elección del patrón que mejor se ajuste a las condiciones edáficas y sus limitaciones tales como un drenaje insuficiente, sequía o salinidad entre otros. El patrón GF-677 (híbrido de melocotonero x almendro) empleado en este ensayo es el más utilizado en las últimas décadas en la fruticultura Europea. Tiene una óptima afinidad con variedades de melocotón, nectarina, almendro y algunas variedades de ciruelo. Se adapta bien a suelos calizos, tolerando bien la clorosis férrica y tiene tolerancia media a la asfixia radicular y a la sequía; sin embargo es uno de más sensibles a nematodos y confiere un elevado vigor al árbol en ocasiones indeseado.

La salinidad del suelo es un importante estrés abiótico para la mayoría de los cultivos leñosos y para los frutales en particular (FAO, 1985). Una alta concentración de sales tiene como resultado un alto potencial osmótico de la solución del suelo, por lo que la planta tiene que utilizar más energía para absorber el agua, limitando su desarrollo y disminuyendo el rendimiento del cultivo. Maas y Hoffman (1977) clasificaron al melocotonero como sensible a la salinidad, estableciendo en base a la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo (CEe) un umbral de tolerancia de 1.7 dS/m, y un descenso de producción del 21% por incremento unidad de la CEe por encima de dicho umbral. Bernstein (1980) especificó que la producción del melocotonero descendió un 10% a una CEe de 2.5 dS/m, y Hoffman *et al.* (1989) determinaron que el peso del fruto y el número de frutos por árbol de melocotonero se redujeron en torno al 50% a unos valores de CEe, dominada por sales de cloruro, de alrededor de 3 dS/m.

Otro de los problemas derivados de la salinidad es la fitotoxicidad por iones específicos. La planta absorbe agua que contiene un exceso de iones perjudiciales (principalmente sodio y cloruro), que pasan de las raíces al resto de la planta apareciendo síntomas en puntas y bordes de las hojas (quemadas y amarillentas) con concentraciones umbral de 0.5-1.0 % (peso de hoja seca) de Cl y 0.2-0.5% de Na (Bernstein, 1980; Boland *et al.*, 1993).

1.3 ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO

El agua es un recurso escaso que tiene importantes usos industriales, energéticos, domésticos, de ocio, medioambientales y agrícolas. La agricultura de regadío es el principal consumidor de agua (supone en torno al 80% del consumo total), razón por la cual la mejora del manejo y gestión, así como su posible ahorro en los casos en los que sea posible, constituyen un objetivo prioritario y de plena actualidad económica y social.

El riego localizado o riego goteo, con una eficiencia potencial del 90% o superior, es un sistema en el que el agua se aplica directamente en la zona de raíces de los cultivos mediante una red de tuberías y emisores (goteros). La frecuencia del riego suele ser diaria, infiltrándose el agua lentamente en el suelo y creando así un nivel de humedad relativamente constante en la zona del bulbo húmedo, lo que facilita la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces.

El riego localizado permite adoptar de forma relativamente sencilla estrategias de riego capaces de ahorrar agua y aumentar su eficiencia y su productividad. Estas técnicas se engloban bajo el término genérico de riego deficitario (RD), basado con diferentes enfoques en la limitación del aporte de agua de riego por debajo de las necesidades hídricas de la planta sin reducir de forma sensible la producción de la cosecha (Fereres y Soriano, 2007; Geerts y Raes, 2009; Ruiz-Sanchez *et al.*, 2010). Las tres estrategias más comunes del riego deficitario son (FAO, 2002):

- ***Riego Deficitario Sostenido (RDS)***

El déficit hídrico se distribuye uniformemente a lo largo de todo el ciclo del cultivo aplicando un volumen fijo de agua de riego inferior al de las necesidades hídricas del cultivo (ET_c). Esta estrategia es la más sencilla de aplicar por el regante, pero diversos estudios han puesto de manifiesto que no tiene en cuenta las fases de crecimiento del cultivo y, por tanto, la influencia sobre la producción y calidad de frutos puede verse reducida de manera significativa, aunque se consigue un control óptimo del crecimiento vegetativo del árbol (Abrisqueta *et al.*, 2010; Goldhamer *et al.*, 2002).

- **Riego Deficitario Controlado (RDC)**

El déficit hídrico se aplica únicamente en aquellos períodos fenológicos donde el estrés inducido no afecta sensiblemente a la producción ni a la calidad de fruto. La introducción inicial del RDC en los años 80, respondió a objetivos de control del crecimiento vegetativo del árbol y mejora del crecimiento del fruto a través de la aplicación de un estrés hídrico moderado (Chalmers *et al.*, 1981). Sin embargo, esta estrategia se enfoca hoy en día a reducir el volumen de agua de riego y mejorar su eficiencia, aunque suponga una ligera reducción en la producción obtenida (Girona *et al.*, 2003).

El RDC es mucho más complicado de aplicar que el RDS, ya que es de especial importancia el conocimiento de los períodos críticos del cultivo al estrés hídrico, el nivel de coincidencia entre el crecimiento vegetativo y el del fruto, las características del suelo, el manejo flexible del sistema de riego, el clima, el material vegetal, los mecanismos de resistencia a la sequía, etc. (Torrecillas *et al.*, 1996). Sin embargo, la mayoría de los resultados indican que esta estrategia es capaz de incrementar la productividad del agua (kg por unidad de agua evapotranspirada) por encima de la que se obtiene con el RDS (FAO, 2002). Asimismo, esta estrategia ha demostrado que permite reducir el vigor del árbol y los costes de poda y de mantenimiento para el agricultor e incrementar el índice productivo (kg de cosecha/cm² de sección del tronco).

- **Secado Parcial de Raíces (SPR)**

De forma alternativa (períodos de dos semanas normalmente) se humedece completamente la mitad de la zona de raíces del cultivo y se deja secar la otra mitad. El objetivo de esta estrategia de riego es inducir la producción de ácido abscísico (ABA) en las raíces parcialmente secas que actúa como señal para que las hojas reduzcan su actividad estomática, su transpiración y su pérdida de agua. Al mismo tiempo, las raíces con un suministro adecuado de agua mantienen un buen estado hídrico de las hojas y un correcto desarrollo radicular (Sepaskhah y Ahmadi, 2010).

Esta técnica se ha utilizado desde hace años para el riego de vides de vinificación en muchas zonas del planeta, pero su uso en cultivos frutales ha sido menos extendido. Abrisqueta *et al.* (2008) observaron una reducción del

43% en la densidad de longitud de raíces en un tratamiento de SPR frente a uno control en melocotonero temprano sin efectos en la producción a corto plazo. Sin embargo, son necesarios más años de estudio para observar los posibles efectos a largo plazo sobre la productividad del árbol.

1.4 RIEGO DEFICITARIO Y SALINIDAD EDÁFICA

En el año 1999, la superficie de regadío en Aragón era de 377685 ha, de las cuales el 21 % se regaban por aspersión y el 8 % por riego localizado (INE 1999). En 2009, la superficie de regadío censada en Aragón fue similar a la del año 1999, pero el 30 % se regaba por aspersión y el 15.5 % por riego localizado (INE, 2009). Es decir, la modernización del regadío ha conducido en tan solo diez años a un aumento significativo de los riegos a presión y en particular del riego localizado, en detrimento del riego por inundación. Esta tendencia se ha mantenido en la última década, tanto en Aragón como en otras regiones de España.

Este incremento del riego localizado ha venido asociado en gran medida a estrategias de riego deficitario en cultivos hortofrutícolas, especialmente en zonas con limitaciones de agua de riego como el sureste español.

Los importantes beneficios derivados del riego deficitario se han detallado en apartados anteriores. En este apartado se detalla el riesgo potencial de salinización del suelo debido al riego deficitario, entendiendo dicha salinización como el incremento en la concentración de sales disueltas en la solución del suelo que viene generalmente expresada como la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo (CEe). Así, según FAO (1985) valores de CEe comprendidos entre 2 y 4 dS/m indican que el suelo es ligeramente salino, mientras que valores superiores a 4 dS/m clasifican los suelos como salinos y afectan negativamente al rendimiento de los cultivos sensibles como la mayoría de los frutales, incluido el melocotonero.

La principal causa de salinización de los suelos sujetos a riego deficitario es el descenso de la fracción de lavado (FL) y consiguiente incremento de la evapo-concentración de las sales aportadas por el agua de riego (Shalhevet, 1994; Aragüés y Tanji, 2003). Este incremento es debido a que el agua se evapora desde la superficie del suelo (evaporación, E) o es transpirada por los

cultivos (transpiración, T_c), pero la mayoría de las sales disueltas aportadas con el riego permanecen en el suelo con el resultado de que la concentración salina de la solución del suelo aumenta en función del descenso del volumen de agua producido por la ETc. Por lo tanto, conforme mayor es el riego deficitario y menor es la FL, mayor es el riesgo potencial de salinización del suelo en la zona de raíces de los cultivos.

Este riesgo de salinización del suelo aumenta asimismo conforme mayor es la salinidad del agua de riego y, por lo tanto, el aporte de sales a la solución del suelo. Aunque el RDC puede favorecer el control de la salinidad debido al menor aporte de agua y sales al suelo y a la disminución de la recarga de los acuíferos que permite un mayor control del ascenso de las aguas freáticas, el descenso de la FL y el incremento de la evapo-concentración pueden conducir a serios problemas de salinización del suelo localizado en la zona de raíces de los cultivos.

Asimismo, esta salinización puede conducir a la sodificación del suelo (incremento de la relación de adsorción de sodio, RAS) debido a la precipitación de minerales ligados al ion calcio, tal como la calcita o el yeso. Esta sodificación puede producir la pérdida de estabilidad estructural del suelo, en particular cuando el mismo se ve sujeto a aguas de muy baja salinidad tales como el agua de lluvia (FAO, 1985).

El problema potencial de salinización de los suelos asociado al riego deficitario ha sido citado en diversos trabajos (Sarwar y Bastiaanssen, 2001; Hsiao *et al.*, 2007; Raine *et al.*, 2007; Geerts y Raes, 2009), pero su cuantificación detallada ha sido poco estudiada. A continuación se sintetizan los trabajos más relevantes encontrados en la revisión de literatura.

Boland *et al.* (1993) determinaron en lisímetros de drenaje durante dos años la respuesta productiva de melocotoneros sujetos a aguas de riego con concentraciones de NaCl de entre 0.1 y 1.0 dS/m combinadas con tratamientos de RDC, obteniendo descensos significativos en todos los niveles de salinidad del agua de riego que atribuyeron fundamentalmente a toxicidad iónica específica del Na^+ y Cl^- . La conclusión de estos autores es que el RDC con aguas salinas implica aplicaciones regulares de riegos de lavado para el control de la salinidad. Sin embargo, estos resultados tan negativos con estas aguas

de salinidad baja o moderada (valores máximos de 1 dS/m) caben atribuirse en parte a que los lisímetros estuvieron cubiertos e impidieron la entrada de agua de lluvia en los mismos.

Nasr y Ben Mechila (2002) estudiaron la aplicación del RDC en un cultivo de manzano como una posible estrategia para reducir la salinización del suelo, concluyendo que esta reducción potencial derivada de la menor cantidad de sales aportadas por el riego deficitario solo era posible en condiciones de un lavado natural de las sales por parte de la lluvia y que, de otro modo, el riego debía ser incrementado para controlar la acumulación de sales en la zona de raíces del manzano.

Kaman *et al.* (2006) estudiaron la acumulación de sales en la zona de raíces de los cultivos de tomate (invernadero) y algodón (campo) regados con aguas de baja salinidad (CE = 0.8 dS/m en tomate y 0.4 dS/m en algodón) con la técnica del secado parcial de raíces, indicando que esta estrategia de riego deficitario incrementó la salinidad del suelo superficial en el momento de cosecha en un 35% respecto al tratamiento control bien regado. Sin embargo, estos incrementos de salinidad no superaron en ningún caso el umbral de tolerancia de estos cultivos a la salinidad. Estos autores concluyeron que la técnica del SPR no tiene en general riesgos de acumulación de sales si los suelos no son inicialmente salinos y si el agua de riego es de buena calidad.

Grhab *et al.* (2013) evaluaron la distribución de la salinidad en la zona radicular de un cultivo de olivo sujeto a un tratamiento de SPR que aportó un volumen de agua salina (CE = 6.7 dS/m) equivalente al 50% del volumen aplicado en un riego control (100% de las necesidades hídricas del olivo). El SPR aportó menos sales al suelo que el riego control, y estas sales fueron lavadas durante la estación húmeda manteniendo la salinidad del suelo a niveles no perjudiciales para el cultivo. La producción acumulada de olivas durante los cuatro años experimentales descendió tan solo un 11% en el tratamiento de SPR respecto al tratamiento control. Esto autores concluyeron que el riego del olivo con aguas salinas mediante la técnica del SPR es sostenible a largo plazo bajo las condiciones de clima mediterráneo y suelos arenosos presentes en su zona de estudio (sur de Túnez).

Alomran *et al.* (2013) estudiaron el impacto del riego deficitario (tratamientos del 40, 60, 80 y 100% de la ETc) con aguas de una CE de 1.4 dS/m en pepino cultivado bajo invernadero sobre la salinidad del suelo en un medio árido (Arabia Saudí). Los resultados indicaron que la salinidad del suelo aumentó en general con los descensos en el volumen de agua aplicada (incrementos de CEe de hasta tres veces en el tratamiento del 40% de la ETc respecto al tratamiento del 100% de la ETc), aunque la productividad del agua aumentó conforme menor fue el riego aplicado.

Mounzer *et al.* (2013) analizaron los valores de salinidad y sodicidad del suelo en una plantación de mandarinos sujetos al efecto combinado de aguas dulces (CE = 1 dS/m) y salinas (CE = 3 dS/m) con RDC (aplicaciones de agua del 50% de la ETc durante la fase II de crecimiento del fruto). Los resultados indicaron que el RDC intensificó el desarrollo de gradientes de salinidad en el bulbo húmedo de los goteros incluso con aguas de buena calidad, y que la combinación de RDC y aguas salinas produjeron estados transicionales salino-sódicos en los bordes del citado bulbo. La conclusión de estos autores es que el déficit hídrico provocado por el RDC debe evitarse cuando se utilizan aguas salinas recicladas para el riego.

Aragüés *et al.* (2014a) analizaron durante tres años los niveles de salinidad (CEe) y sodicidad (RASE) del suelo en dos plantaciones de vides de uva de mesa sin pepita regadas con aguas de CE = 1.7 dS/m y sujetas a un riego control (100% de la ETc) y a dos tratamientos de RDC (80 y 60% de la ETc en el periodo entre envero y cosecha). Los resultados indicaron que la CEe y la RASE fueron generalmente mayores en el tratamiento de RDC más severo que en el control debido a las menores FL, y que la CEe y la RASE aumentaron en la estación de riego (periodo de menor FL) y disminuyeron en la estación de no riego (período de mayor FL). El rendimiento de las viñas disminuyó con el incremento de la salinidad debido en gran medida a concentraciones de Cl en hoja tóxicas para este cultivo. Estos autores concluyeron que la combinación del RDC severo con aguas de salinidad moderada-alta en áreas semiáridas con baja precipitación debe evaluarse con suma precaución debido a los problemas potenciales de salinización y sodificación del suelo.

Finalmente, Aragüés *et al.* (2014b) cuantificaron durante cinco años la evolución de la salinidad y sodicidad del suelo en la misma plantación de melocotonero y con los mismos tratamientos de riego deficitario que los detallados en este Trabajo Fin de Grado. Los resultados de este estudio indicaron que el melocotonero no se vió afectado por los tratamientos de RDC, pero que la productividad descendió por encima de una CEE umbral de 4 dS/m. Estos autores concluyeron que con la salinidad moderada del agua de riego utilizada (CE media de 1.1 dS/m) y bajo las condiciones climáticas semiáridas de la zona de estudio (precipitación media anual de 318 mm), las tres estrategias de riego fueron sostenibles durante los cinco años de estudio desde el punto de vista de la evolución de la salinidad y sodicidad del suelo.

Los resultados de estos y otros trabajos sugieren que las distintas estrategias de riego deficitario (RDS, RDC y SPR) tienen un riesgo potencial considerable de salinización de la zona de raíces de los cultivos, excepto en aquellos casos en que la precipitación es suficiente para el lavado de las sales que se acumulan durante la estación de riego. Sin embargo, la mayoría de los estudios de riego deficitario llevados a cabo en melocotón pertenecen a variedades tempranas de ciclo corto (Mounzer *et al.*, 2008; Gelly *et al.*, 2004), existiendo muy poca información acerca de variedades de ciclo largo como el melocotón tardío de Calanda, objeto de este Trabajo Fin de Grado.

1.5 OBJETIVOS

El **objetivo general** de este Trabajo Fin de Grado es estudiar la interacción riego-suelo-planta, con especial énfasis en cuantificar la evolución espacio-temporal de la salinidad en un cultivo de melocotón sujeto a distintas estrategias de riego deficitario.

Los **objetivos específicos** del trabajo son:

- (1) Estudiar el efecto de tres tratamientos de riego por goteo (control, riego deficitario sostenido-RDS y riego deficitario controlado-RDC) con aguas de salinidad moderada ($CE \approx 1.2$ dS/m) sobre la salinidad edáfica.
- (2) Analizar el efecto de tres tratamientos de riego sobre parámetros productivos del melocotonero tardío.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

2.1.1 Ubicación del ensayo

El ensayo se realizó durante el año 2011 en la finca experimental AFFRUCAS, ubicada en el término municipal de Caspe, Zaragoza, en el valle medio del Ebro. Las coordenadas de la finca son 41.16° N y 0.01 °W (Figura 2.1).

La finca es propiedad del Ayuntamiento de Caspe. Mediante un convenio firmado en el año 2001 entre éste organismo, el Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón y la Asociación Profesional de Fruticultores de la Comarca de Caspe, la finca se viene utilizando para estudios de experimentación de variedades y ensayos de investigación en especies leñosas.

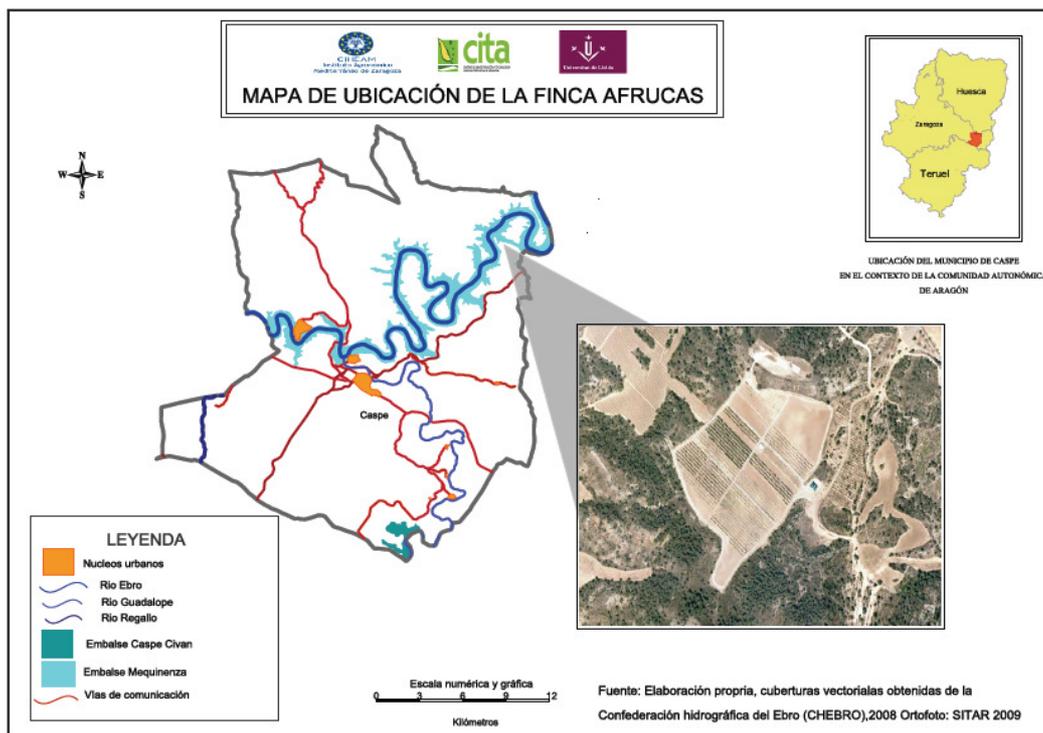


Figura 2.1. Ubicación de la finca experimental AFFRUCAS en Caspe, Zaragoza.

La finca tiene una superficie de unas 8 ha que dispone de un sistema de riego localizado por goteo y en ella se pueden encontrar ocho especies leñosas (Albaricoquero, Cerezo, Ciruelo, Melocotonero, Nectarina, Paraguayo,

Almendro y Olivo). El agua de riego de la finca es bombeada directamente del Ebro en el embalse de Mequinenza.

El suelo de la parcela experimental donde se ubica el ensayo de melocotonero tiene una profundidad media de 1.5 m, una textura franco-arenosa, una densidad aparente de 1.6 g/cm³, y unos valores de humedad gravimétrica del 21% a capacidad de campo y 12% en el punto de marchitez permanente (Aragüés *et al.*, 2014b). El suelo se clasifica como Haploxerept cálcico, franca fina, carbonática, térmica (Soil Survey Staff, 2006).

2.1.2 Diseño experimental

El ensayo se llevó a cabo sobre una plantación homogénea de 0.1 ha de melocotón tardío de la variedad Calrico (*Prunus Persica* L. Batch), injertado sobre patrón GF-677 (Híbrido melocotonero x almendro). Los árboles, plantados en el año 2005, están podados en forma de Ypsilon y se encuentran a un marco de plantación de 2 metros entre árboles por 6 metros entre filas (Figura 2.2). El manejo general de la plantación (abonado, fitosanitarios, etc.) se efectuó siguiendo las prácticas culturales habituales en la finca.



Figura 2.2. Vista general de una línea de árboles en la finca AFFRUCAS en Caspe, Zaragoza.

El ensayo se desarrolló en tres filas de melocotoneros de 35 árboles cada una. Se empleó un diseño experimental de bloques al azar con 5 repeticiones y 3 tratamientos de riego diferenciales. Cada parcela experimental estaba compuesta por lo tanto por 7 árboles, de los que se controlaron los 5 centrales (numerados de 1 a 75 en la Figura 2.3) dejando los extremos como árboles guarda. Las fases de riego del melocotonero se detallan en la leyenda de la Figura 2.3, y la descripción de los tratamientos de riego se efectúa en el apartado 2.3.1.

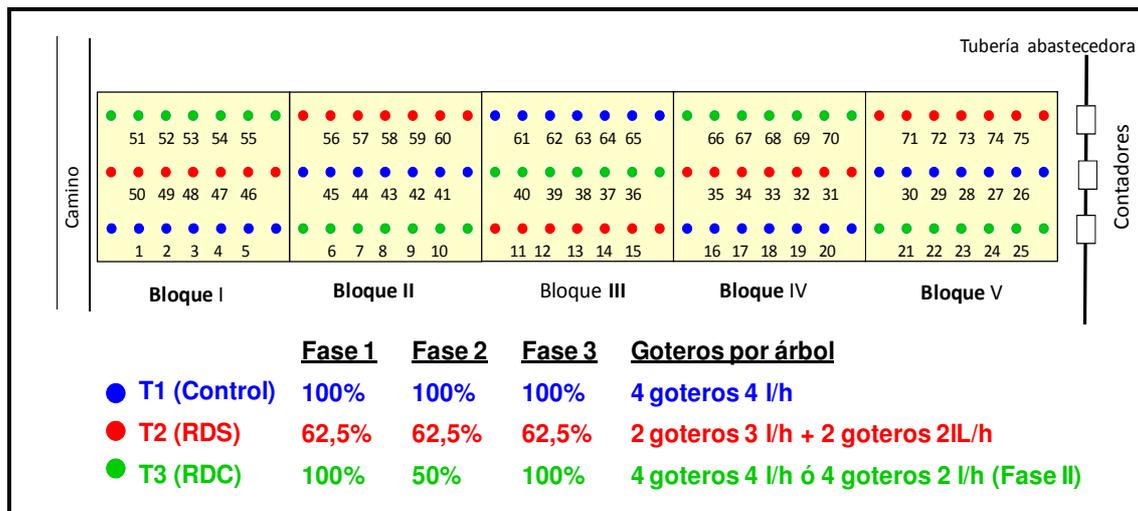


Figura 2.3. Esquema general del ensayo en la finca AFFRUCAS en Caspe, Zaragoza. T1, T2 y T3 son los tratamientos de riego. Fase 1: inicio de riego a inicio de endurecimiento de hueso; Fase 2: endurecimiento del hueso; Fase 3: fin de endurecimiento de hueso a fin de riego

2.2 METEOROLOGÍA

Para la caracterización meteorológica de la zona de estudio se emplearon los datos de la estación automatizada nº 38 “El Suelto-Plano Espés”, perteneciente a la Red del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) ubicada en Caspe, cerca de la zona de estudio. Sus coordenadas son UTMX 745309 y UTM Y 4576848 (41.19°N, 0.05°W) y se encuentra a 175 m de altitud.

Dicha estación registra desde el año 2003 datos semihorarios de las variables: temperatura y humedad relativa del aire, velocidad y dirección del

viento, radiación solar total y precipitación. Los datos meteorológicos semihorarios, así como las medias diarias y mensuales, están disponibles para su consulta y descarga gratuita en la página web de la Oficina del Regante de Aragón (Oficina del Regante, 2011).

2.3 RIEGO

2.3.1 Volumen de riego

La campaña de riego se inició el 1 de marzo y finalizó el 11 de octubre de 2011. El riego aplicado siguió las prácticas habituales de la finca, con 5 ó 6 riegos por semana. Las dosis a aplicar venían determinadas por el gestor de la finca en función de las recomendaciones proporcionadas por la web de la Oficina del Regante. Las dosis de riego se calculaban semanalmente de manera que el riego y la precipitación registrada la semana anterior cubrieran el 100% de las necesidades hídricas de la nectarina (ETc).

En cada línea de goteros se instaló un contador volumétrico (FECOSAN, Zaragoza, España) para la medida del volumen de riego aplicado en cada tratamiento (Figura 2.4). En total, se dispuso de 18 contadores (3 líneas de árboles x 3 tratamientos x 2 líneas portagoteros).



Figura 2.4. Contadores volumétricos instalados en una línea de árboles para la medida del riego aplicado en las dos líneas portagoteros de los tratamientos de riego T1, T2 y T3.

Los árboles se regaron mediante un sistema de riego localizado por goteo, con dos líneas portagoteros situadas a 0.5 m de distancia a ambos lados de la línea de árboles. Los goteros autocompensantes se situaron a 1 metro de distancia entre ellos, por lo que cada árbol está posicionado en el centro de un cuadrado de 1 m² de área con los goteros en sus cuatro vértices. Las líneas portagoteros se instalaron en el fondo de un pequeño surco excavado en el suelo con el fin de que el agua aplicada por los goteros se repartiera de manera uniforme y no escurriera sobre el terreno.

Los tratamientos de riego aplicados durante el ensayo fueron (Figura 2.3):

- **T1: Control.** Los árboles se regaron durante toda la campaña de riego con el 100% de las necesidades hídricas del cultivo (ET_c). Cada árbol se regó con 4 goteros de 4 l/h.
- **T2: Riego Deficitario Sostenido (RDS).** Se regó con el 62.5% de la ET_c durante toda la campaña de riego. Cada árbol disponía de 2 goteros de 2 l/h y 2 goteros de 3 l/h.
- **T3: Riego Deficitario Controlado (RDC).** Se regó con el 100% de la ET_c durante toda la campaña de riego excepto durante la fase de endurecimiento de hueso del melocotón (Fase 2, del 9 de mayo al 11 de junio de 2011), en la que se aplicó el 50% del riego aplicado en T1. Cada árbol disponía de 4 goteros de 4 l/h que fueron sustituidos por goteros de 2 l/h durante la fase de riego deficitario mediante una red de tuberías secundarias instaladas para este fin.

2.3.2 Calidad de agua de riego

Semanalmente se tomaron muestras del agua de riego para su posterior análisis en el laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA. Las variables a analizar fueron: conductividad eléctrica (CE, dS/m), concentración de sodio (Na, meq/l) y concentración de cloruro (Cl, meq/l). Durante el año 2011 se recogieron un total de 27 muestras de riego durante la estación de riego (marzo a septiembre).

2.4 FRACCIÓN DE LAVADO Y DÉFICIT HÍDRICO

A partir de los datos de riego (R), precipitación (P) y evapotranspiración de la nectarina (ETc) (ver punto 2.6.3) se calcularon los valores medios de la fracción de lavado (FL) y del déficit hídrico (DH) en cada tratamiento de riego.

La FL se calcula mediante la ecuación (1):

$$FL = \frac{(R+P-ETc)}{(R+P)} \quad (1)$$

La FL expresa, en régimen permanente de la humedad del suelo, la fracción del agua infiltrada en el suelo que percola por debajo de la zona radicular de los cultivos. La inversa de la FL indica el factor de evapo-concentración en la solución del suelo de las sales disueltas en las aguas de riego y de precipitación debido a la evapotranspiración de los cultivos (Aragüés y Tanji, 2003). Cabe concluir por consiguiente que la acumulación de sales en el suelo tiende a aumentar conforme menor es la FL (mayor es la evapo-concentración).

El DH se calcula mediante la ecuación (2):

$$DH = ETc - R - P \quad (2)$$

El déficit hídrico expresa, en régimen permanente de la humedad del suelo, las necesidades de agua del cultivo no satisfechas por el riego y la precipitación. Dado que la ETc evapoconcentra las sales en el suelo mientras R y P lavan las sales del suelo, cabe concluir que la acumulación de sales en el suelo tiende a aumentar conforme mayor es el DH.

La FL y el DH se calcularon para la '*estación de riego*' (de marzo a septiembre) y '*estación de no riego*' (desde octubre hasta febrero del año anterior o posterior utilizando datos del proyecto Rideco). Las fechas concretas para este cálculo vinieron determinadas por los días en los que se tomaron las muestras de suelo.

En los casos en los que ETc es mayor que R y P, se obtienen valores negativos de FL y positivos de DH. Aunque estos valores no son realistas ya que no es posible que la ETc supere a R y P en régimen permanente de la humedad del suelo, los mismos expresan el riesgo de salinización del suelo.

2.5 SUELO

2.5.1 Muestreo de suelo

Para caracterizar la distribución espacial y temporal de la salinidad, se tomaron muestras de suelo en 10 árboles por cada tratamiento de riego (2 árboles en cada repetición) en dos fechas, al inicio (7 de abril de 2011) y final de la campaña de riego (13 de septiembre de 2011).

Las muestras se tomaron con una barrena de 5 cm de diámetro a una profundidad de 0-60 cm en el gotero más cercano a cada árbol control en dos posiciones de muestreo: (1) G: junto al gotero (0 cm de distancia) y (2) M: a media distancia entre la línea de goteros y la línea de árboles (25 cm del gotero) (Figura 2.5).

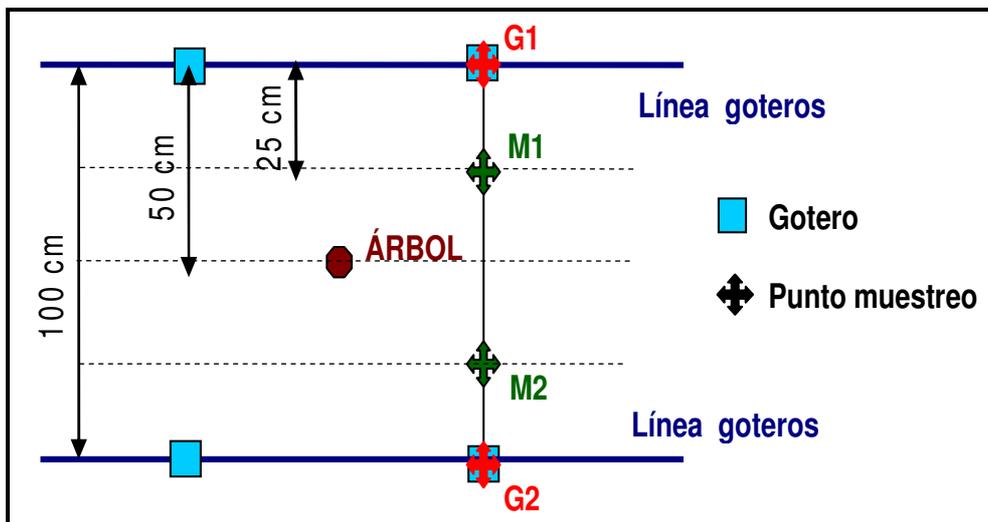


Figura 2.5. Esquema del muestreo de suelo para el estudio de la salinidad.

Este muestreo se realizó a ambos lados del árbol en cada una de las líneas portagoteros, y las submuestras de cada posición se mezclaron en la misma bolsa de manera que cada árbol control tenía una muestra compuesta a 0 cm (G1 + G2) y otra a 25 cm (M1 + M2) del gotero.

Las muestras tomadas al inicio y final de la campaña de riego se tomaron respectivamente a 15 cm a la derecha e izquierda del gotero para evitar muestrear en el mismo punto (Figura 2.6). Los agujeros realizados en cada muestreo se rellenaron con suelo inmediatamente después de los mismos.

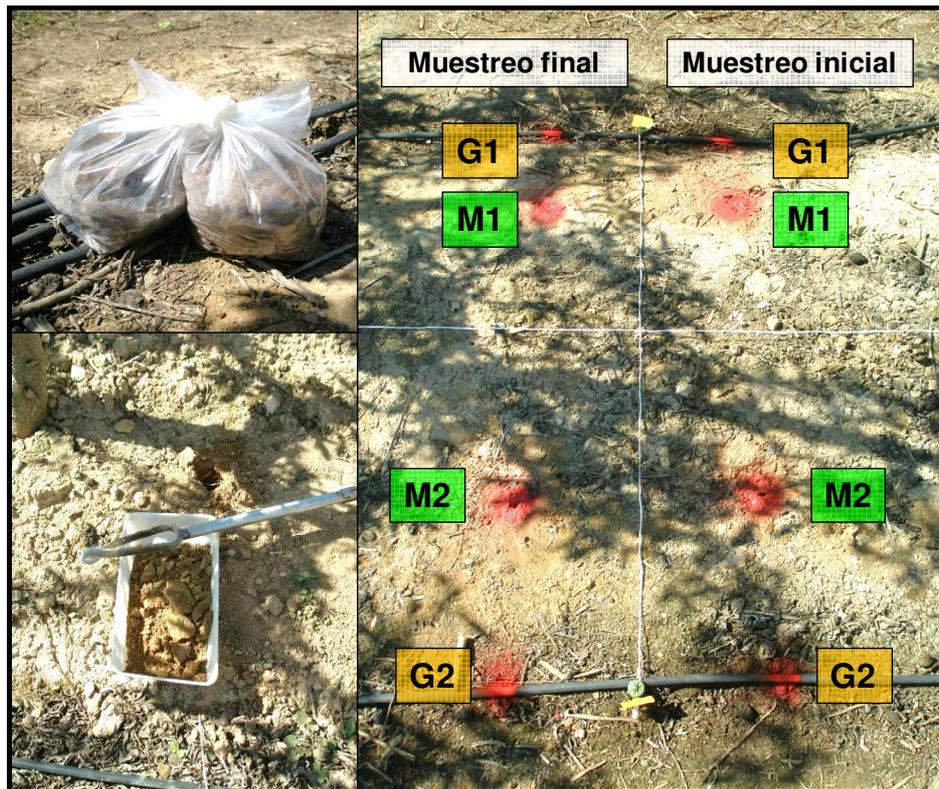


Figura 2.6. Fotografías del muestreo inicial y final del suelo para el estudio de la salinidad.

El número total de muestras recogidas durante el año 2011 fue de 120: 10 árboles/tratamiento x 3 tratamientos de riego (T1, T2 y T3) x 2 distancias al gotero (G y M) x 1 profundidad de suelo (0-60) x 2 fechas de muestreo (7 de abril y 13 de septiembre de 2011).

2.5.2 Análisis del suelo

La humedad gravimétrica del suelo (HG, %) se midió inmediatamente después de la recogida de las muestras en el laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA siguiendo el procedimiento estándar mediante pesada de una pequeña parte de cada muestra del suelo antes y después de ser secado durante 48 horas a pesada constante en estufa a 105°C.

Las muestras de suelo restantes se secaron al aire, se molieron y se pasaron por un tamiz de 2 mm. En el extracto de la pasta saturada del suelo se midió, siguiendo los procedimientos descritos en Page *et al.* (1982), el porcentaje de saturación (PS, %), la conductividad eléctrica (CEe, dS/m), la concentración de cloruro (Cle, meq/l), la concentración de sodio (Nae, meq/l) y

el yeso cualitativo (prueba de la acetona). Aunque esta prueba no es rigurosa, en particular si se hace en extractos agua:suelo como el extracto saturado, cabe afirmar que aquellos extractos con valores de CEe inferiores a unos 2.2 dS/m (saturación en yeso) o con valores superiores a 2.2 dS/m que no dan el precipitado blanco no tienen una presencia relevante de yeso en el suelo. Esta cuestión es importante ya que en el caso de suelos con yeso los valores de CEe umbral de las tablas FAO de tolerancia de cultivos a salinidad deben corregirse aumentando los mismos en 2 unidades de CE.

La relación de adsorción de sodio (RASE, $(\text{mmol l}^{-1})^{0.5}$), se estimó en función de la CEe (dS/m) y el Nae (mmol/l) mediante la fórmula:

$$\text{RASE} = \frac{\text{Nae}}{\sqrt{\frac{10 \cdot \text{CEe} - \text{Nae}}{2}}} \quad (3)$$

Además de los muestreos propios del ensayo de 2011, se presentan también los resultados de los muestreos realizados al final de la campaña de riego del año 2010 (22 de septiembre de 2010) y al principio del 2012 (23 de febrero de 2012), con el objetivo de analizar la evolución de la salinidad durante la 'estación de no riego' anterior y posterior al periodo de riego estudiado.

2.6 MELOCOTONERO

2.6.1 Fenología

Semanalmente se midió la evolución del estado fenológico del conjunto de árboles de la parcela según la escala Baggiolini. Se prestó especial atención al momento de inicio de la fase de endurecimiento de hueso (Figura 2.7 D), en el que se aplica el riego deficitario controlado (T3), la cual dura unos 30 días aproximadamente durante el mes de mayo.

2.6.2 PAR interceptado

La radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (IPAR) se midió sobre tres árboles de ensayo con un ceptómetro (Sunscan Canopy Analysis System, tipo SS1, Cambridge, England) (Figura 2.8 A) que consiste en una barra de 1 m de longitud con 64 fotocélulas sensibles a la radiación

electromagnética de longitudes de onda entre 400 y 700 nm. Las lecturas se realizaron semanalmente y al mediodía solar en días despejados. En cada fecha y árbol, se realizaron dos medidas por encima de la cubierta vegetal y 18 lecturas sobre el suelo, cubriendo el marco de plantación del árbol (2 x 6 m) (Figura 2.8b). Una vez alcanzado el sombreado total, las medidas se efectuaron mensualmente.

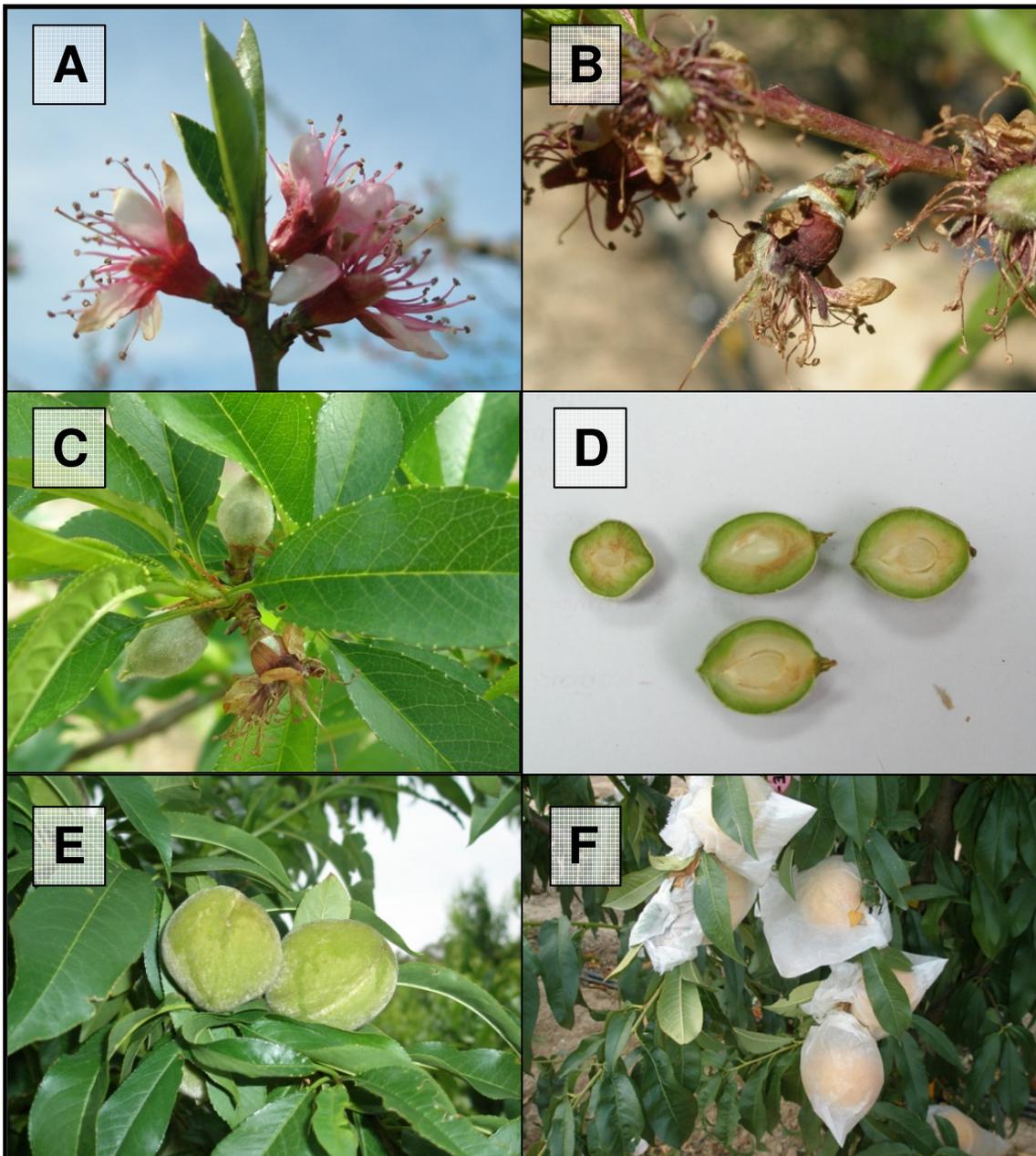


Figura 2.7. Fotografías de la evolución del estado fenológico del melocotonero según escala Baggiolini: A) Plena floración; B) Caída de pétalos; C) Cuajado de fruto; D) Inicio de endurecimiento de hueso; E) Crecimiento de fruto; F) Embolsado.

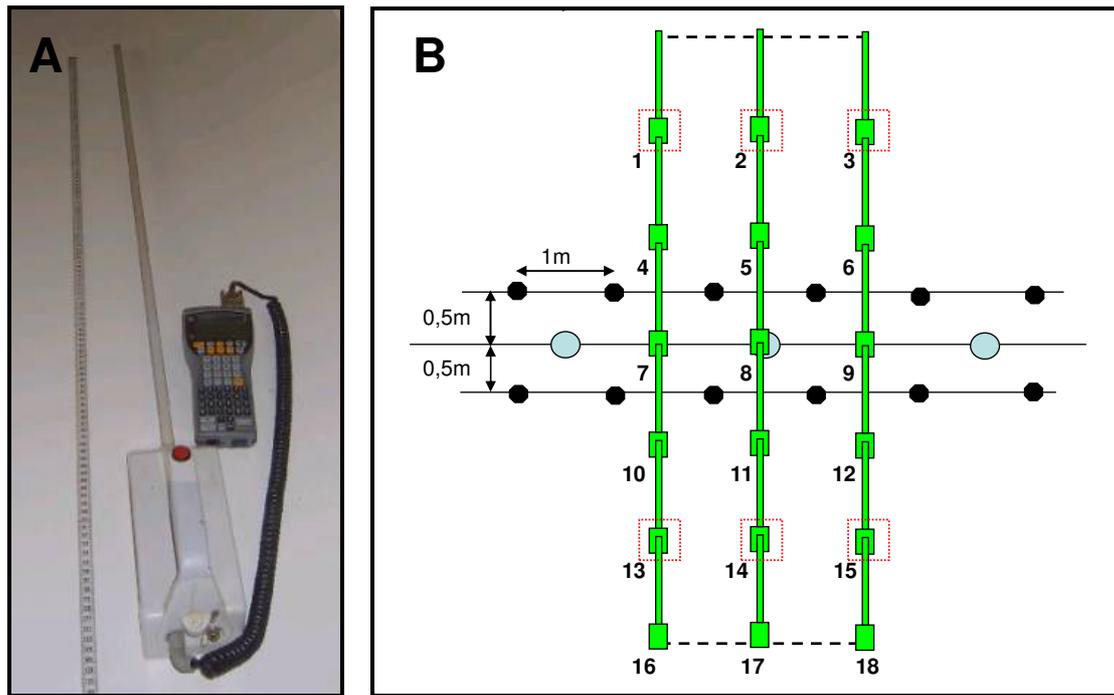


Figura 2.8. (A) Ceptometro y (B) esquema de las medidas de PAR interceptado en un árbol.

2.6.3 Evapotranspiración

La RED SIAR proporciona la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o), usando la metodología de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). A partir de esta ET_o diaria y de los valores de K_c obtenidos por Ayars *et al.* (2003), se calcularon los valores diarios de la evapotranspiración del melocotonero (ET_c) mediante la ecuación:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (4)$$

Donde los valores diarios de K_c se obtuvieron mediante la siguiente ecuación obtenida por Ayars *et al.* (2003) en un cultivo de melocotonero tardío en California en condiciones climáticas similares a las obtenidas en este ensayo y bajo un sistema de riego deficitario controlado por goteo:

$$K_c = 1.59 \text{ IPAR} + 0.082 \quad (5)$$

Los valores diarios de IPAR se estimaron mediante la ecuación que se presenta en el apartado 3.5.2 de Resultados y discusión.

2.6.4 Sección de tronco

Para monitorizar el crecimiento vegetativo del árbol se midió el perímetro de tronco a unos 20 cm del suelo con cinta métrica al inicio (17 de marzo de 2011) y final (10 octubre de 2011) del ensayo (Figura 2.9).



Figura 2.9. Medida del perímetro de tronco con cinta métrica.

A partir de estos datos se calculó la sección de tronco inicial (S_i) y final (S_f) y su crecimiento relativo anual (C.Rel) mediante la ecuación:

$$C.Rel = (S_f - S_i) / S_i \quad (6)$$

2.6.5 Frutos: producción, precocidad, productividad, eficiencia del uso del agua

La recolección de frutos fue realizada manualmente por el personal de la finca en tres pasadas los días 1, 5 y 12 de septiembre de 2011 (Figura 2.10). En cada pasada, se tomaron datos de la cosecha individual de cada árbol control (Kg/árbol) así como el peso medio de 20 frutos (Kg/fruto). Dividiendo la producción obtenida por el peso medio de frutos se obtuvo el número medio de frutos por árbol.

A partir de los datos de cosecha se calcularon los siguientes índices productivos:

La **precocidad del fruto** (%), estimada como el cociente entre la producción de fruta medida en la primera pasada y el total cosechado en todas las pasadas efectuadas.

La **productividad del árbol** (Kg/cm²), estimada como el cociente entre la cosecha total de cada árbol y la superficie del tronco al inicio del ensayo.

La **eficiencia del uso del agua de riego** (g/mm), estimada como el cociente entre la cosecha media de cada tratamiento de riego y la cantidad de agua aplicada en cada tratamiento.



Figura 2.10. Cosecha del melocotón en la finca AFFRUCAS.

2.6.6 Análisis iónico foliar

En cada árbol control se tomó una muestra de unas 40-50 hojas alrededor de todo el árbol. Las muestras se cogieron de los mismos árboles en los que se realizó el muestreo de suelo en dos fechas, a mitad (14 de julio de 2011) y final de la campaña de riego (13 de septiembre de 2011).

El número total de muestras de hoja durante el año 2011 fue de 60: 10 árboles/tratamiento x 3 tratamientos de riego (T1, T2 y T3) x 2 fechas de muestreo = 60 muestras/año.

En el laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos las muestras se lavaron tres veces con agua desionizada por unos pocos segundos para eliminar sales residuales o impurezas en la superficie de las hojas, se secaron en estufa a 70° hasta pesada constante y, una vez molidas y tamizadas, se midió la concentración de Na y Cl (% en peso seco) en un extracto de ácido acético y nítrico diluido.

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los resultados obtenidos en el ensayo se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) Las medias se separaron mediante la comparación múltiple de Tukey con el programa Statgraphics Plus versión 5.0. El nivel de significación en todos los análisis estadísticos fue de $p = 0.05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 METEOROLOGÍA

La Tabla 3.1 presenta los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración de referencia y los valores medios mensuales de temperatura, humedad relativa del aire y velocidad del viento (a 2.0 m del suelo) registrados en el año 2011 en la estación meteorológica automática de la red SIAR ubicada en Caspe. Asimismo, la Tabla 3.1 lista a efectos comparativos los valores del año medio del periodo 2004 – 2013.

La precipitación total fue un 14% mayor en el año 2011 (347 mm) que en el año medio (303 mm). La distribución de la precipitación en 2011 fue distinta a la del año medio, con valores elevados en los meses de marzo, abril y mayo (64% de la precipitación total anual en 2011 frente a 39% en el año medio) y bajos a partir de agosto, exceptuando el mes de noviembre que fue especialmente lluvioso (Figura 3.1).

Los valores medios anuales de la temperatura (16.1°C) y humedad relativa (65%) fueron ligeramente superiores en 2011 que en el año medio (15.3°C y 63%), con aumentos del 5% y 2% respectivamente. Por el contrario la velocidad del viento (2.5 m/s) fue ligeramente menor (7%). En líneas generales, estas diferencias fueron pequeñas y no significativas.

Por último, la ETo anual fue similar en 2011 (1430 mm) y en el año medio (1447 mm) con apenas un 1% de diferencia, siguiendo el patrón normal de distribución anual.

Agosto fue en 2011 el mes más caluroso (26.4°C), con la mayor ETo (219 mm) y con una precipitación nula (0.4 mm). En el año medio esta situación se produce en el mes de julio. Esto hizo de agosto un mes complicado, ya que el árbol se encuentra en la fase de engorde de fruto, y por ello los requerimientos de riego fueron mayores.

En definitiva, las condiciones meteorológicas del año 2011 fueron en general similares a las del año medio a excepción de la precipitación que fue un 14% mayor en el año de estudio y con un patrón de distribución atípico en el que la P fue muy superior a la del año medio en los meses de marzo, abril, mayo y noviembre.

Tabla 3.1. Valores meteorológicos mensuales del año 2011 y del año medio (2004-2013) registrados en la estación meteorológica de Caspe (Red SIAR): precipitación (P), temperatura media (T^a), humedad relativa media (HR), velocidad media del viento a 2.0 m del suelo (VV) y evapotranspiración de referencia (ETo).

<i>Meteorología en Caspe, Zaragoza (Red SIAR)</i>										
Mes	Año 2011					Año medio (2004-2013)				
	P (mm)	T^a (°C)	HR (%)	VV (m/s)	ETo (mm)	P (mm)	T^a (°C)	HR (%)	VV (m/s)	ETo (mm)
Ene	6.2	4.9	82	1.7	27.9	17.4	5.7	79	2.4	32.0
Feb	4.4	8.5	68	2.8	60.4	17.9	7.0	69	2.7	52.7
Mar	78.6	10.7	70	2.8	83.0	28.7	10.6	62	3.2	97.1
Abr	74.8	16.5	61	2.7	134.1	46.3	14.1	63	3.0	124.1
May	69.8	19.6	58	2.7	174.8	43.5	18.6	57	2.9	174.4
Jun	8.2	22.3	52	2.7	202.9	16.5	23.3	51	2.8	212.2
Jul	13.6	24.2	50	3.1	213.2	8.4	25.6	48	3.0	240.7
Ago	0.4	26.4	54	2.8	219.5	14.3	25.2	51	2.8	213.2
Sep	6.2	23.2	58	2.1	149.3	31.3	21.3	59	2.4	140.2
Oct	12.7	16.8	63	1.9	90.8	35.9	16.3	68	2.3	86.7
Nov	66.5	11.9	86	1.8	35.1	24.4	9.9	75	2.3	43.0
Dic	5.3	7.7	77	2.7	39.0	18.6	5.7	79	2.3	30.3
Anual	347	16.1	65	2.5	1430	303	15.3	63	2.7	1447

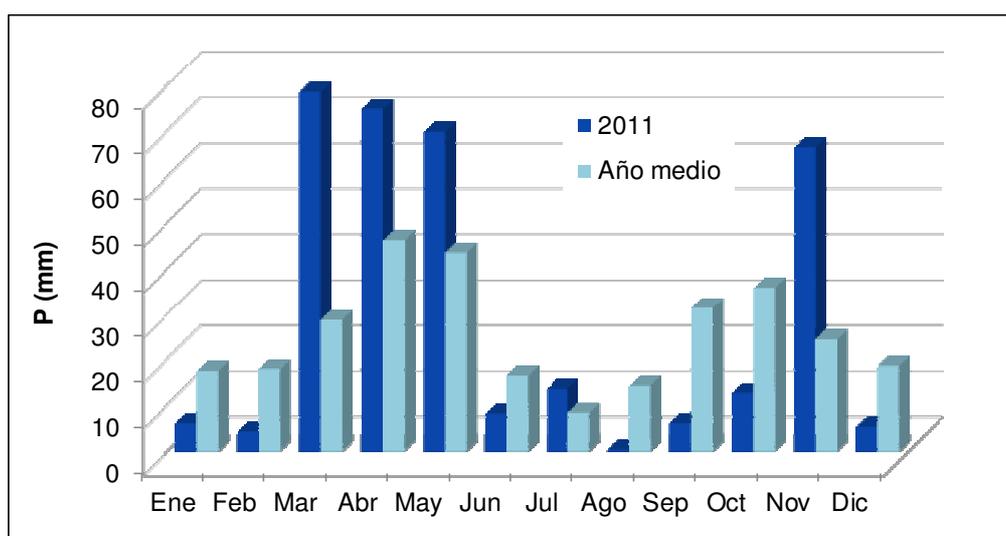


Figura 3.1. Distribución de la precipitación mensual en el año 2011 y en el año medio (2004-2013) en la estación meteorológica de Caspe (Red SIAR).

3.2 RIEGO

3.2.1 Volumen de riego

La Tabla 3.2 presenta los volúmenes (mm) de agua de riego aplicados en 2011 en los tratamientos Control (T1), RDS (T2) y RDC (T3) durante las tres fases de crecimiento del melocotonero (fases F1, F2 y F3 detalladas en la Figura 2.3). El riego en RDS (429 mm) supuso el 58% del riego en el Control (740 mm), cuando el valor objetivo era del 62.5% (Figura 2.3). En el tratamiento RDC, el riego aplicado en las fases F1 y F3 fue ligeramente inferior al medido en el tratamiento Control (un 3% y 4% inferior respectivamente), cuando según el procedimiento experimental deberían haber sido idénticos, mientras que el riego en F2 fue el 52% del valor en el Control, cuando el valor objetivo era el 50%.

En síntesis, los riegos aplicados en RDS y RDC fueron muy similares (en torno a un $\pm 4\%$) a los riegos objetivo definidos en el apartado 2.3.1, lo que valida el procedimiento experimental seguido en este trabajo.

Tabla 3.2. Volumen de riego aplicado en el año 2011 en los tratamientos T1, T2 y T3 durante las fases de crecimiento del melocotonero F1, F2 y F3 y riego total aplicado en las tres fases.

	<i>Volumen de riego (mm)</i>		
	T1 (Control)	T2 (RDS)	T3 (RDC)
F1	110.3	66.9	106.7
F2	81.7	47.3	42.7
F3	548.3	314.3	526.0
Total	740.3	428.5	675.4

Los volúmenes totales de riego aplicados en cada tratamiento indican que el tratamiento RDS produjo un ahorro de 312 mm respecto al control (equivalente a un ahorro de agua del 42%). Por el contrario, el tratamiento RDC solo produjo un ahorro de agua del 9% respecto al control debido a que la F2 del melocotonero en 2011 (período de reducción del riego) tuvo una duración de tan solo unos 30 días en el mes de mayo, mes en el que además la ETo no es muy elevada (Tabla 3.1).

La Figura 3.2 muestra la evolución mensual del riego aplicado en los tratamientos T1, T2 y T3. Los meses con mayor demanda evaporativa fueron julio y agosto y, en consecuencia, los de mayor dotación de riego, con un promedio de 3.5 horas de riego diarias.

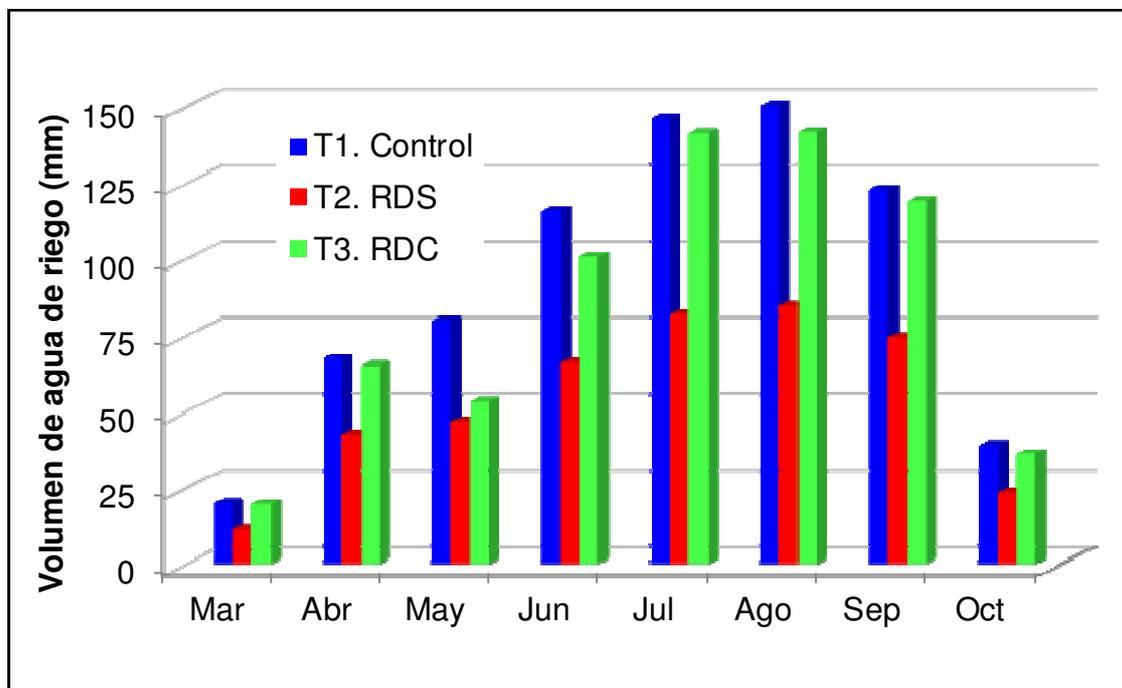


Figura 3.2. Valores mensuales del volumen de agua aplicada durante la estación de riego del año 2011 en los tratamientos de riego T1, T2 y T3.

Teniendo en cuenta que en 2011 la P fue 347 mm (Tabla 3.1) y la ET_c 1007 mm (apartado 3.5.3), un riego de 660 mm sería suficiente para satisfacer las necesidades netas de agua ($ET_c - P$) del melocotonero si se asume régimen permanente de la humedad del suelo. Los resultados de la Tabla 3.2 indican que, en relación a estas necesidades, el riego fue un 12% superior en el tratamiento control, un 2% superior en el tratamiento RDC y un 35% inferior en el tratamiento RDS.

En base a estos resultados, cabe concluir que el RDS produciría un estrés hídrico relevante al melocotonero, salvo en el caso de que el mismo extraiga el agua necesaria a partir de la almacenada inicialmente en su zona de raíces. Así, los resultados de humedad gravimétrica que se presentan en el apartado 3.4.1 indican que la humedad del suelo medida al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego fue similar en los tratamientos Control y RDC, mientras que en el tratamiento RDS la humedad en septiembre fue

significativamente inferior ($p < 0.05$) a la humedad en abril, sugiriendo que el melocotonero extrajo agua del suelo y compensó en mayor o menor medida el menor riego aplicado en este tratamiento.

3.2.2 Calidad de agua de riego

La Figura 3.3 indica que la CE aumentó progresivamente durante la estación de riego desde un valor inicial de 0.7 dS/m hasta un valor final de 1.5 dS/m. Aunque este último valor podría afectar negativamente al melocotonero, el valor medio de 1.16 dS/m es considerado como apto para el melocotonero regado por goteo (FAO, 1985).

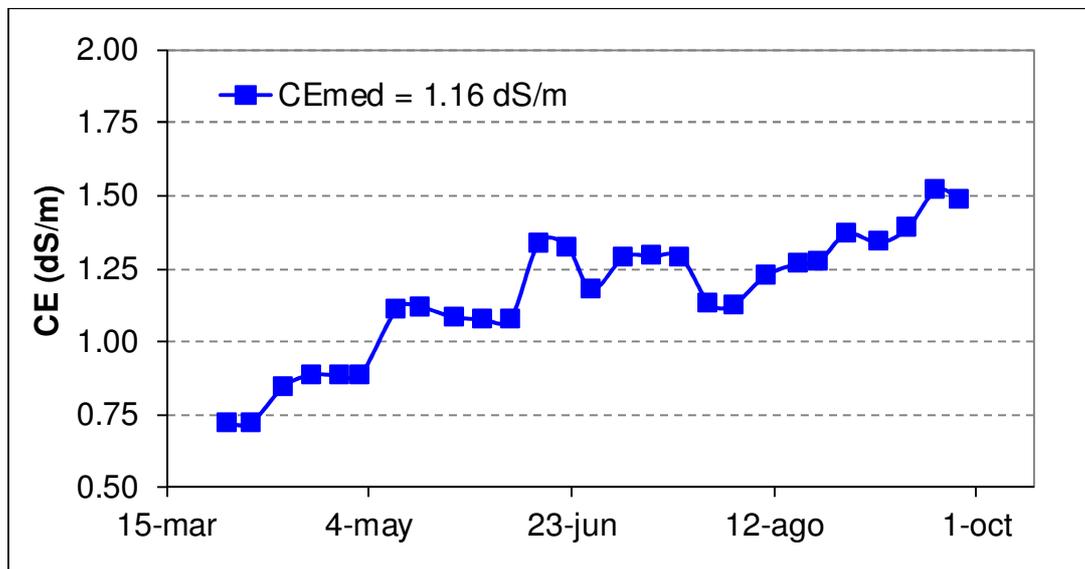


Figura 3.3. Evolución de la CE del agua de riego a lo largo de la estación de riego del año 2011.

Los análisis iónicos de las 27 muestras de agua de riego recogidas en 2011 arrojaron unas concentraciones medias de 4.5 meq/l (Na), 4.2 meq/l (Cl) y 2.4 (mmol/l)^{0.5} (RAS). Al igual que la CE, estas concentraciones tendieron a aumentar a lo largo de la estación de riego, pero en ningún caso superaron los umbrales clasificados por FAO (1985) como con riesgo de toxicidad iónica específica foliar (Na y Cl) en melocotonero y como con riesgo de pérdida de estabilidad estructural del suelo (RAS).

3.3 FRACCIÓN DE LAVADO Y DÉFICIT HÍDRICO

La Tabla 3.3 resume para cada tratamiento de riego (T1, T2, T3) los valores de riego (R), precipitación (P) y evapotranspiración del melocotonero (ETc, valores estimados en el apartado 3.5.3), y los valores calculados de fracción de lavado (FL, ecuación 1) y déficit hídrico (DH, ecuación 2) a nivel mensual, anual (Total) y para el periodo entre los muestreos de suelo inicial (4 de abril) y final (9 de septiembre) (Total-fm). La Figura 3.4 presenta la evolución mensual de la FL y del DH a lo largo del año 2011.

Tabla 3.3. Valores mensuales, totales anuales (Total) y totales entre las fechas de muestreo del suelo inicial (4 de abril) y final (9 de septiembre) (Total-fm) del riego (R en los tratamientos T1, T2 y T3), precipitación (P) y evapotranspiración del melocotonero (ETc) en el año 2011. Se presentan asimismo los valores de fracción de lavado (FL) y déficit hídrico (DH) en cada tratamiento de riego.

Mes	R (mm)			P (mm)	ETc (mm)	FL			DH (mm)		
	T1	T2	T3			T1	T2	T3	T1	T2	T3
Ene	--	--	--	6	7	-0.19	-0.19	-0.19	1	1	1
Feb	--	--	--	4	16	-2.64	-2.64	-2.64	12	12	12
Mar	20	11	19	79	23	0.77	0.74	0.76	-76	-67	-75
Abr	67	42	65	75	60	0.58	0.48	0.57	-82	-57	-79
May	80	47	53	70	115	0.23	0.01	0.06	-35	-2	-8
Jun	116	66	101	8	163	-0.32	-1.21	-0.50	39	89	54
Jul	146	81	141	14	194	-0.22	-1.04	-0.25	34	99	39
Ago	151	85	142	0	199	-0.31	-1.34	-0.40	48	114	57
Sept	123	74	119	6	130	-0.01	-0.63	-0.04	1	50	5
Oct	39	23	36	13	72	-0.40	-1.00	-0.48	20	36	23
Nov	--	--	--	67	17	0.75	0.75	0.75	-50	-50	-50
Dic	--	--	--	5	10	-0.95	-0.95	-0.95	5	5	5
Total	740	429	675	347	1007	0.07	-0.30	0.01	-80	231	-15
Total-fm	627	363	568	171	784	0.02	-0.47	-0.06	-14	250	45

La FL media mensual varió entre un mínimo de -2.64 en febrero (debido a la ausencia de riego y baja P) y un máximo de 0.75 en marzo (debido a la elevada P y baja ETc) (Tabla 3.3). Excepto en septiembre, la FL tendió a disminuir con la progresión de la estación de riego en los tres tratamientos de riego (Figura

3.4), lo que implicaría que la salinidad del suelo tendería a aumentar a lo largo de dicha estación, particularmente en T2 donde se produjo el mayor descenso de la FL. Este resultado es también aplicable al período entre muestreos de suelo (área azul en Figura 3.4).

La FL media anual fue del 7% en T1, -30% en T2 y 1% en T3 (Tabla 3.3), indicando que el incremento de salinidad del suelo debería seguir el orden T2 >> T3 > T1. Un resultado similar se obtiene con la FL calculada para el período Total-fm.

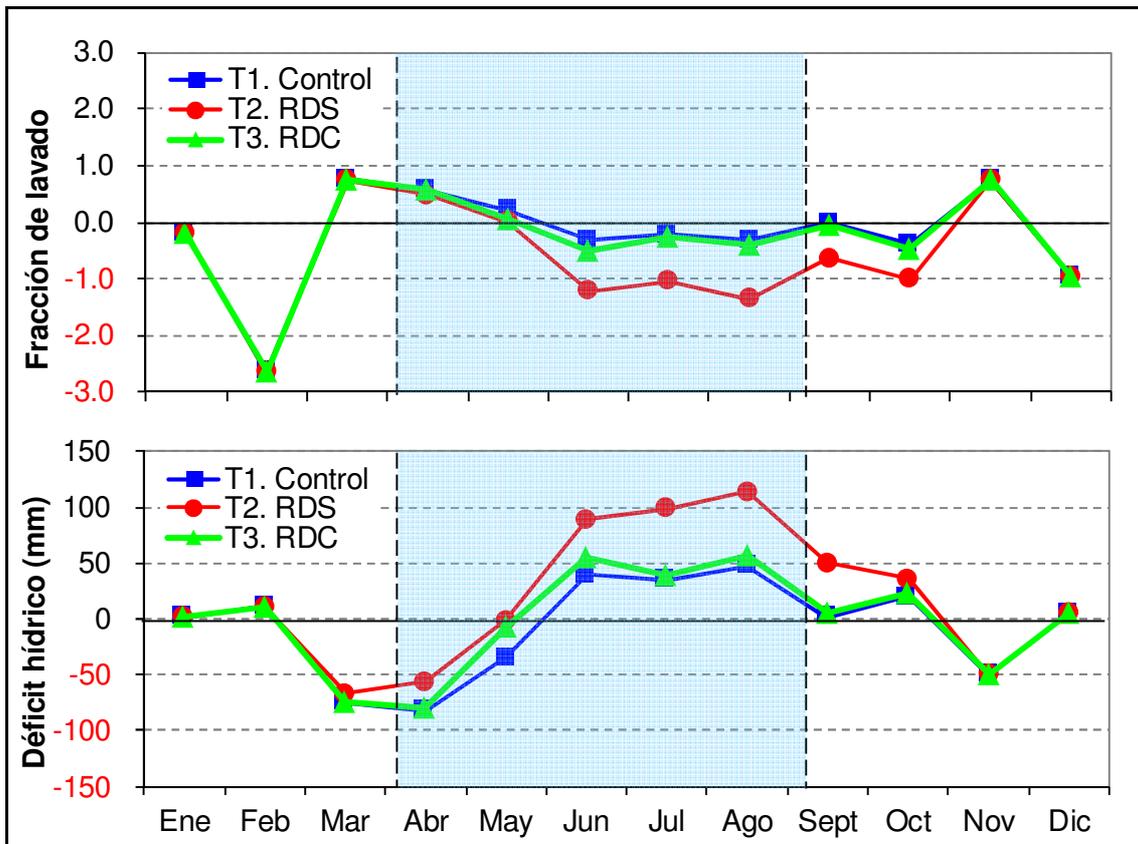


Figura 3.4. Evolución en el año 2011 de la fracción de lavado (FL) y del déficit hídrico (DH) en los tratamientos de riego T1, T2 y T3. El recuadro azul indica el periodo entre los muestreos inicial y final del suelo.

El DH medio mensual varió entre mínimos de en torno a -70 mm en marzo y abril (meses con ETc relativamente baja y P relativamente alta) y un máximo de 114 mm en agosto en el tratamiento T2 (mes de elevada ETc y P nula) (Tabla 3.3). El DH tendió a aumentar a lo largo de la estación de riego así como en el período entre muestreos del suelo excepto en septiembre (Figura 3.4),

sugiriendo que la salinidad del suelo tendería a aumentar a lo largo de dichos períodos.

El DH medio anual fue de -80 mm en T1, 231 mm en T2 y -15 mm en T3 (Tabla 3.3), por lo que el incremento de salinidad del suelo debería seguir el orden $T2 \gg T3 > T1$. Este orden es similar con el DH del período Total-fm.

Estos resultados indican que los órdenes de salinización potencial del suelo de los tratamientos de riego (T1, T2 y T3) obtenidos con FL y DH son similares, aunque el DH discriminaría mejor entre los tratamientos T3 y T1. La conclusión con ambas variables es que el tratamiento de RDS (T2) sería el de mayor y el tratamiento Control (T1) el de menor acumulación de sales en el suelo, mientras que el tratamiento de RDC (T3) se encontraría próximo al tratamiento Control por su grado de salinización del suelo.

3.4 SUELO

3.4.1 Humedad gravimétrica (HG)

La Tabla 3.4 presenta para cada bloque (1 a 5) y fecha de muestreo (abril y septiembre) los valores medios de HG del suelo (0-60 cm de profundidad) medidos en las 12 muestras recogidas (3 tratamientos de riego x 2 árboles por tratamiento x 2 distancias al gotero). Ni para cada bloque ni para su media hubo diferencias significativas entre fechas de muestreo ($p > 0.05$). Asimismo, para cada fecha de muestreo y para la media de ambas fechas no se encontraron diferencias significativas entre bloques ($p > 0.05$), lo que valida el diseño experimental de bloques al azar empleado en este trabajo.

La HG media de las 60 muestras tomadas en cada fecha de muestreo (5 bloques x 2 árboles por bloque x 2 posiciones de muestreo x 3 tratamientos) fue ligeramente superior en abril (23.2%) que en septiembre (22.6%). Se ha eliminado una observación perteneciente al muestreo de septiembre en T1 por alejarse inconsistentemente del resto de observaciones. La HG media de las 119 muestras analizadas en 2011 fue elevada (HG = 22.9%, superior a la humedad a capacidad de campo del 21%) y relativamente uniforme (CV = 17%) debido a la elevada frecuencia de riego (diaria).

Tabla 3.4. Humedad gravimétrica media del suelo (HG) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en cada repetición (Bloque) en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. Para la media de las cinco repeticiones se presentan también el número de muestras (N), la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV). No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre fechas de muestreo dentro de cada bloque o su media, ni entre bloques o su media dentro de cada fecha de muestreo.

<i>Humedad gravimétrica del suelo (HG, %)</i>			
Bloque	Abril	Septiembre	Media
1	21.8	22.7	22.2
2	23.3	22.1	22.7
3	22.9	22.5	22.7
4	23.9	21.7	22.9
5	24.3	23.7	24.0
Media	23.2	22.6	22.9
N	60	59	119
DE	3.8	3.9	3.8
CV	16%	17%	17%

La Tabla 3.5 presenta la HG media de las 10 muestras de suelo recogidas en cada tratamiento, fecha y posición de muestreo. En todos los casos la HG se situó por encima de la humedad a CC (21%) (Excepto en T2 a 25 cm del gotero, tanto en abril como en septiembre). Asumiendo que la HG se mantuvo en estos valores a lo largo de toda la estación de riego, cabría concluir que el estrés hídrico fue nulo o bajo, excepto en el tratamiento de riego deficitario sostenido (T2).

En los tres tratamientos de riego y las dos fechas de muestreo la HG descendió sistemáticamente con la distancia al gotero (valores entre 24-27% a 0 cm del gotero y 17-22 % a 25 cm del gotero, Tabla 3.5). La HG media de las dos fechas de muestreo fue menor ($p < 0.05$) a 25 que a 0 cm en los tres tratamientos (Figura 3.5), y para la media de los tres tratamientos la HG fue en ambas fechas de muestreo un 17% menor a 25 que a 0 cm del gotero ($p < 0.05$) (Tabla 3.5). Este resultado es consistente con la distribución radial decreciente de la HG centrada en el gotero (Hanson, 2012).

Tabla 3.5. Humedad gravimétrica media (HG) del suelo medida en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada tratamiento y posición de muestreo, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

<i>Humedad gravimétrica del suelo (HG, %)</i>					
Tratamiento		Abril		Septiembre	
		0 cm	25 cm	0 cm	25 cm
T1 (Control)	N	10	10	9	10
	Media	25.6 aA	21.0 aA	26.7 aA	22.3 aA
	DE	2.4	2.8	1.7	2.5
	CV	10%	13%	6%	11%
T2 (RDS)	N	10	10	10	10
	Media	24.3 aA	19.6 aA	21.6 bB	16.8 bB
	DE	2.3	2.1	2.1	2.0
	CV	10%	11%	10%	12%
T3 (RDC)	N	10	10	10	10
	Media	26.1 aA	22.7 aA	26.1 aA	22.3 aA
	DE	3.6	4.6	1.4	2.7
	CV	14%	20%	6%	12%
Media	N	30	30	29	30
	Media	25.3 a	21.1 a	24.7 a	20.5 a
	DE	2.8	3.5	2.9	3.5
	CV	11%	16%	12%	17%

En los tratamientos T1 y T3, los valores de HG en abril y septiembre fueron similares ($p > 0.05$), tanto para cada posición de muestreo (Tabla 3.5) como para su media (Figura 3.6). Así, las variaciones relativas de HG en septiembre respecto a abril fueron muy pequeñas (en promedio para las dos distancias, variaciones del 5% en T1 y -1% en T3; Tabla 3.6). Por el contrario, en el tratamiento de riego más deficitario (T2) los valores de HG en septiembre fueron menores ($p < 0.05$) que en abril, tanto en ambas posiciones de muestreo

(Tabla 3.5) como para su media (Figura 3.6), de tal manera que en promedio para las dos distancias la HG en septiembre fue un 13% inferior a la HG en abril (Tabla 3.6). Tal como se indicó en el apartado 3.2.1, estos resultados indican que los tratamientos T1 (Control) y T3 (riego deficitario controlado) tuvieron un suministro adecuado de agua, mientras que el tratamiento T2 (riego deficitario sostenido) aportó un volumen de agua insuficiente para satisfacer las necesidades hídricas del melocotonero, lo que provocó una extracción de agua del suelo a lo largo de la estación de riego.

Finalmente, la comparación de humedades entre los tratamientos de riego indica que los tres tuvieron unas HG similares ($p > 0.05$) al inicio de la estación de riego (abril), tanto en ambas posiciones de muestreo (Tabla 3.5) como para su media (Figura 3.6). Al final de la estación de riego (septiembre) las HG en T1 y T3 también fueron similares ($p > 0.05$), mientras que la HG en T2 fue menor que en T1 y T3 ($p < 0.05$) a 0 cm, 25 cm y 0 + 25 cm de distancia del gotero (Tabla 3.5 y Figura 3.6).

Tabla 3.6. Porcentajes de variación relativa de la humedad gravimétrica (HG) entre abril y septiembre de 2011 $[(HG \text{ sep} - HG \text{ abr}) / HG \text{ abr}]$ en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G), 25 cm (posición M) y 0 + 25 cm del gotero.

<i>% variación relativa de la HG(%) entre abril y septiembre</i>			
Tratamiento	0 cm	25 cm	0 + 25 cm
T1 (Control)	4	6	5
T2 (RDS)	-11	-14	-13
T3 (RDC)	0	-2	-1

En síntesis, la humedad gravimétrica (HG) de las muestras de suelo analizadas en 2011 fue (1) elevada en general y ligeramente superior en promedio a la humedad a capacidad de campo, (2) mayor a 0 que a 25 cm de distancia al gotero, (3) estable a lo largo de la estación de riego en T1 y T3 y decreciente en T2, y (4) mayor en T1 y T3 que en T2 al final de la estación de riego.

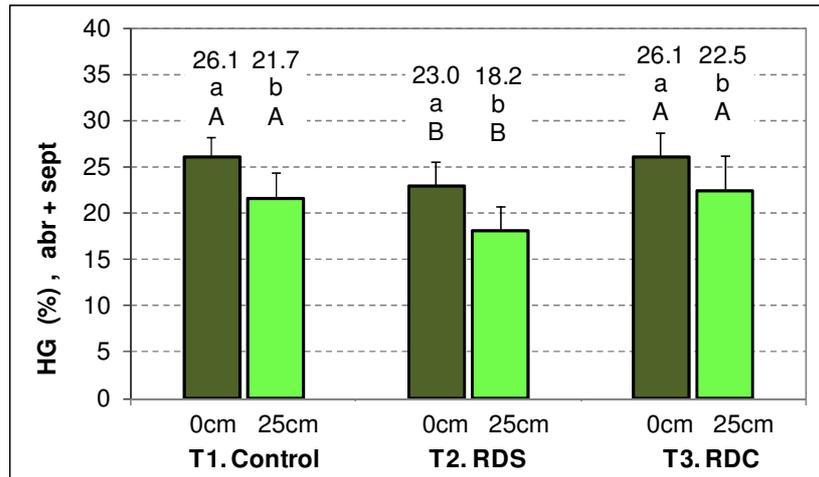


Figura 3.5. Humedad gravimétrica media (HG) de las dos fechas de muestreo (abril + septiembre) del año 2011 medida a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en los tratamientos de riego T1, T2 y T3. Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, posiciones de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

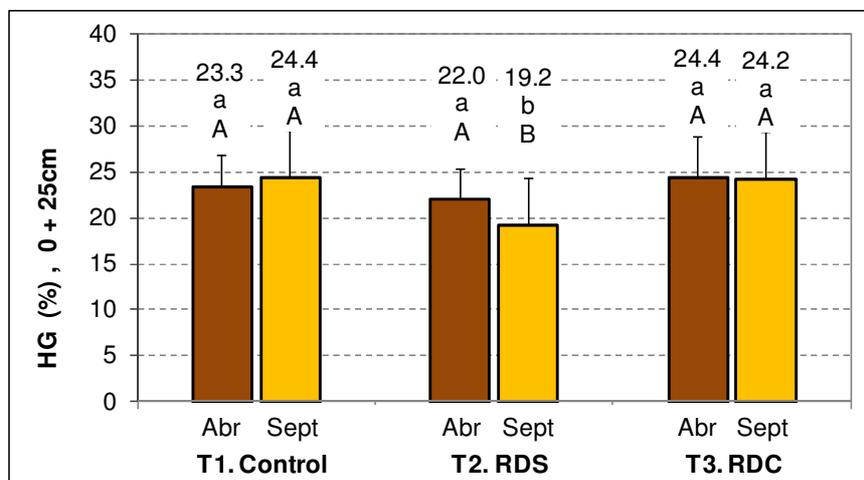


Figura 3.6. Humedad gravimétrica media (HG) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en abril y septiembre de 2011 en los tratamientos de riego T1, T2 y T3. Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

3.4.2 Salinidad

- **Conductividad eléctrica (CEe)**

La Tabla 3.7 presenta para cada bloque (1 a 5) y fecha de muestreo (abril y septiembre) los valores medios de CEe del suelo (0-60 cm de profundidad) medidos en las 12 muestras recogidas. Para cada bloque no hubo diferencias significativas entre fechas de muestreo ($p > 0.05$) aunque sí para su media ($p < 0.05$). Asimismo, para cada fecha de muestreo y para la media de las dos fechas no se encontraron diferencias significativas entre bloques ($p > 0.05$), lo que valida el diseño experimental de bloques al azar empleado en este trabajo.

Tabla 3.7. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CEe) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en cada repetición (Bloque) en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. Para la media de las cinco repeticiones se presentan también el número de muestras (N), la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV). Para cada bloque, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre bloques dentro de cada fecha de muestreo.

<i>Conductividad eléctrica (CEe, dS/m)</i>			
Bloque	Abril	Septiembre	Media
1	3.8 a	4.8 a	4.3
2	4.2 a	4.3 a	4.3
3	3.6 a	4.9 a	4.3
4	3.5 a	4.7 a	4.1
5	3.7 a	4.3 a	4.0
Media	3.8 a	4.6 b	4.2
N	60	60	120
DE	2.1	1.6	1.9
CV	56%	36%	46%

La CEe media de las 60 muestras tomadas en cada fecha de muestreo aumentó ($p < 0.05$) un 21% entre septiembre (4.6 dS/m) y abril (3.8 dS/m). La CEe media del total de muestras (120) recogidas en 2011 fue 4.2 dS/m. El CV de esta media fue muy elevado (46%) debido a que es el resultado de los

valores de CEe medidos sobre muestras compuestas (Figuras 2.5 y 2.6) en tres tratamientos de riego, dos distancias al gotero y dos fechas de muestreo. Esta CEe media de 4.2 dS/m podría suponer descensos potenciales de hasta el 50% de la producción del melocotonero en suelos sin yeso y en torno al 10% en suelos con yeso (FAO, 1985).

La Tabla 3.8 presenta la CEe media de las 10 muestras de suelo recogidas en cada tratamiento, fecha y posición de muestreo. En los tres tratamientos de riego y las dos fechas de muestreo la CEe aumentó con la distancia al gotero, de tal manera que la CEe media de las dos fechas de muestreo fue mayor ($p < 0.05$) a 25 que a 0 cm de distancia al gotero en los tres tratamientos (Figura 3.7). Para la media de los tres tratamientos, la CEe fue un 194% (abril) y un 71% (septiembre) mayor a 25 que a 0 cm (Tabla 3.8). Este incremento de la CEe con la distancia al gotero es típico en sistemas de riego por goteo donde la FL disminuye con la citada distancia (Hanson, 2012)

Para cada tratamiento de riego, los valores de CEe en abril y septiembre fueron similares ($p > 0.05$) a 25 cm del gotero. Aunque las diferencias no fueron significativas, la CEe en septiembre respecto a abril disminuyó un 5% en los tratamientos con mayor volumen de riego (T1 y T3), y aumentó un 19% en el tratamiento con mayor estrés hídrico (T2) (Tabla 3.9). A 0 cm del gotero, la CEe en abril y septiembre fue similar ($p > 0.05$) en T1, pero aumentó ($p < 0.05$) en T3 (incremento relativo del 55%) y, en particular, en T2 (incremento relativo del 198%). La CEe media medida en ambas posiciones de muestreo (0 + 25 cm) fue similar ($p > 0.05$) en abril y septiembre en T1 y T3 (incrementos del 6 y 12%, respectivamente; Tabla 3.9), y un 54% mayor ($p < 0.05$) en septiembre que en abril en T2 (Tabla 3.9 y Figura 3.8).

Estos resultados indican que la CEe a 25 cm del gotero permaneció relativamente estable a lo largo de la estación de riego en todos los tratamientos, mientras que la CEe a 0 cm del gotero aumentó a lo largo de la estación de riego en los tratamientos con mayor estrés hídrico (T2 y, en menor medida, T3). Este mayor incremento de salinidad a 0 que a 25 cm del gotero implicaría que la ETc acumulada (y, por lo tanto, el factor de concentración del agua de riego en el suelo) fue mayor junto al gotero, zona de mayor humedad y menor salinidad. Este incremento a 0 cm del gotero fue máximo en el

tratamiento con mayor estrés hídrico (T2), triplicando prácticamente la CEE en septiembre (4.1 dS/m) respecto a la de abril (1.4 dS/m) (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CEE) medida en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada tratamiento y posición de muestreo, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

		<i>Conductividad eléctrica (CEE, dS/m)</i>			
		Abril		Septiembre	
Tratamiento		0 cm	25 cm	0 cm	25 cm
	N	10	10	10	10
T1 (Control)	Media	2.1 aA	5.8 aA	2.9 aA	5.5 aA
	DE	1.0	0.6	0.9	0.9
	CV	47%	11%	32%	17%
	N	10	10	10	10
T2 (RDS)	Media	1.4 aA	5.6 aA	4.1 bB	6.7 aB
	DE	0.4	1.2	1.1	1.2
	CV	29%	22%	28%	17%
	N	10	10	10	10
T3 (RDC)	Media	2.1 aA	5.5 aA	3.3 bAB	5.2 aA
	DE	1.0	1.1	0.8	1.1
	CV	47%	20%	25%	20%
	N	30	30	30	30
Media	Media	1.9 a	5.6 a	3.4 b	5.8 a
	DE	0.9	1.0	1.1	1.2
	CV	48%	18%	31%	21%
	N	30	30	30	30

Finalmente, la comparación de salinidades entre los tratamientos de riego T1, T2 y T3 indica que los tres tuvieron unas CEE similares ($p > 0.05$) al inicio de la estación de riego (abril), tanto en ambas posiciones de muestreo (Tabla 3.8) como para su media (Figura 3.8). Al final de la estación de riego (septiembre), la CEE del tratamiento T2 fue mayor ($p < 0.05$) que la del

tratamiento T1 a 0 cm, 25 cm y 0 + 25 cm de distancia al gotero (Tabla 3.8 y Figura 3.8), mientras que la CEe del tratamiento T3 fue similar a la del tratamiento T1.

Tabla 3.9. Porcentajes de variación relativa de la CEe entre abril y septiembre de 2011 $[(CEe\ sep - CEe\ abr) / CEe\ abr]$ en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G), 25 cm (posición M) y 0 + 25 cm del gotero.

% variación relativa de la CEe (dS/m) entre abril y septiembre			
Tratamiento	0 cm	25 cm	0 + 25 cm
T1 (Control)	36	-5	6
T2 (RDS)	198	19	54
T3 (RDC)	55	-5	12

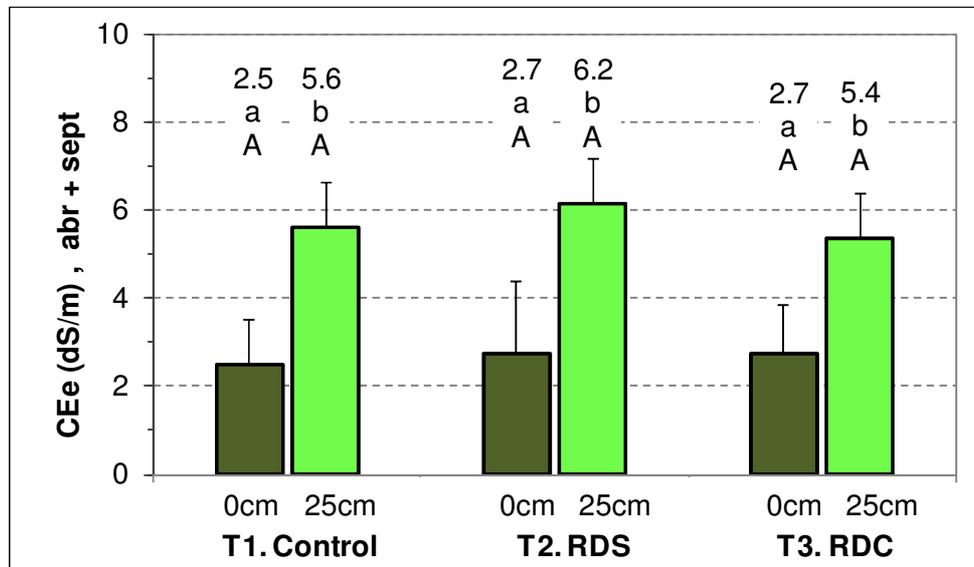


Figura 3.7. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CEe) de las dos fechas de muestreo (abril + septiembre) del año 2011 medida a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, posiciones de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

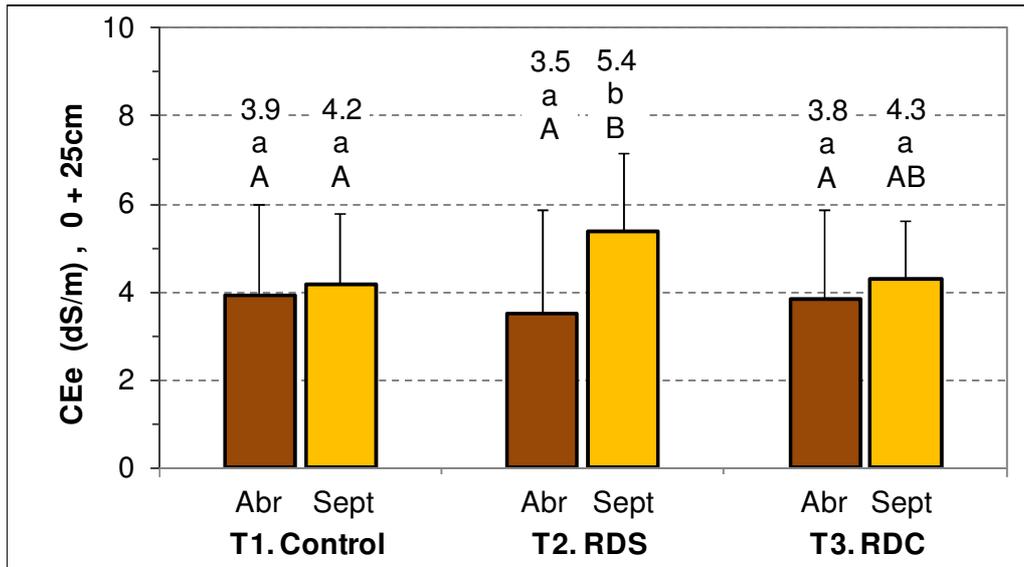


Figura 3.8. Conductividad eléctrica media del extracto saturado del suelo (CEe) de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en abril y septiembre de 2011 en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada tratamiento, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

En síntesis, la salinidad (CEe) de las muestras de suelo analizadas en 2011 fue (1) elevada en promedio (particularmente al final de la estación de riego) y con descensos de producción potencialmente relevantes en melocotonero, (2) mayor a 25 cm que a 0 cm de distancia al gotero, (3) estable a lo largo de la estación de riego en los tres tratamientos de riego a 25 cm de distancia al gotero y a 0 cm del gotero en el tratamiento T1, y creciente a lo largo de la estación de riego a 0 cm de distancia al gotero en los tratamientos T3 y, en particular, T2, y (4) mayor en el tratamiento de riego más deficitario (T2) que en T1 y T3 al final de la estación de riego.

- **Yeso cualitativo**

De las 120 muestras analizadas en las dos fechas de muestreo, 95 (esto es, el 79%) no mostraron presencia de yeso y el resto mostraron presencia más o menos importante de yeso (precipitado blanco más o menos significativo). Este

resultado contrasta con los análisis realizados en años anteriores a este estudio en los que la presencia de yeso según el método de la acetona fue mayoritaria. El hecho de que parte de las muestras tenga yeso complica el análisis de la respuesta productiva del melocotonero a la salinidad edáfica (apartado 3.5.7), ya que los valores proporcionados por FAO (1985) son para suelos sin yeso.

- **Análisis iónicos (Cle, Nae, RASe)**

Para cada parámetro analizado y bloque experimental no se encontraron diferencias ($p > 0.05$) entre fechas de muestreo a excepción del bloque 3 en el análisis de Cle y RASe. Dentro de cada parámetro y fecha de muestreo y para la media de ambas fechas no se encontraron diferencias ($p > 0.05$) entre bloques, por lo que las tablas con estos datos se han omitido en este apartado.

La Tabla 3.10 presenta los valores medios (T1, T2 y T3 a 0 y 25 cm de distancia al gotero) de Cle, Nae y RASe (0-60 cm de profundidad) medidos en abril y septiembre. En todas los parámetros, el aumento entre abril y septiembre fue significativo ($p < 0.05$). Los valores medios de las 120 muestras analizadas fueron 17.4 meq/l (Cle), 19.8 meq/l (Nae) y 5.7 (mmol/l)^{0.5} (RASe). Estos valores de Cle y Nae son elevados y con un efecto potencialmente negativo sobre el rendimiento del melocotonero, sensible a cloruro y sodio (FAO, 1985). El valor de RASe es relativamente bajo, aunque según FAO (1985) puede inducir a la pérdida de estabilidad estructural de suelos sensibles sujetos a aguas de baja salinidad.

La Tabla 3.11 presenta los valores de Cle, Nae y RASe medios medidos en las 10 muestras de suelo recogidas en cada tratamiento, fecha y posición de muestreo. Todos los valores aumentaron con la distancia al gotero, de tal manera que las medias de las dos fechas de muestreo fueron mayores ($p < 0.05$) a 25 que a 0 cm de distancia al gotero en los tres tratamientos (Figura 3.9). Para la media de los tres tratamientos, los valores en abril fueron entre 8 y 4 veces superiores a 25 que a 0 cm, mientras que en septiembre fueron unas dos veces superiores a 25 que a 0 cm del gotero. Estos resultados coinciden con los obtenidos para la CEE y son consistentes con el descenso de la FL con la mayor distancia al gotero.

Tabla 3.10. Concentración media en el extracto saturado del suelo del cloruro (Cle), sodio (Nae) y relación de adsorción de sodio (RASe) de las muestras de suelo recogidas en los tres tratamientos de riego a 0 cm (posición G) y 25 cm del gotero (posición M) al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada parámetro analítico, fechas de muestreo con distinta letra tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

<i>Análisis iónicos en el extracto saturado del suelo</i>				
		Abril	Septiembre	Media
Cle (meq/l)	N	60	60	120
	Media	14.2 a	20.6 b	17.4
	DE	12.6	11.6	12.5
	CV	89%	56%	72%
Nae (meq/l)	N	60	60	120
	Media	17.5 a	22.1 b	19.8
	DE	13.7	10.5	12.3
	CV	78%	47%	62%
RASe [(mmol/l) ^{0.5}]	N	60	60	120
	Media	5.2 a	6.3 b	5.7
	DE	3.4	2.4	2.9
	CV	65%	38%	51%

Al igual que con la CEe, los valores de Cle, Nae y RASe a lo largo de la estación de riego a 25 cm del gotero fueron relativamente estables en T1 y T3 (ligeros descensos relativos de entre el 3 y el 14%, Tabla 3.12) y aumentaron de forma suave en T2 (incrementos entre el 14 y 49% según parámetros, Tabla 3.12). Sin embargo, los aumentos a 0 cm del gotero fueron muy elevados en los tres tratamientos y, en particular, el Cle en el tratamiento T2 donde el incremento relativo fue del 430% (Tabla 3.12). La Figura 3.10 ilustra asimismo los valores de Cle, Nae y RASe en abril y septiembre para la media a 0 y 25 cm del gotero. Como para la CEe, los valores de Cle, Nae y RASe fueron similares ($p > 0.05$) en abril y septiembre en T1 y T3 y distintos ($p < 0.05$) en T2.

Tabla 3.11. Concentración media en el extracto saturado del suelo del cloruro (Cle), sodio (Nae) y relación de adsorción de sodio (RASE) medida en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en las muestras recogidas al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego del año 2011. N = número de muestras, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada parámetro analítico, tratamiento y posición de muestreo, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada parámetro analítico, fecha y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

<i>Análisis iónicos en el extracto saturado del suelo</i>													
Tratam.		Cle (meq/l)				Nae (meq/l)				RASE [(mmol/l) ^{0.5}]			
		Abril		Sept		Abril		Sept		Abril		Sept	
		0	25	0	25	0	25	0	25	0	25	0	25
T1 (Control)	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	3.2	25.1	10.0	24.3	5.2	30.9	10.9	28.2	2.0	8.5	3.7	7.7
		aA	aA	bA	aA	aA	aA	bA	aA	aA	aA	bA	aA
	DE	0.7	6.2	3.0	6.6	1.5	6.1	2.2	6.6	0.6	1.7	0.5	1.6
	CV	22%	25%	30%	27%	29%	20%	21%	23%	29%	21%	14%	20%
T2 (RDS)	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	3.1	25.4	16.6	37.8	4.9	29.7	20.6	36.3	2.5	8.1	6.4	9.3
		aA	aA	bB	bB	aA	aA	bB	aB	aA	aA	bB	aA
	DE	1.1	10.2	4.8	10.4	1.0	10.2	6.3	7.0	0.7	2.6	1.4	1.2
	CV	36%	40%	29%	28%	21%	34%	30%	19%	30%	32%	22%	13%
T3 (RDC)	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Media	3.7	24.5	11.2	23.8	5.6	28.4	12.0	24.5	2.2	7.8	3.8	6.6
		aA	aA	bA	aA	aA	aA	bA	aA	aA	aA	bA	aA
	DE	1.2	10.6	3.3	9.7	1.5	9.0	3.0	6.6	0.7	2.2	0.9	1.7
	CV	33%	43%	29%	41%	27%	32%	25%	27%	32%	29%	23%	25%
Media	N	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Media	3.3	25.0	12.6	28.6	5.3	29.7	14.5	29.7	2.2	8.1	4.6	7.9
		a	a	b	a	a	a	b	a	a	a	b	a
	DE	1.0	8.9	4.7	10.9	1.4	8.4	6.0	8.2	0.7	2.1	1.6	1.8
	CV	31%	36%	37%	38%	26%	28%	41%	28%	31%	26%	34%	23%

Finalmente, para cada parámetro analizado la comparación entre tratamientos de riego indica que los tres tuvieron valores similares ($p > 0.05$) al inicio de la estación de riego tanto en ambas posiciones de muestreo (Tabla 3.11) como para su media (Figura 3.10). Al final de la estación de riego

(septiembre) las concentraciones medias en T1 y T3 también fueron similares ($p > 0.05$), mientras que en T2 fueron mayores ($p < 0.05$), a 0, 25 y 0 + 25 cm de distancia del gotero (Tabla 3.11 y Figura 3.10).

Tabla 3.12. Porcentajes de variación relativa de Cle, Nae y RASe entre abril y septiembre $[(Y \text{ sep} - Y \text{ abr})/Y \text{ abr}]$ en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) y para la media de los tres tratamientos a 0 cm (posición G), 25 cm (posición M) y 0+25 cm del gotero.

% variación relativa de Cle, Nae y RASe entre abril y septiembre									
Tratamiento	Cle (meq/l)			Nae (meq/l)			RASe [(mmol/l) ⁰⁵]		
	0	25	0+25	0	25	0+25	0	25	0+25
T1 (Control)	209	-3	21	108	-9	8	85	-9	9
T2 (RDS)	430	49	91	317	22	64	158	14	47
T3 (RDC)	205	-3	24	114	-14	7	71	-14	4
Media	276	15	45	176	0	26	107	-3	21

La Figura 3.11 presenta las regresiones lineales de Nae con Cle, y de Cle, Nae y RASe con CEe para las 120 muestras analizadas en el año 2011. Todas las regresiones son altamente significativas ($p < 0.001$) y las ecuaciones forzadas por el origen indican que los iones Na y Cl están ligados entre sí (pendiente = 1), mientras que la salinidad total (CEe) viene expresada en proporciones similares de Na y Cl (pendientes próximas a 5). Finalmente, la pendiente mayor que uno para la ecuación entre RASe y CEe indica que la sodicidad del suelo aumenta proporcionalmente más que la salinidad debido a la precipitación selectiva de minerales de calcio conforme se evapo-concentra la solución del suelo. Estas ecuaciones son útiles para futuras estimas del Cle, Nae y RASe a partir de la medida mucho más sencilla de la CEe.

En síntesis, los resultados obtenidos para el Cle, Nae y RASe son cualitativamente similares a los obtenidos con CEe, pero los incrementos de Cle (y en menor medida de Nae) a lo largo de la estación de riego fueron muy superiores a los obtenidos con la CEe debido a que estos iones no precipitan en sus procesos de evapo-concentración.

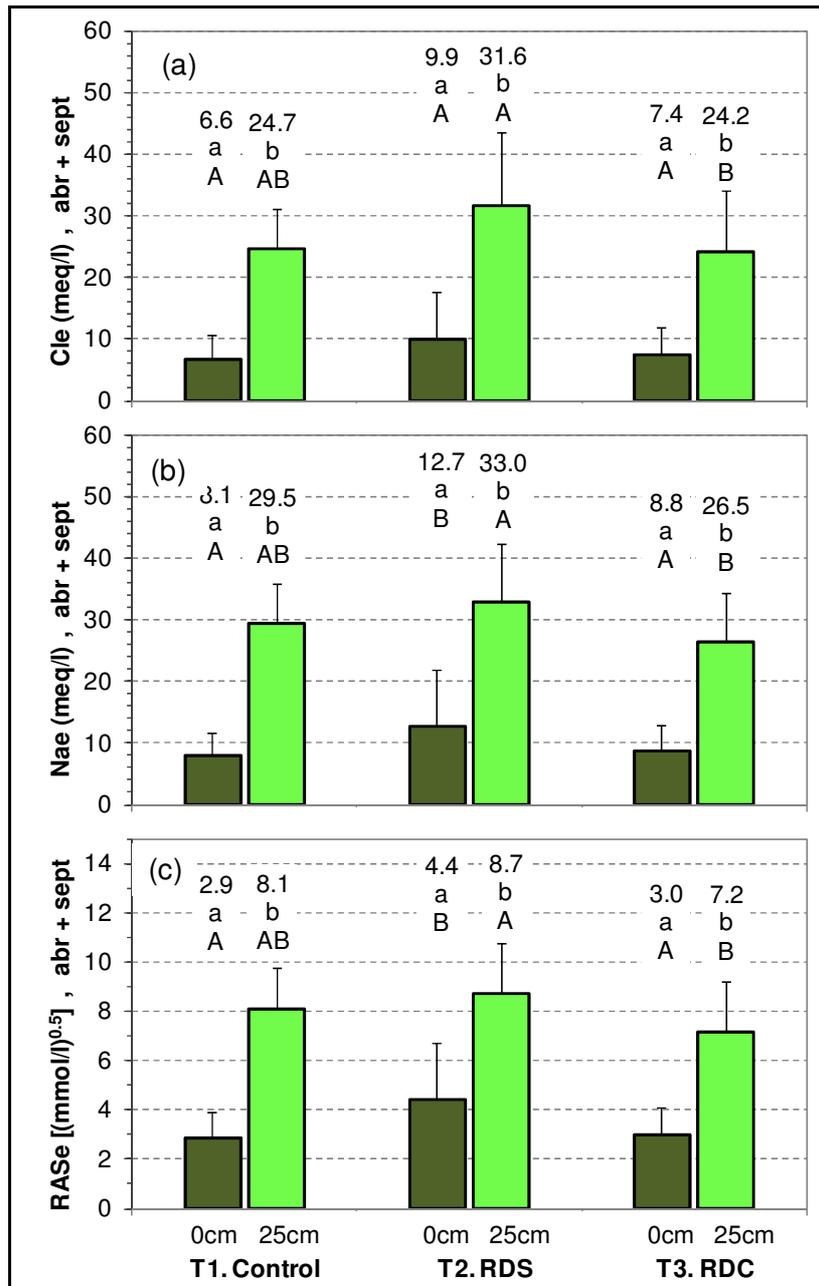


Figura 3.9. Concentración media en el extracto saturado del suelo de (a) Cl⁻ (b) Na⁺ y (c) RASe de las dos fechas de muestreo (abril + septiembre) del año 2011 medida a 0 cm (posición G) y 25 cm (posición M) del gotero en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada parámetro analítico y tratamiento, posiciones de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada parámetro analítico y posición de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

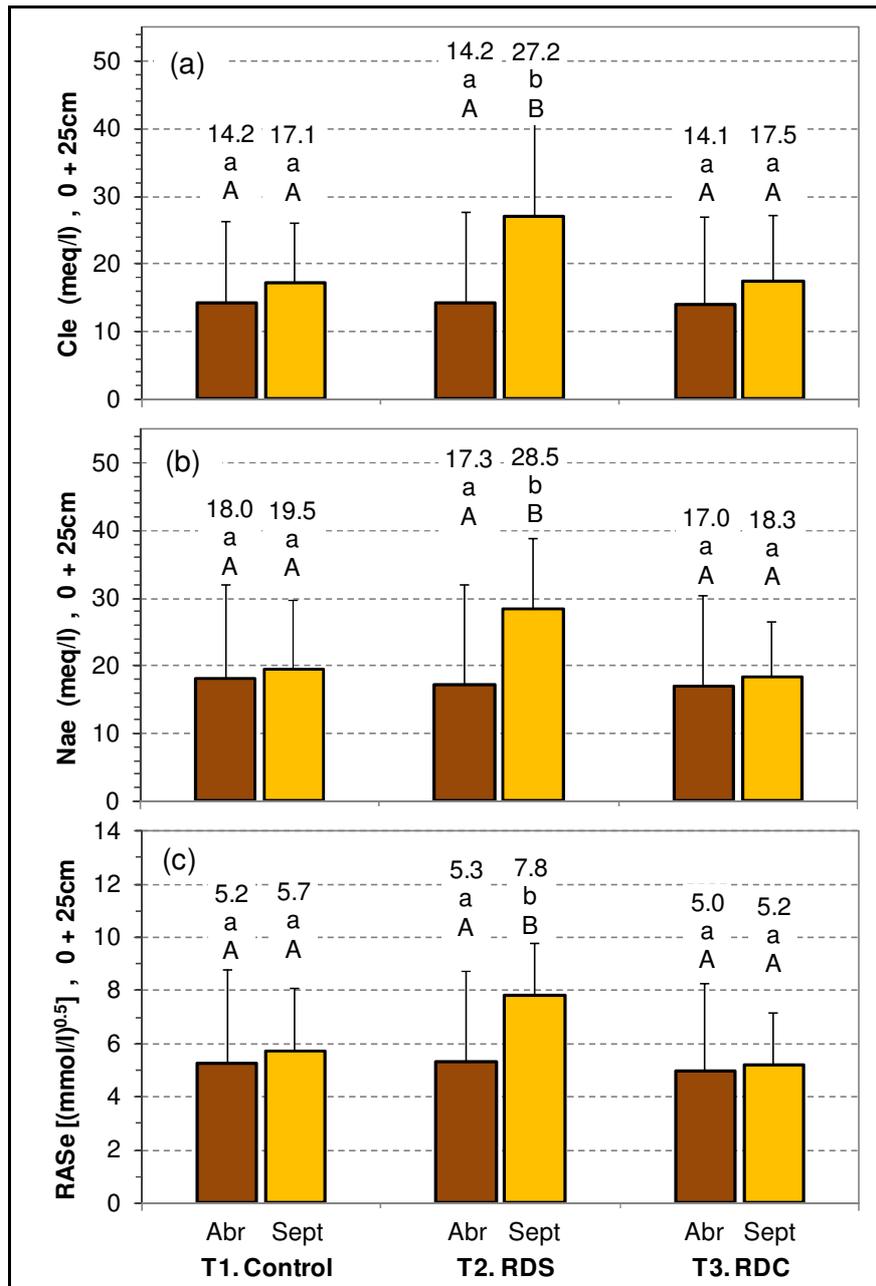


Figura 3.10. Concentración media en el extracto saturado del suelo de (a) Cl⁻ (b) Na⁺ y (c) RASe de las dos distancias al gotero (0 + 25 cm) medida en abril y septiembre de 2011 en los tratamientos de riego T1 (Control), T2 (RDS) y T3 (RDC). Los segmentos verticales indican una desviación estándar de la media. Para cada parámetro analítico y tratamiento, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada parámetro analítico y fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

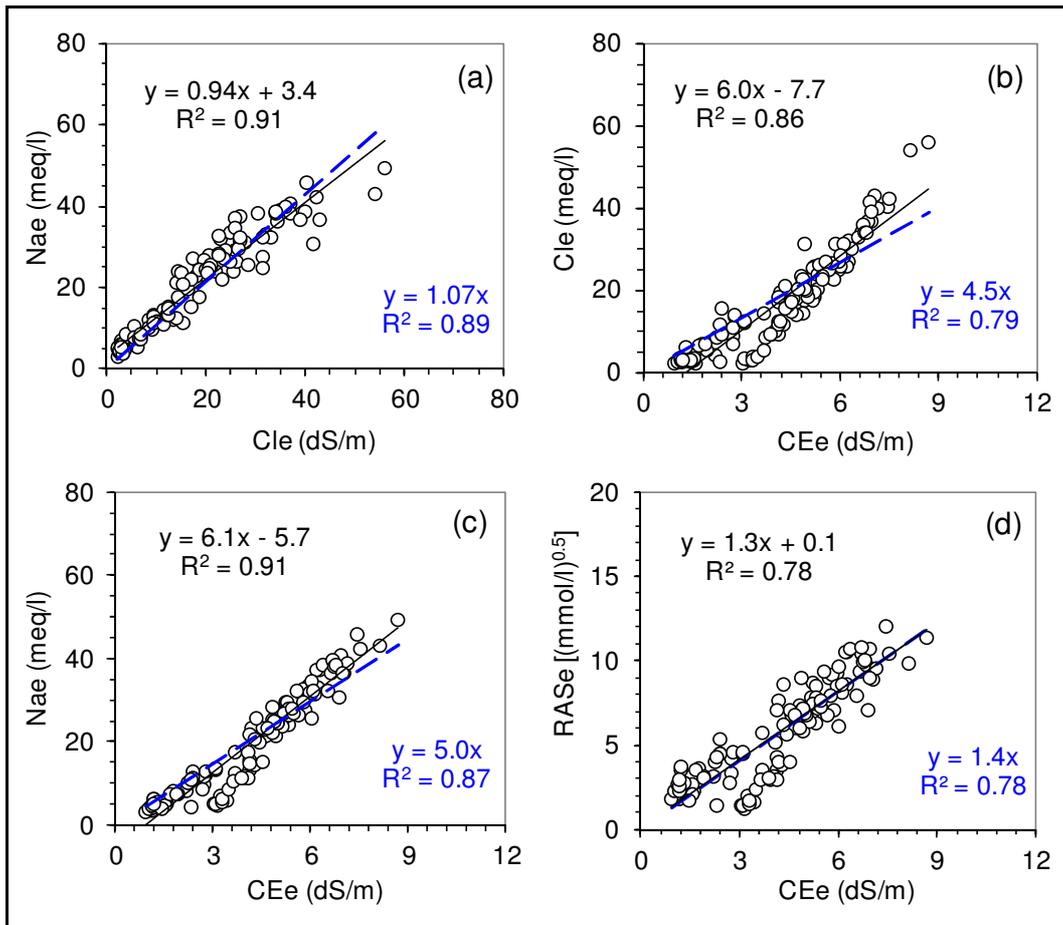


Figura 3.11. Regresiones lineales normales y forzadas por el origen de (a) Cle vs. Nae, (b) CEe vs. Cle, (c) CEe vs. Nae y (d) CEe vs. RASe para todas las muestras de suelo recogidas en el año 2011.

3.4.3 Relación salinidad (CEe) - humedad gravimétrica (HG)

La Figura 3.12 muestra que la CEe y la HG de las 119 muestras de suelos recogidas en 2011 estuvieron correlacionadas ($p < 0.001$), significando que la salinidad tendió a aumentar potencialmente con el descenso de la humedad.

Dado que el descenso de humedad por debajo de capacidad de campo debe atribuirse fundamentalmente a la ETc, esta relación indica que la razón principal para la salinización del suelo en este estudio fue la evapoconcentración inducida por el efecto combinado de la evaporación de agua del suelo (E) y la transpiración del melocotonero (Tc) que, en ambos casos, concentran la masa de sales disueltas en la solución del suelo en un volumen de agua inferior conforme mayor es la ETc.

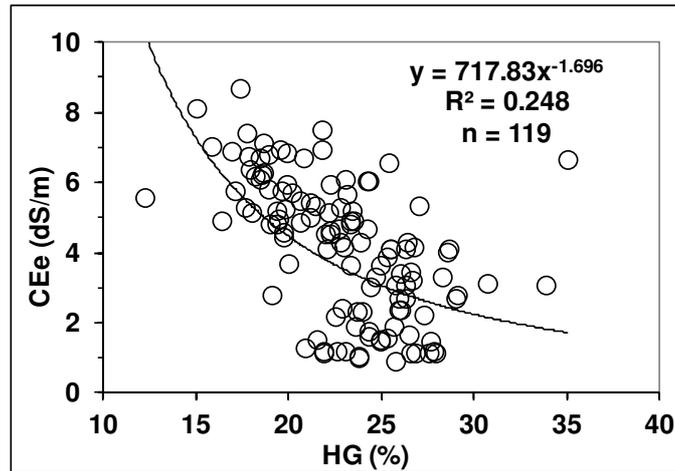


Figura 3.12. Regresión potencial de HG vs. CEe para el conjunto de todas las muestras de suelo recogidas en 2011.

3.4.4 Relación salinidad (CEe) – fracción de lavado (FL) – déficit hídrico (DH)

Con el propósito de evaluar en profundidad la relación de la CEe con la FL y el DH, se han analizado no solo los datos de este trabajo obtenidos en la estación de riego del año 2011 (ER 2011), sino también la información generada en el proyecto Rideco para las estaciones de ‘no riego’ (ENR) anterior (ENR 2010-2011) y posterior (ENR 2011-2012) a la ER 2011. La Tabla 3.13 presenta, para cada fecha de muestreo, la CEe media de las 20 muestras analizadas en cada tratamiento de riego (5 bloques x 2 árboles por bloque x 2 posiciones muestreo), así como los valores de R, P, ETc, FL y DH calculados para los períodos entre fechas de muestreo.

La CEe disminuyó en todos los tratamientos de riego durante la ENR 2010-2011 aunque solo de manera significativa ($p < 0.05$) en el tratamiento T2 debido a una P relativamente elevada (191 mm) y una ETc relativamente baja (168 mm) que facilitó el lavado de las sales acumuladas al final de la ER 2010. Este lavado de sales es coherente con las elevadas FL y bajos DH calculados en dicho período (Tabla 3.13). Por el contrario, la CEe aumentó durante la ER 2011 debido fundamentalmente a la elevada ETc, aunque dicho aumento solo fue significativo ($p < 0.05$) en el tratamiento T2, de tal manera que al final de este período la CEe en T2 fue superior ($p < 0.05$) a la CEe en T1 y T3. La menor FL y mayor DH en T2 que en T1 y T3 (Tabla 3.13) está de acuerdo con estos resultados.

Tabla 3.13. Valores medios de CEe en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) medidos en cada fecha de muestreo inicial y final de la estación de no riego (ENR) 2010-2011, estación de riego (ER) 2011 y estación de no riego (ENR) 2011-2012. Los valores de riego (R), precipitación (P), evapotranspiración (ETc), fracción de lavado (FL) y déficit hídrico (DH) se han calculado para los períodos entre fechas de muestreo. Se presentan asimismo los días acumulados entre fechas de muestreo. Para cada tratamiento de riego, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen medias de CEe significativamente diferentes ($p < 0.05$) con respecto al muestreo anterior. Para cada fecha de muestreo, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen medias de CEe significativamente diferentes ($p < 0.05$).

<i>Cálculo de FL y DH en las estaciones de riego (ER) y no riego ENR)</i>					
Estación		ENR 2010-2011	ER 2011	ENR 2011-2012	
Fecha de muestreo		22-9-10	7-4-11	13-9-11	23-2-12
Días acumulados		197	159	163	
CEe (dS/m)	T1 (Control)	4.7 aA	3.9 aA	4.2 aA	5.3 bA
	T2 (RDS)	5.1 aA	3.5 bA	5.4 cB	5.7 cA
	T3 (RDC)	4.4 aA	3.8 aA	4.3 aAB	5.5 bA
R (mm)	T1 (Control)	73	627	81	
	T2 (RDS)	45	363	47	
	T3 (RDC)	71	568	77	
P (mm)	T1 (Control)	191	171	89	
	T2 (RDS)	191	171	89	
	T3 (RDC)	191	171	89	
ETc (mm)	T1 (Control)	168	784	191	
	T2 (RDS)	168	784	191	
	T3 (RDC)	168	784	191	
FL	T1 (Control)	0.36	0.02	-0.12	
	T2 (RDS)	0.29	-0.47	-0.41	
	T3 (RDC)	0.36	-0.06	-0.15	
DH (mm)	T1 (Control)	-96	-14	21	
	T2 (RDS)	-68	250	55	
	T3 (RDC)	-94	45	25	

La CEe aumentó ($p < 0.05$) en los tratamientos de riego T1 y T3 durante la ENR 2011-2012 y fue similar en T2, un resultado no previsto que contradice la idea general de que la salinidad tiende a disminuir en los períodos de no riego (Aragüés *et al.*, 2014) debido al lavado de sales producido por las lluvias en períodos de baja ETc. Sin embargo, la P en esta ENR 2011-2012 fue inusualmente baja (89 mm) y la ETc superior a la normal (191 mm), lo que provocó bajas FL y elevados DH y, por consiguiente, la acumulación en vez del lavado previsto de sales.

A modo de síntesis, la Figura 3.13 presenta para cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) la evolución de la CEe media a lo largo del período estudiado y las FL medias calculadas para cada período entre las fechas de muestreo del suelo. Los tratamientos T1 (Control) y T3 (RDS) tuvieron una evolución similar debido al escaso ahorro de agua en el tratamiento T3 de apenas 59 mm (9% del riego en T1). El tratamiento RDS, donde el ahorro de agua fue mayor (42% del riego en T1) y por tanto la FL menor, mostró aumentos y descensos mas acusados aunque diferentes ($p < 0.05$) a los tratamientos T1 y T3 únicamente en el muestreo de septiembre de 2011.

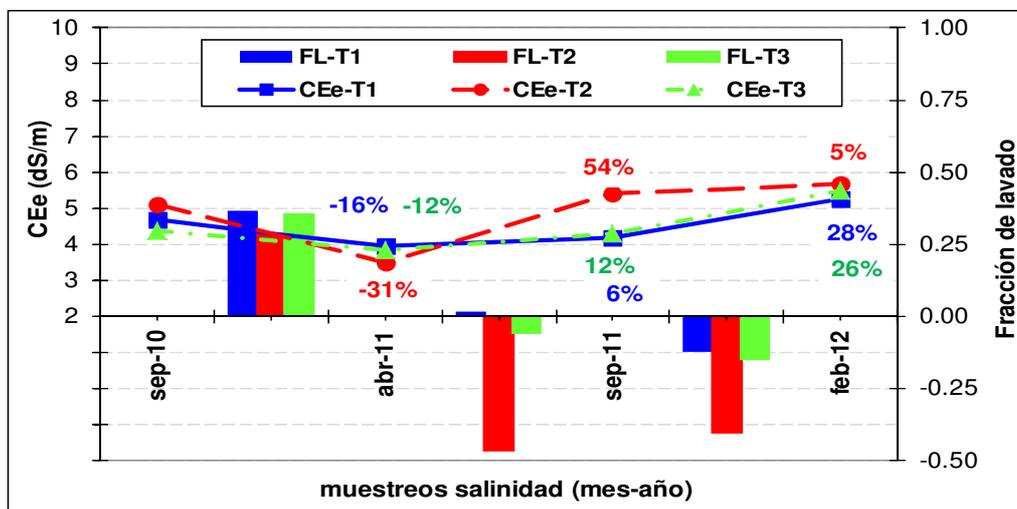


Figura 3.13. Conductividad eléctrica media (0 + 25 cm de distancia al gotero) del extracto saturado del suelo (CEe) medida en los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en cada una de las cuatro fechas de muestreo, y fracción de lavado calculada entre fechas de muestreo. Se presentan asimismo las variaciones relativas de CEe en abril 2011 respecto a septiembre 2010, septiembre 2011 respecto a abril 2011, y febrero 2012 respecto a septiembre 2011.

De igual manera, la Figura 3.14 presenta para cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) la evolución de la CEe media a lo largo del período estudiado y los DH medios calculados para cada período entre las fechas de muestreo del suelo. En esta figura se observa claramente que la CEe tendió a disminuir en los períodos con menor DH y a aumentar en los períodos con mayor DH. En particular, el mayor incremento de CEe (54%) observado para T2 en la ER 2011 coincide con el mayor DH (250 mm) calculado para dicho período.

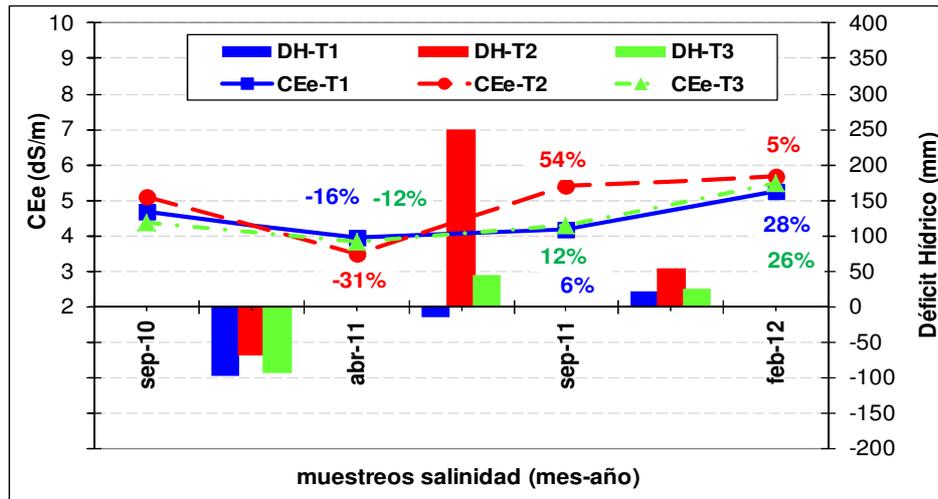


Figura 3.14. Conductividad eléctrica media (0 + 25 cm de distancia al gotero) del extracto saturado de suelo (CEe) medida en los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en cada una de las cuatro fechas de muestreo, y déficit hídrico calculado entre fechas de muestreo. Se presentan asimismo las variaciones relativas de CEe en abril 2011 respecto a septiembre 2010, septiembre 2011 respecto a abril 2011, y febrero 2012 respecto a septiembre 2011.

La Figura 3.15 presenta las regresiones lineales de la variación porcentual diaria de la CEe media (0+25 cm del gotero) (Δ CEe) con la FL y el DH del conjunto de valores de la estación de riego (ER) y de no riego (ENR) para los tratamientos de riego T1, T2 y T3. Esta variación porcentual se ha normalizado en base a períodos diarios para tener en cuenta los diferentes días acumulados entre las fechas de muestreo (Tabla 3.13).

Tal como cabía esperar de la información presentada en las Figuras 3.13 y 3.14, las ecuaciones de regresión lineal presentadas en la Figura 3.15 indican que Δ CEe aumentó significativamente conforme menor fue la FL ($p < 0.01$) y mayor fue el DH ($p < 0.002$). De acuerdo con el coeficiente de determinación de

estas ecuaciones, en torno al 70% de la variabilidad de ΔCEe viene explicado por el modelo de regresión ajustado en estas figuras. Este valor del 70% es muy elevado teniendo en cuenta todas las simplificaciones inherentes al cálculo de la FL y del DH.

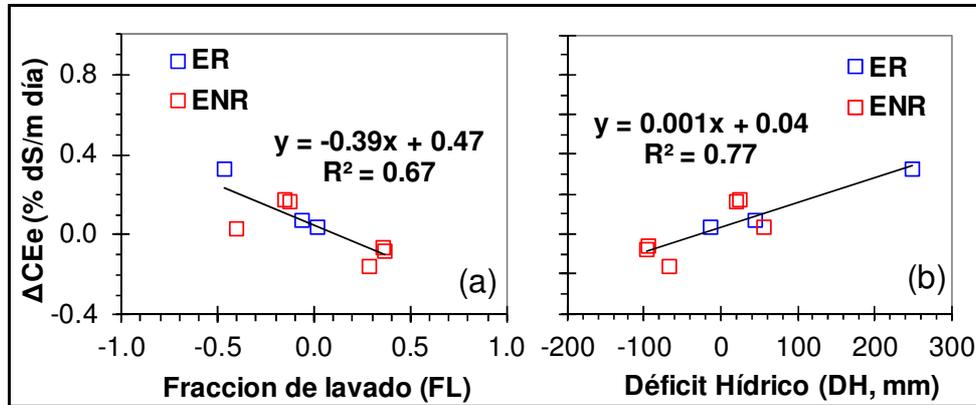


Figura 3.15. Regresiones lineales de la variación porcentual diaria de la CEe media (0 + 25 cm de distancia al gotero) (ΔCEe) con (a) la fracción de lavado (FL) y (b) el déficit hídrico (DH) del conjunto de valores de la estación de riego (ER) y de no riego (ENR) para los tratamientos de riego T1, T2 y T3.

La conclusión fundamental de estos resultados es que en base a dos parámetros como la FL y el DH, muy sencillos de calcular a partir de tan solo tres variables (R, P y ETc), puede estimarse de forma robusta la tendencia a la salinización o al lavado del suelo, y que conociendo la salinidad al inicio de la estación de riego, las ecuaciones presentadas en la Figura 3.15 anticipan el volumen de riego necesario para obtener unos valores finales de salinidad compatibles con el máximo rendimiento del melocotonero en ambientes edafoclimáticos y de manejo del riego similares a los de este trabajo.

En síntesis, durante la estación de riego la salinización del suelo en la zona de raíces del melocotonero regado por goteo con aguas de salinidad moderada ($\text{CE media} = 1.1 \text{ dS/m}$) es un problema potencialmente relevante. El nivel de gravedad de este problema depende básicamente del déficit hídrico y de la fracción de lavado que, bajo unas características climáticas determinadas, únicamente se pueden controlar con un manejo adecuado del riego (aumentándolo si el suelo tiende a salinizarse) y/o de la evaporación (reduciéndola mediante el acolchado si el suelo tiende a salinizarse). Si se desea reducir el riego durante la estación de riego debido a restricciones de

agua o a posibles beneficios del riego deficitario sobre la calidad del fruto, el control de la salinización del suelo puede alcanzarse mediante el riego fuera de la estación de riego.

En el caso de dotaciones de riego insuficientes, particularmente en zonas áridas o semiáridas caracterizadas por bajas precipitaciones y elevadas evapotranspiraciones, los riegos deficitarios severos (como el riego deficitario sostenido analizado en este trabajo) podrían producir graves problemas para el rendimiento de los cultivos (incremento de la salinidad y de los iones tóxicos Cl y Na) y la estructura del suelo (incremento de la sodicidad).

3.5 ÁRBOL

3.5.1 Fenología

La caracterización de la fenología se realizó con el fin de delimitar el comienzo y fin de los periodos críticos del cultivo al estrés hídrico y, en particular, de la fase II del melocotonero que corresponde al endurecimiento de hueso, momento en el que se aplicó el 50% de la dosis de riego en el T3 (RDC). La Tabla 3.14 resume las fechas de los principales estados fenológicos del melocotonero, siendo éstas similares a las observadas en años anteriores en la finca de estudio a excepción de la cosecha, la cual se adelantó unos 10 días en el año 2011 con respecto a otros años. No se observaron diferencias en la fenología entre los diferentes tratamientos de riego.

Tabla 3.14. Fechas de los principales estados fenológicos en el melocotonero en el año 2011.

<i>Fenología del melocotonero en el año 2011</i>	
Estado fenológico	Fecha
Brotación	01-mar-11
Floración	31-mar-11
Inicio endurecimiento hueso	11-may-11
Fin endurecimiento hueso	09-jun-11
Envero	24-ago-11
	01-sep-11
Cosecha	05-sep-11
	12-sep-11
Inicio de caída de hoja	22-nov-11

3.5.2 PAR interceptado

La Figura 3.16 muestra la evolución de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (IPAR) a lo largo de la estación de riego del año 2011. Las medidas se realizaron desde el 31 de marzo hasta el 29 de septiembre de 2011, cada 7 ó 15 días, en función del nivel despejado del cielo.

Los valores de IPAR aumentaron de manera progresiva hasta el mes de junio (día juliano 179), para mantenerse posteriormente dentro de un rango más o menos estable que supondría entre el 50% y 60% de suelo sombreado.

Los tratamientos T1 (Control) y T2 (RDC) tuvieron valores muy similares de IPAR durante la estación de riego, siendo superiores a los observados en el tratamiento T2 (RDS), sobre todo a partir del día juliano 180. Estos resultados sugieren que el RDS redujo el vigor del árbol. Sin embargo, sólo se realizaron medidas de IPAR sobre un árbol por tratamiento, por lo que las diferencias observadas pueden ser debidas a otros factores distintos al riego aplicado.

Para el cálculo del IPAR se tomó la media de los tres árboles como valor representativo para el conjunto de la parcela, obteniéndose la ecuación polinómica de la Figura 3.16 que se utilizó para calcular los valores de IPAR diarios.

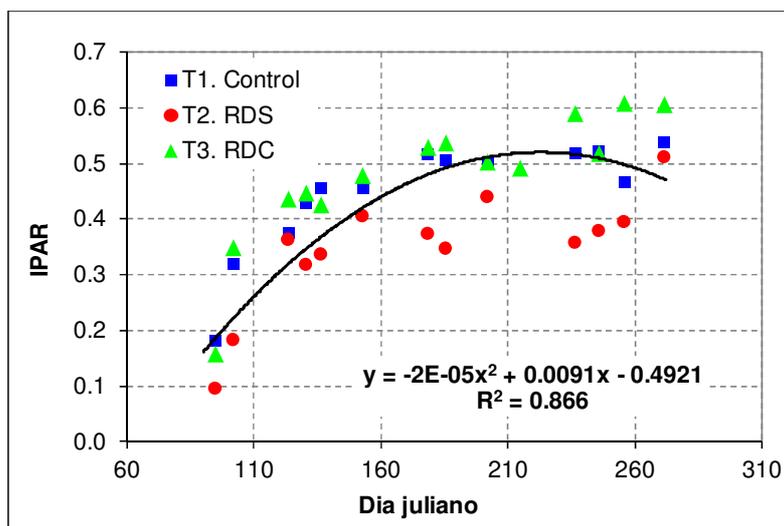


Figura 3.16. Evolución del PAR interceptado por el cultivo (IPAR) a lo largo de la estación de riego del año 2011.

Los valores medios de IPAR en cada uno de los cuatro periodos de crecimiento del melocotonero se estimaron de la siguiente manera:

- (1) Inicio de año a floración: Se consideró un IPAR constante de 0.115, que corresponde a la fracción de suelo sombreado por el tronco y las ramas desnudas del árbol para los días julianos entre 1 y 82.
- (2) Floración a inicio de caída de hojas: el IPAR se calculó con la ecuación polinómica de la Figura 3.16 para los días julianos entre 83 y 304.
- (3) Inicio de caída de hojas a caída total de hojas: Se interpolaron los datos linealmente entre los días julianos 305 y 325 hasta un valor final de IPAR de 0.115 del árbol desnudo.
- (4) Caída total de hojas a final de año: Se consideró de nuevo un valor constante de IPAR de 0.115 para los días julianos entre 326 y 365.

3.5.3 Evapotranspiración del cultivo

A partir de los datos diarios de IPAR se calcularon los valores diarios del coeficiente de cultivo (K_c) del melocotonero mediante la ecuación (5) presentada en Material y métodos. Siguiendo la metodología FAO, multiplicando éstos K_c por la ET_o diaria proporcionada por la Oficina del Regante, se estimó la ET_c diaria del melocotonero mediante la ecuación (4) presentada en Material y métodos. Los valores diarios de ET_o y ET_c se presentan en la Figura 3.17.

La ET_o presentó una alta variabilidad influenciada por la variación diaria de los datos meteorológicos. La ET_c siguió un patrón de distribución normal, con valores mínimos de entre 0 y 1 mm/día hasta el día juliano 70, y aumentando progresivamente a partir de esa fecha hasta alcanzar valores máximos de 7-8 mm/día en los meses de julio y agosto (días julianos entre 200 y 230). Posteriormente, la ET_c disminuyó progresivamente hasta alcanzar valores mínimos de entre 0 y 1 mm/día en los meses de noviembre y diciembre (a partir del día juliano 300).

La Tabla 3.15 presenta los valores medios mensuales de K_c , y los valores mensuales totales de ET_o y ET_c . Para el año 2011, los valores acumulados de ET_o y ET_c fueron 1437 mm y 1007 mm, respectivamente.

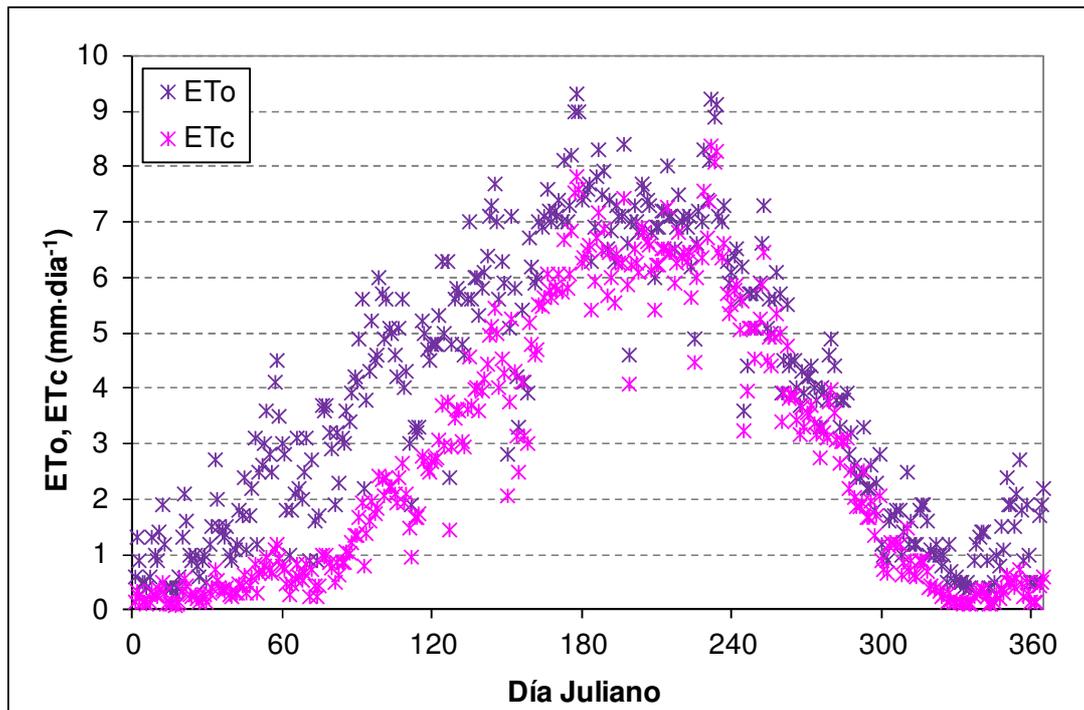


Figura 3.17. Evolución diaria de la evapotranspiración de referencia (ETo) y de la evapotranspiración del melocotonero (ETc) en el año 2011.

Tabla 3.15. Valores medios mensuales del coeficiente de cultivo (K_c) y valores totales mensuales y anuales de la evapotranspiración de referencia (ETo) y de la evapotranspiración del melocotonero (ETc) en el año 2011.

Mes	K_c	ETo (mm)	ETc (mm)
Ene	0.27	27.9	7.4
Feb	0.27	60.4	16.0
Mar	0.27	83.0	23.1
Abr	0.45	134.1	60.4
May	0.66	174.8	115.0
Jun	0.80	202.9	163.1
Jul	0.88	220.1	194.0
Ago	0.91	219.5	199.1
Sep	0.87	149.3	130.4
Oct	0.78	90.8	71.6
Nov	0.42	35.1	16.5
Dic	0.27	39.0	10.3
Anual		1436.9	1006.9

3.5.4 Sección de tronco

La Tabla 3.16 muestra que la sección media de tronco fue similar ($p > 0.05$) entre tratamientos de riego al inicio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego. El crecimiento relativo, calculado como la variación relativa en septiembre respecto a abril según la ecuación (6), fue igual en los tratamientos de riego deficitario (15%) y ligeramente superior al tratamiento control (14%) aunque sin diferencias estadísticas entre ellos ($p > 0.05$).

Tabla 3.16. Sección media del tronco inicial (Si) y final (Sf), y crecimiento relativo del tronco (C.Rel) en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. N = número de árboles. Para cada variable analizada, no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

<i>Sección de tronco</i>				
Tratamiento	N	Si (cm ²)	Sf (cm ²)	C.Rel
T1 (Control)	10	86.8	98.7	0.138
T2 (RDS)	10	82.5	95.2	0.152
T3 (RDC)	10	79.6	92.0	0.152
Media	30	83.0	95.3	0.147

La Tabla 3.17 indica que tampoco se encontraron diferencias en la sección de tronco entre repeticiones (bloque) al inicio y final de la estación de riego ni en el crecimiento relativo, lo que valida el diseño experimental empleado. El mayor valor de sección encontrado en el bloque 5 corresponde a un árbol cuyo diámetro de tronco ($Si = 161 \text{ cm}^2$) duplicó al valor medio ($Si = 83 \text{ cm}^2$), aunque su crecimiento relativo fue igual que en el resto de árboles. En síntesis, estos resultados indican que el crecimiento de los árboles no se vio afectado por los tratamientos de riego.

Tabla 3.17. Sección media del tronco inicial (Si) y final (Sf) y crecimiento relativo del tronco (C.Rel) en cada repetición (Bloque) en el año 2011. N = número de árboles. Para cada variable analizada, no hay diferencias significativas entre bloques ($p > 0.05$).

<i>Sección de tronco</i>				
Bloque	N	Si (cm ²)	Sf (cm ²)	C.Rel
1	6	74.1	84.1	0.137
2	6	85.2	98.7	0.154
3	6	77.7	89.5	0.153
4	6	77.0	88.0	0.140
5	6	100.9	116.2	0.152
Media	30	83.0	95.3	0.147

3.5.5 Frutos: producción, precocidad, productividad, eficiencia del uso del agua

La Tabla 3.18 muestra la producción total acumulada, el peso medio de fruto y el número de frutos obtenidos en cada tratamiento de riego y para su media. Los tratamientos de riego no tuvieron un efecto significativo en ninguna de las variables analizadas ($p > 0.05$). Asimismo, según la Tabla 3.19 no se encontraron diferencias significativas para ninguna de las variables estudiadas entre repeticiones (bloques), validando el diseño experimental.

El tratamiento T1 (Control), con 9 en vez de 10 árboles debido a un error en la toma de datos, fue el que obtuvo la mayor cosecha y número de frutos y un peso de fruto intermedio. El tratamiento T3 (RDC), fue el de menor cosecha y número de frutos, pero con un mayor calibre. Por último, el tratamiento de riego T2 (RDS) obtuvo valores medios de producción y número de frutos, pero sus frutos fueron los más pequeños posiblemente por la menor dosis de agua recibida. A pesar de estas apreciaciones cabe concluir que el riego deficitario sostenido (T2) y el riego deficitario controlado (T3) no afectaron negativamente a ninguna de las variables estudiadas.

Los valores medios para los tres tratamientos de riego de producción (28.4 kg/árbol), peso medio de fruto (196 gr/fruto) y número de frutos (146

frutos/árbol) fueron similares a los encontrados en otras plantaciones de la zona e incluso mayores que en años anteriores.

Tabla 3.18. Valores medios de producción, peso medio de fruto y número de frutos en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. N = número de árboles, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Para cada variable analizada, no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

<i>Datos de cosecha</i>				
		Producción	Peso medio fruto	Nº frutos
Tratamiento	N	(Kg/árbol)	(gr/fruto)	(frutos/árbol)
T1 (Control)	9	29.9	196.6	152.2
T2 (RDS)	10	28.6	195.7	146.2
T3 (RDC)	10	26.8	199.1	137.5
Media	29	28.4	197.1	145.3
CV (%)		24.8	2.2	24.2
DE		7.0	4.4	35.2

Tabla 3.19. Valores medios de producción, peso medio de fruto y número de frutos en cada repetición (Bloque) en el año 2011. N = número de árboles, DE= desviación estándar, CV= coeficiente de variación. No hay diferencias significativas entre bloques en ninguna de las variables analizadas ($p > 0.05$).

<i>Datos de cosecha</i>				
		Producción	Peso medio fruto	Nº frutos
Bloque	N	(Kg/árbol)	(gr/fruto)	(frutos/árbol)
1	6	26.8	198.8	134.9
2	6	31.0	195.4	169.2
3	6	29.6	195.8	151.0
4	6	28.0	197.8	141.1
5	5	26.2	197.2	132.2
Media	29	28.4	197.1	145.3

La Figura 3.18 muestra los índices productivos calculados según el apartado 2.6.5 en cada tratamiento de riego. La precocidad nos da una idea del adelanto de la cosecha y es muy apreciada por el agricultor ya que aporta una ventaja comercial competitiva con respecto a otros productores. No hubo diferencias ($p > 0.05$) en el porcentaje de precocidad entre tratamientos de riego, aunque el tratamiento T1 con mayores dosis de riego fue el que mayor porcentaje de frutos recogió en la primera pasada (50%). La productividad obtuvo valores similares ($p > 0.05$) en todos los tratamientos de riego.

Por último, el índice de eficiencia de uso de agua de riego (EUAR) fue claramente mayor ($p < 0.05$) en el tratamiento T2 (RDS), ya que consiguió un ahorro de agua de hasta el 42% sin afectar negativamente a la producción. Estos resultados concuerdan con la idea señalada en el punto 1.3 de que el riego deficitario tiene el potencial de mejorar la EUAR y la productividad sin afectar sensiblemente a la cosecha.

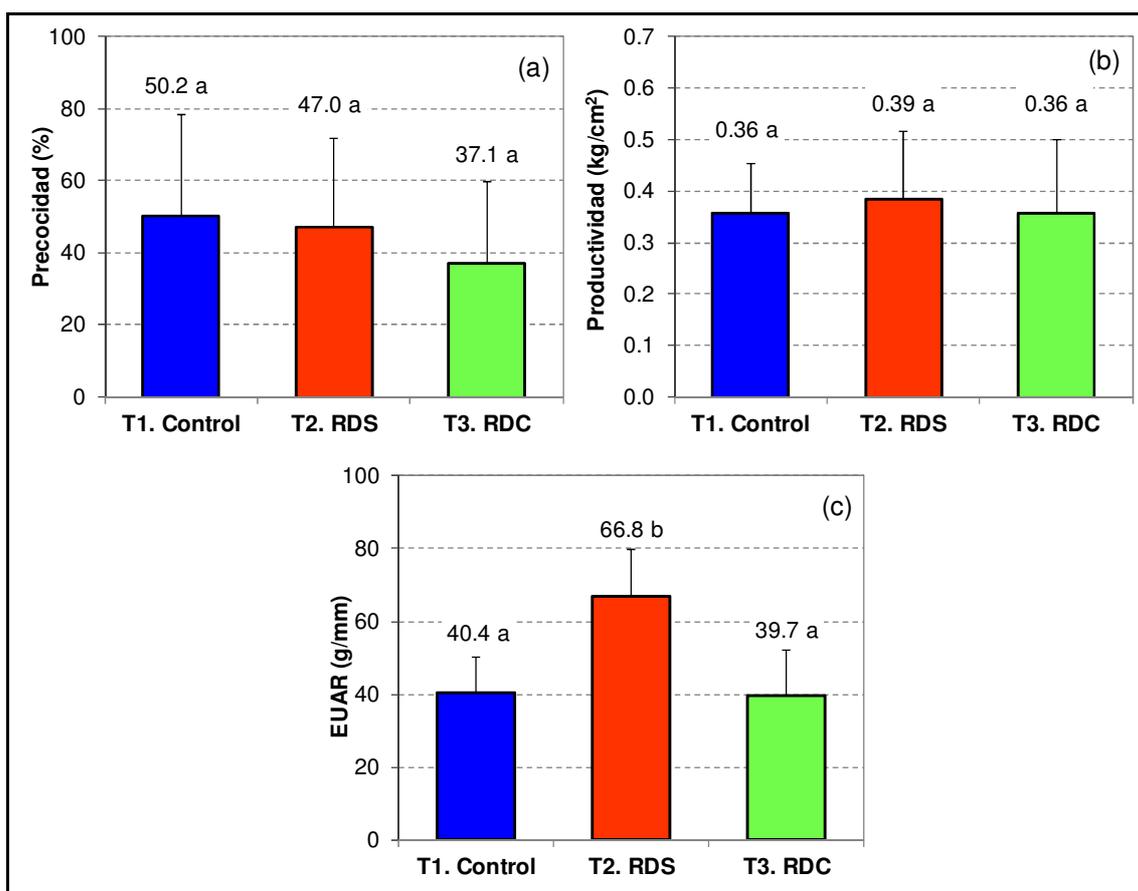


Figura 3.18. (a) precocidad, (b) productividad y (c) eficiencia del uso de agua de riego (EUAR) medidos en cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año

2011. Tratamientos con distinta letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Por encima de un vigor (sección inicial de tronco) de unos 95 cm^2 , existe una cierta relación inversa entre producción y vigor, tal como se observa en la Figura 3.19a por la línea envolvente superior de las observaciones. La Figura 3.19b muestra la relación entre vigor y productividad del melocotón ($R^2 = 49\%$). Estos resultados sugieren que los árboles más vigorosos tendieron a disminuir su producción y su productividad.

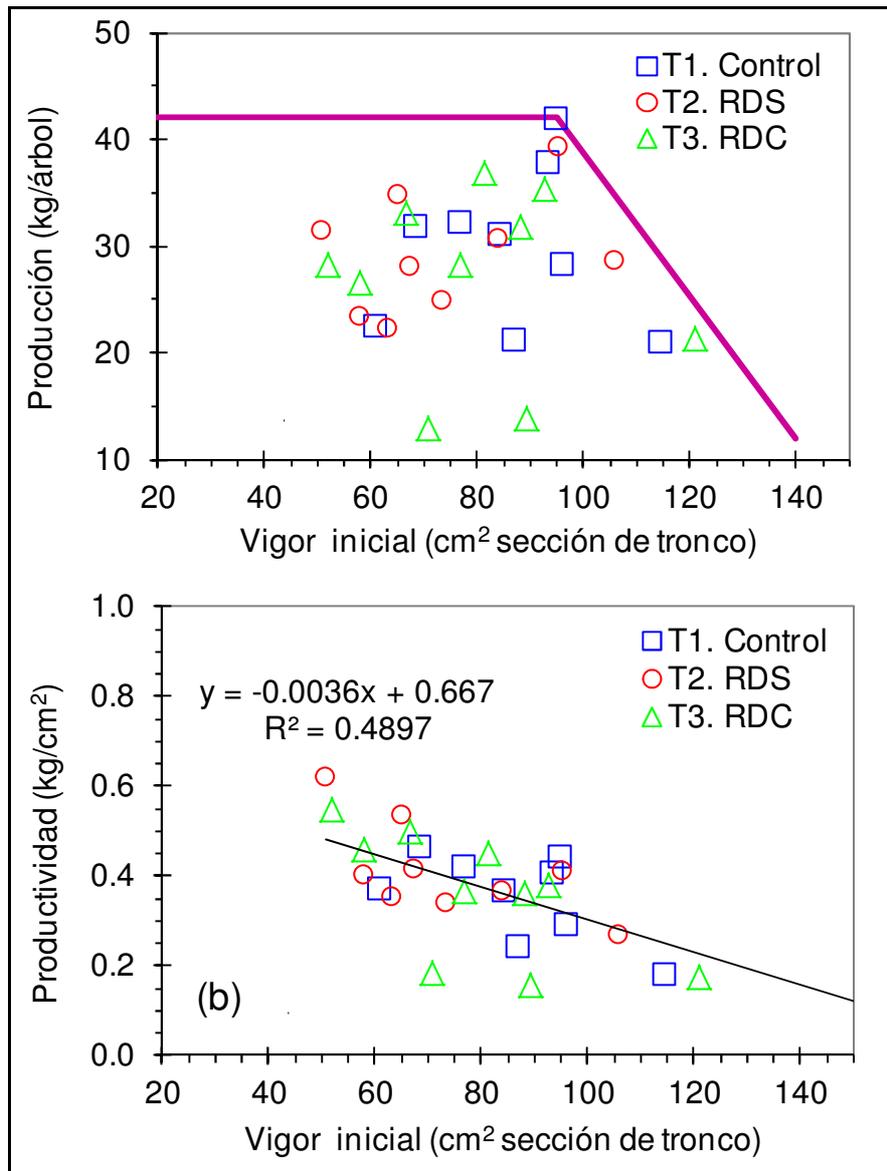


Figura 3.19. Relación del vigor con (a) la producción y (b) la productividad en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011.

3.5.6 Análisis iónico foliar

La concentración de Na en hoja fue muy baja y similar ($p > 0.05$) en todos los tratamientos de riego en las dos fechas de muestreo (valores entre 0.06% y 0.08%) (Tabla 3.20). La absorción radicular de este ion fue por lo tanto muy baja e independiente de los tratamientos de riego

La concentración de Cl en hoja fue baja en todos los casos, aunque aumentó ($p < 0.05$) en septiembre con respecto a julio en todos los tratamientos, y con diferencias entre ellos en las concentraciones medidas en septiembre. El incremento en la concentración de Cl siguió el orden T2 (99%) > T3 (78%) > T1 (35%), orden inverso al volumen de riego aplicado en cada tratamiento. Cabe por lo tanto concluir que el riego más deficitario fue el que provocó mayores incrementos en la concentración de Cl foliar a lo largo de la estación de riego.

Para el total de 60 muestras de hoja analizadas (5 bloques x 2 árboles / bloque x 2 fechas de muestreo x 3 tratamientos) los valores medios de Na (0.065%) y Cl (0.10%) fueron muy inferiores a los umbrales tóxicos en frutales (0.2% Na y 0.55% Cl), por lo que se concluye que no existió toxicidad iónica específica por Na o Cl.

Tabla 3.20. Concentraciones medias de Na y Cl en hoja medidas en los árboles control (N) de cada tratamiento de riego (T1, T2 y T3) en el año 2011. Para cada tratamiento e ion analizado, fechas de muestreo con distinta letra minúscula tienen concentraciones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$). Para cada fecha e ion analizado, tratamientos de riego con distinta letra mayúscula tienen concentraciones medias significativamente diferentes ($p < 0.05$).

<i>Análisis iónico foliar (% peso seco)</i>							
Tratamiento	N	Julio		Septiembre		Incremento	
		Na	Cl	Na	Cl	Na	Cl
T1 (Control)	20	0.06 aA	0.07 aA	0.06 aA	0.10 bA	5%	35%
T2 (RDS)	20	0.06 aA	0.08 aA	0.08 aA	0.15 bB	26%	99%
T3 (RDC)	20	0.06 aA	0.08 aA	0.06 aA	0.13 bAB	3%	78%
Media	60	0.06 a	0.07 a	0.07 a	0.13 b	11%	71%

3.5.7 Efecto de la salinidad del suelo sobre la producción, precocidad, productividad, eficiencia del uso del agua y concentración iónica foliar

La producción media de melocotón en la plantación estudiada fue de unos 28 kg/árbol, alta y similar a la de otras plantaciones de la zona, lo que indicaría que los árboles no estuvieron sujetos a estrés salino, en contra de lo que cabría concluir de los datos de CEE media del suelo obtenidos en 2011 (4.2 dS/m).

La Figura 3.20 muestra la relación entre la producción y la CEE media medida en las dos fechas (abril y septiembre) y posiciones (0 y 25 de distancia al gotero) de muestreo. Se ha elegido esta media por ser la que mejor integra la variabilidad espacio-temporal de la salinidad en la zona de raíces del melocotonero. De esta figura cabe deducir que la producción tendió en general a disminuir con el incremento de la salinidad, aunque la elevada variabilidad de las observaciones no permite establecer una correlación sólida entre ambas variables.

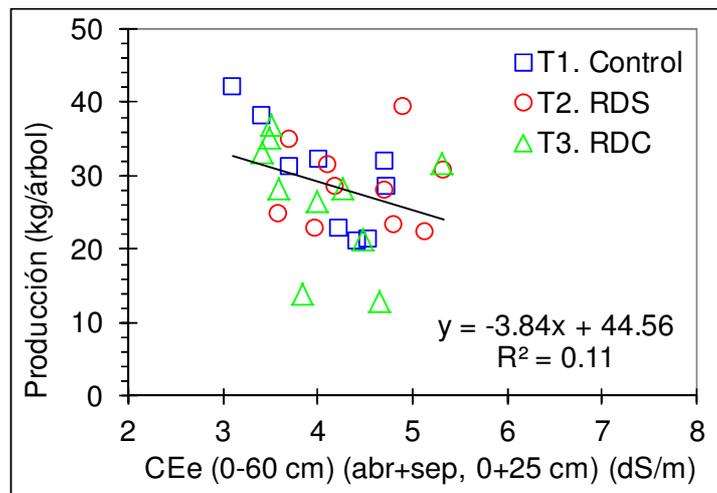


Figura 3.20. Relación entre la producción del melocotonero y la CEE media (abril y septiembre a 0 y 25 cm de distancia al gotero) medida en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011.

La Figura 3.21 muestra la relación de la precocidad, productividad y eficiencia en el uso del agua de riego con la salinidad edáfica. Aunque la precocidad tendió a disminuir con el incremento de la CEE, los resultados de esta figura indican que la salinidad no está correlacionada de forma significativa a ninguno de estos parámetros.

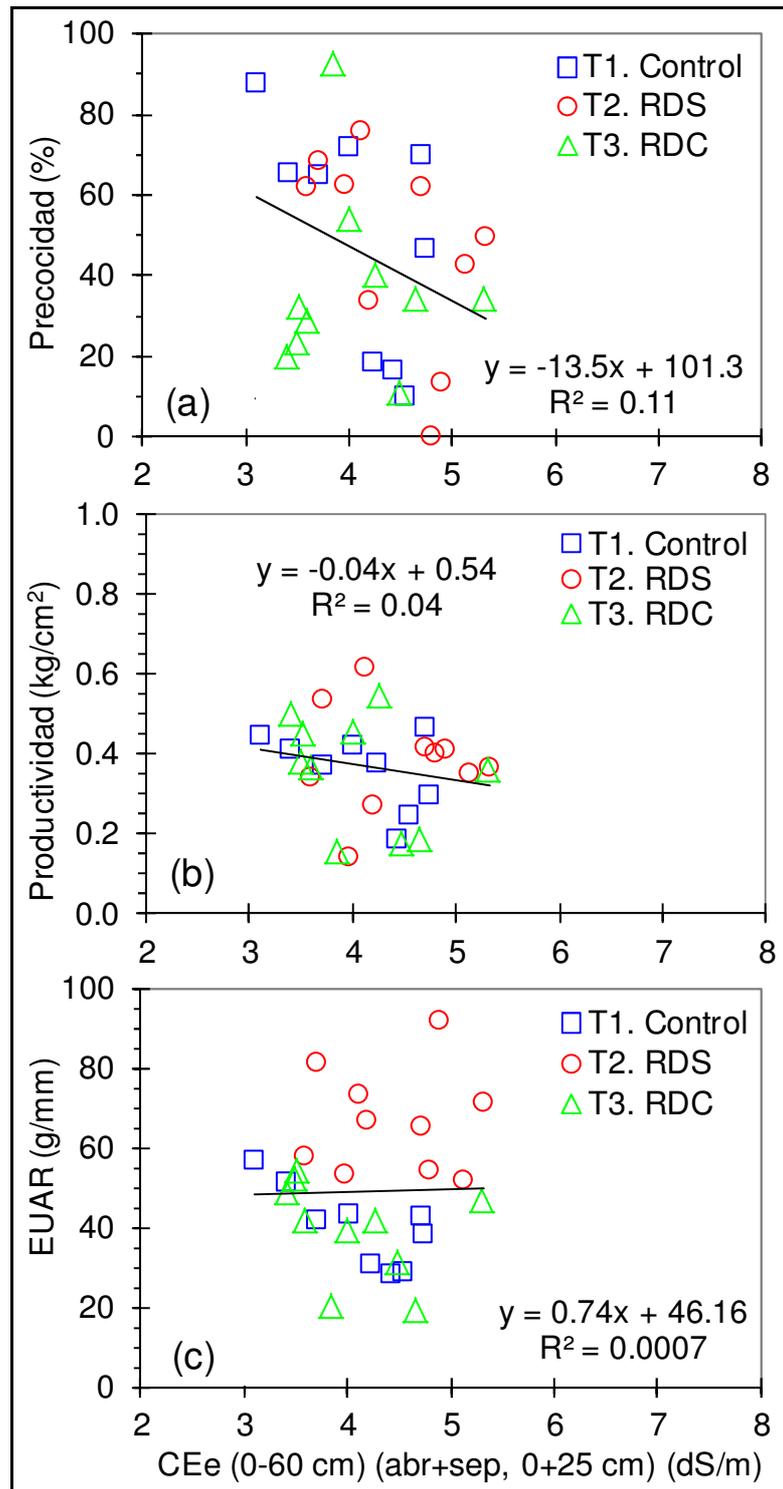


Figura 3.21. Relación entre la (a) precocidad, (b) productividad y (c) eficiencia del uso de agua de riego (EUAR), y la CEE media (abril y septiembre a 0 y 25 cm de distancia al gotero) medida en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011.

La Figura 3.22 muestra la relación entre la productividad y las concentraciones foliares de Na y Cl en septiembre. La productividad fue independiente de dichas concentraciones, resultado coherente dado que las mismas fueron muy inferiores a los valores umbrales tóxicos referenciados en la literatura para el melocotonero. Resultados similares se obtuvieron con el resto de parámetros productivos.

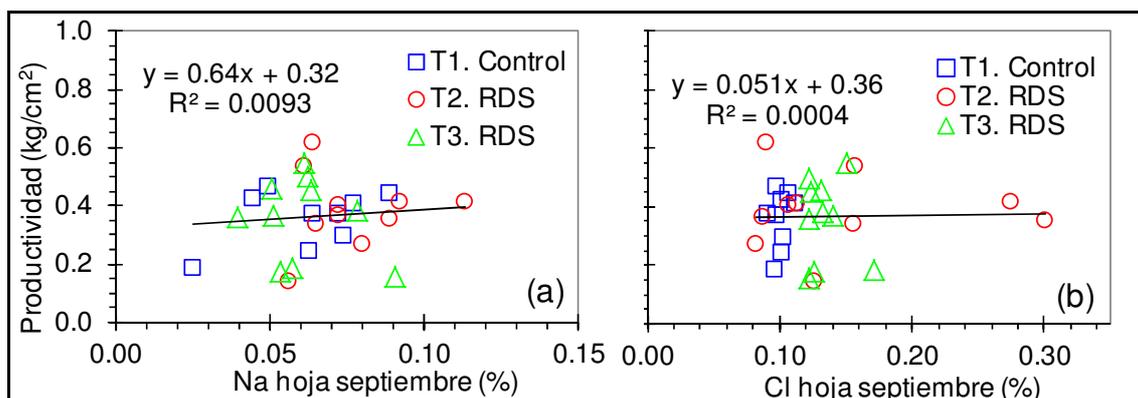


Figura 3.22. Relaciones entre la productividad y las concentraciones foliares de (a) Na y (b) Cl medidas en septiembre del año 2011 en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3.

Finalmente, al objeto de comparar los resultados obtenidos en este trabajo con la respuesta del melocotonero a la salinidad edáfica (CEe) propuesta por FAO (1985), la producción y la productividad se han calculado en términos relativos respecto a los máximos valores medidos en 2011 a los que se les ha asignado un valor de 100 (42 kg para la producción y 0.62 kg/cm² para la productividad). Estos valores relativos y los valores respectivos de CEe se representan en la Figura 3.33, junto con las funciones FAO (1985) de respuesta del melocotonero a la salinidad (CEe) en suelos con y sin yeso. Según FAO, estas funciones de respuesta vienen definidas por una CEe umbral de 1.7 dS/m en suelos sin yeso y de 3.7 dS/m en suelos con yeso, y una pendiente por encima de dicho umbral del 21% (similar en ambos suelos). Se han representado en esta figura ambas funciones de respuesta ya que el 21% de las 120 muestras analizadas en 2011 tenían yeso.

La Figura 3.23 sugiere que la producción y la productividad tendieron a disminuir con el incremento de la CEe, y que la mayoría de las observaciones (el 83% para la producción y el 62% para la productividad) se localizan entre

ambas funciones de respuesta FAO (sin y con yeso). La CEE umbral en suelos con yeso (3.7 dS/m) propuesta por FAO es la que más se acerca a los valores experimentales, y la pendiente o descenso de la producción y productividad por incremento unidad de la CEE se aproxima con los descensos observados en un buen número de observaciones. Sin embargo, la elevada variabilidad de las observaciones indica que otros estreses no identificados afectaron sensiblemente a estos dos parámetros, por lo que este estudio no permite extraer conclusiones más sólidas acerca de la respuesta del melocotonero a la salinidad edáfica.

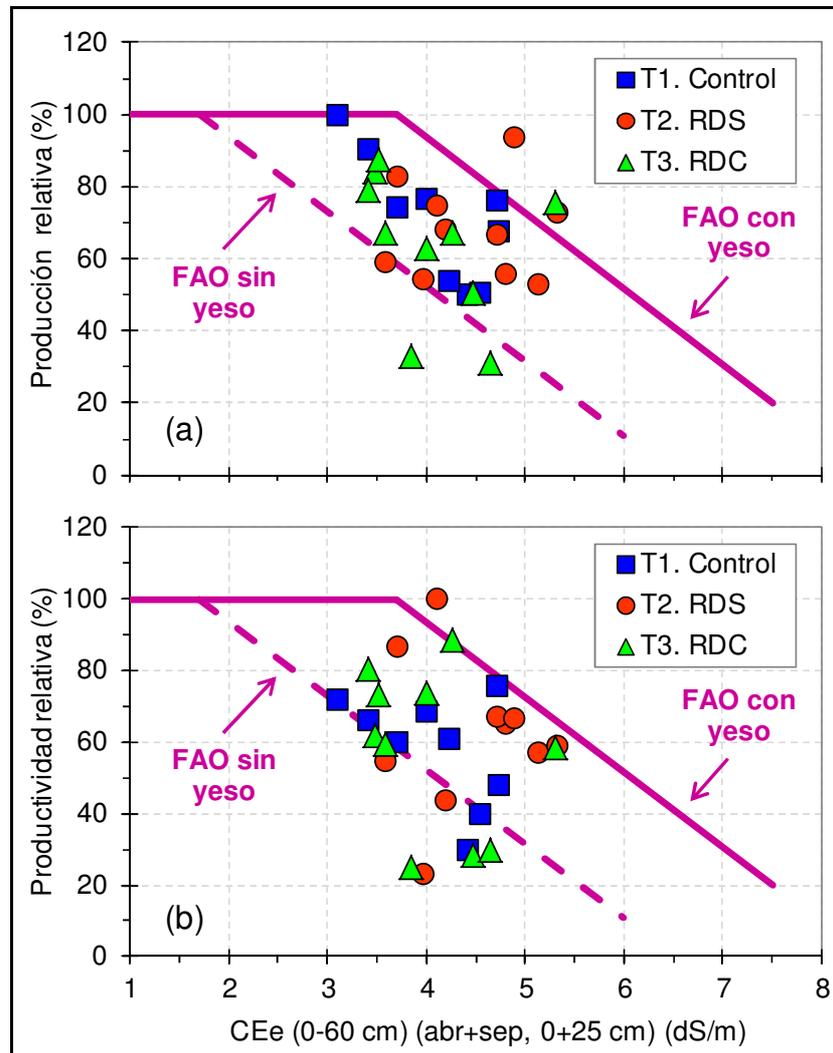


Figura 3.23. Relaciones de (a) la producción y (b) la productividad relativa con la CEE media (abril y septiembre a 0 y 25 cm de distancia al gotero) medidas en cada árbol control de los tratamientos de riego T1, T2 y T3 en el año 2011. Las funciones FAO de respuesta del melocotonero a la salinidad en suelos con y sin yeso se representan a efectos comparativos.

4. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Grado se ha estudiado durante el año 2011 la interacción riego-suelo-planta en una plantación de melocotonero regado por goteo con aguas de salinidad moderada ($CE \approx 1.2$ dS/m) sujeta a tres tratamientos de riego: T1-Control (riego al 100% de las necesidades hídricas), T2-RDS (riego deficitario sostenido) y T3-RDC (riego deficitario controlado) El objetivo principal de este trabajo ha sido establecer el efecto de estos tratamientos sobre la salinidad edáfica y sobre el rendimiento del melocotonero.

Las conclusiones más relevantes de este trabajo son:

1. El volumen de agua de riego aplicado en el tratamiento Control (740 mm) fue un 12% superior a las necesidades netas de agua del melocotonero. Respecto al Control, el ahorro del riego fue muy importante en el RDS (42%) y escaso en el RDC (9%) debido a la corta duración (unos 30 días) de la fase II (período de reducción del riego en este tratamiento) en el melocotonero tardío.
2. La fracción de lavado (FL) tendió a disminuir y el déficit hídrico (DH) tendió a aumentar a lo largo de la estación de riego, particularmente en el Riego Deficitario Sostenido (RDS). Cabe esperar en consecuencia que la salinidad del suelo tienda a aumentar a lo largo de la estación de riego, particularmente en el RDS.
3. En relación con los muestreos de suelo efectuados a dos distancias del gotero (0 y 25 cm), la humedad gravimétrica del suelo (HG) a 25 cm descendió en promedio un 17% respecto a la HG a 0 cm. Por el contrario, la conductividad eléctrica (CEe), el cloruro (Cle), el sodio (Nae) y la relación de adsorción de sodio (RASe) en el extracto saturado del suelo fueron en promedio más del 200% (Cle y Nae) y del 100% (RASe y CEe) superiores a 25 cm que a 0 cm de distancia al gotero. El incremento de la salinidad con el descenso de la humedad indica que la evapotranspiración del melocotonero y consiguiente evapo-concentración del agua y sales aportadas con el riego fue un mecanismo relevante de salinización del suelo.
4. La HG media del conjunto de muestras de suelo analizadas en 2011 fue en general elevada y ligeramente superior a la humedad a capacidad

de campo. Los tratamientos Control y RDC tuvieron un suministro adecuado de agua, por lo que la HG fue similar al principio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego. Por el contrario, el tratamiento RDS tuvo un suministro insuficiente de agua que provocó la extracción de agua del suelo por el melocotonero y el consiguiente descenso de la HG del 13% a lo largo de la estación de riego.

5. La CEe media del conjunto de muestras de suelo analizadas en 2011 fue elevada (4.2 dS/m) y con un efecto potencialmente negativo sobre la producción del melocotonero. La CEe de los tratamientos Control y RDC fue similar al principio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego. Por el contrario, la CEe del tratamiento RDS fue un 54% mayor en septiembre que en abril. Por lo tanto, la salinidad al final de la estación de riego fue mayor en RDS que en RDC y Control (similares entre sí), resultado consistente con la menor dosis de riego, menor FL y mayor DH del riego deficitario sostenido.
6. Los valores medios de Cle (17.4 meq/l), Nae (19.8 meq/l) y RASe (5.7 (mmol/l)^{0.5}) del conjunto de muestras analizadas en 2011 fueron relativamente elevados y con un efecto potencialmente negativo sobre el rendimiento del melocotonero (Cle y Nae) y sobre la estabilidad estructural del suelo (RASe). El Cle, Nae y RASe de los tratamientos Control y RDC fue similar al principio (abril) y final (septiembre) de la estación de riego. Por el contrario, en el tratamiento RDS estos valores fueron un 91% (Cle), 64% (Nae) y 47% (RASe) mayores en septiembre que en abril.
7. La variación porcentual diaria de la CEe estuvo correlacionada ($p < 0.01$) con la FL y el DH, de tal forma que la salinidad del suelo aumentó con el descenso de la FL y con el aumento del DH. La FL y el DH son parámetros sencillos que, para ambientes edafo-climáticos y de manejo del riego similares a los de este trabajo, permiten aproximar los niveles máximos de riego deficitario a los que puede ser sometida una plantación de melocotonero sin verse negativamente afectada por niveles excesivos de salinidad del suelo.

8. El crecimiento vegetativo (sección de tronco), el rendimiento productivo (producción, peso medio de fruto, número de frutos, precocidad y productividad) y la concentración foliar de Na y Cl no se vieron negativamente afectados por los riegos deficitarios. En particular, el riego deficitario sostenido aumentó en un 67% la eficiencia en el uso del agua de riego respecto al Control y al RDC sin efectos perjudiciales sobre los parámetros anteriormente indicados.
9. La producción y productividad del melocotonero tendieron a disminuir con el incremento de la salinidad del suelo por encima de una CEe de en torno a 3-4 dS/m. Este valor se acerca a la CEe umbral de 3.7 dS/m establecida por FAO en suelos con yeso. Sin embargo, la elevada variabilidad de las observaciones no permite extraer conclusiones más sólidas acerca de la respuesta del melocotonero a la salinidad edáfica.
10. La conclusión más relevante de este estudio es que el riego deficitario sostenido produjo un ahorro del volumen de riego del 42% y un aumento en la eficiencia del uso del agua del 67% sin afectar negativamente al melocotonero. Sin embargo, este riego deficitario disminuyó la humedad y aumentó la salinidad y sodicidad del suelo a lo largo de la estación de riego, alcanzando valores al final de la misma potencialmente negativos para la respuesta productiva del melocotonero y para la estabilidad estructural del suelo. Por consiguiente, en zonas áridas o semiáridas caracterizadas por bajas precipitaciones, elevadas evapotranspiraciones y aguas de riego de baja calidad, la sostenibilidad de los riegos deficitarios severos no está garantizada y los mismos deben aplicarse con precaución y con un seguimiento continuado y detallado de la salinidad en la zona de raíces de los cultivos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- **Abrisqueta J.M., Mounzer O., Álvarez S., Conejero W., García-Orellana Y., Tapia L.M., Vera J., Abrisqueta I., Ruíz-Sánchez M.C. (2008).** “Root dynamics of peach trees submitted to partial root zone drying and continuous deficit irrigation”. *Agricultural Water Management* 95: 959-967.
- **Abrisqueta I., Tapia L.M., Conejero W., Sánchez-Toribio M.I., Abrisqueta J.M., vera J., Ruiz-Sánchez M.C. (2010).** “Response of early-peach [*Prunus pérsica* (L.)] trees to deficit irrigation”. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8: S30-S39.
- **Allen R.G., Pereira L.S., Rais D., Smith M. (1998).** “Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements”. *FAO Paper n° 56*, FAO, Rome, 300 pp.
- **Alomran A.M., Louki I.I., Aly A.A., Nadeem M. E. (2013).** “Impact of Deficit Irrigation on Soil Salinity and Cucumber Yield under Greenhouse Condition in an Arid Environment”. *Journal of Agricultural Science and Technology* 15:1247-1259.
- **Aragüés R., Tanji K.K. (2003).** “Water quality of irrigation return flows”. In: Stewart BA, Howell TA (eds) *Encyclopaedia of water science*. Marcel Dekker, New York, 502–506 pp.
- **Aragüés R., Medina E.T., Clavería I., Martínez-Cob A., Faci J. (2014a).** “Regulated deficit irrigation, soil salinization and soil sodification in a table grape vineyard drip-irrigated with moderately saline waters”. *Agricultural Water Management* 134: 84-93.
- **Aragüés R., Medina E.T., Martínez-Cob A., Faci J. (2014b).** “Effects of deficit irrigation strategies on soil salinization and sodification in a semiarid drip-irrigated peach orchard”. *Agricultural Water Management* 142: 1-9.
- **Ayars J.E., Johnson R.S., Phene C.J., Trout T.J., Clark D.A., Mead R.M. (2003).** “Water use by drip-irrigated late-season peaches”. *Irrigation Science* 22: 187-194.
- **Bernstein L. (1980).** “Salt tolerance of fruit crops”. *USDA Agricultural Information Bulletin* 292: 1-8.

- **BOA (2013).** Boletín oficial de Aragón. “ANUNCIO de la Dirección General de Alimentación y Fomento Agroalimentario, por la que se da publicidad al pliego de condiciones de la denominación de origen protegida «Melocotón de Calanda» en el que se ha basado la decisión de la Comisión Europea de publicar en el Diario Oficial de la Unión Europea de fecha 25 de junio de 2013 el documento único de la denominación de origen protegida «Melocotón de Calanda»”. Boletín Nº 228. 19 de septiembre de 2013.
- **Boland A.M., Mitchell P.D., Jerie P.H. (1993).** “Effect of saline water combined with restricted irrigation on peach tree growth and water use”. Australian Journal of Agricultural Research 44: 799-816.
- **Chalmers D.J., Mitchell P.D., Van Heek L. (1981).** “Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning”. Journal of the American Society for Horticultural Science 106: 307-312.
- **FAO (1985).** “Water quality for agriculture”. FAO Irrigation Drainage Paper 29 (Rev 1), Ayers RS and Westcot DW eds, Rome (Italy), 174 pp.
- **FAO (2002).** “Deficit irrigation practices”. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy), 102 pp.
- **Fereres E., Soriano M.A. (2007).** “Deficit irrigation for reducing agricultural water use”. Journal of Experimental Botany 58: 147-159.
- **Geerts A., Raes D. (2009).** “Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas”. Agricultural Water Management 96: 1275-1284.
- **Gelly M., Recasens I., Girona J., Arbones A., Rufat J., Marsal J. (2004).** “Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage”. Journal of the Science of Food and Agriculture 84: 561-568.
- **Ghrab M., Gargouri K., Bentaher H., Chartzoulakis K., Ayadi M., Ben Mimoun M., Moncef M., Ben Mechlia N., Psarras G. (2013).** “Water relations and yield of olive tree (cv. Chemlali) in response to partial root-

zone drying (PRD) irrigation technique and salinity under arid climate". *Agricultural Water Management* 123: 1-11.

- **Girona J., Mata M., Arbones A., Alegre S., Rufat J., Marsal J. (2003).** "Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils". *Journal of the American Society for Horticultural Science* 128: 432-440.
- **Goldhamer D.A., Salinas M., Crisosto C., Day K.R., Soler M., Moriana A. (2002).** "Effects of regulated deficit irrigation and partial root Zone drying on late harvest peach tree performance". *Acta Horticulturae* 592: 343-350.
- **Hanson B., (2012).** "Drip irrigation and salinity". Chapter 17 in *Agricultural Salinity Assessment and Management. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71 (2nd edition)*, Wallender, W.W. and Tanji, K.K. Editors, American Society of Civil Engineers, Reston (Vi), pp. 539-560.
- **Hoffman G.J., Catlin P.B., Mead R.M., Johnson R.S., Francois L.E., Goldhamer D. (1989).** "Yield and foliar injury responses of mature plum trees to salinity". *Irrigation Science* 10: 215-229.
- **Hsiao T., Steduto P., Fereres E. (2007).** "A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture". *Irrigation Science* 25: 209-231.
- **INE (1999).** "Censo Agrario". Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- **INE (2009).** "Censo Agrario". Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- **Kaman H., Kirda C., Cetin M., Topcu S. (2006).** "Salt accumulation in the root zones of tomato and cotton irrigated with partial root-drying technique". *Irrigation and Drainage* 55: 533-544.
- **Maas E.V., Hoffman G.J. (1977).** "Crop salt tolerance-current assessment". *Journal of the Irrigation and Drainage Division IR2*: 115-134.
- **MAGRAMA (2012).** Anuario de Estadística 2012. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Madrid.
- **Mounzer O., Conejero W., Nicolas E., Abrisqueta I., Vera J., Abrisqueta J.M., Ruiz-Sanchez MDC., García-Orellana Y.V., Tapia L.M., (2008).**

“Growth pattern and phenological stages of early-maturing peach trees under a Mediterranean climate”. *HortScience* 43: 1813-1818.

- **Mounzer O., Pedrero-Salcedo F., Nortes P.A., Bayona J.M., Nicolas-Nicolas E., Alarcon J.J. (2013).** “Transient soil salinity under the combined effect of reclaimed water and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees”. *Agricultural Water Management* 120: 23-29.
- **Nasr Z., Ben Mechlia N. (2002).** “Deficit irrigation to reduce salinization in an apple orchard”. *Acta Horticulturae* 573: 283-287.
- **Oficina del Regante.** Zaragoza, España. <http://servicios.aragon.es/>
- **Page A.L., Miller R.H., Keeney D.R. (1982).** “Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties”. American Society of Agronomy, Madison, WI , USA.
- **Raine S.R., Meyer W.S., Rassam D.W., Hutson J.L., Cook F.J. (2007).** “Soil-water and solute movement under precision irrigation: knowledge gaps for managing sustainable root zones”. *Irrigation Science*. 26: 91-100.
- **Ruiz Sánchez M.C., Domingo R., Castel J.R., (2010).** “Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain”. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 8: 5-20.
- **Sarwar A., Bastiaanssen W.G.M. (2001).** “Long-term effects of irrigation water conservation on crop production and environment in semiarid areas”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*. 127: 331-338.
- **Shalhevet J. (1994).** “Using water of marginal quality for crop production: Major issues”. *Agricultural Water Management* 25: 233-269.
- **Sepaskhah A.R., Ahmadi S.H. (2010).** “A review on partial root-zone drying irrigation”. *International Journal of Plant Production* 4:241-258.
- **Soil Survey Staff (2006).** “Keys to Soil Taxonomy”. 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- **Torrecillas A., Alarcón J.J., Domingo R., Planes J., Sánchez-Bianco M.J. (1996).** “Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars”. *Plant Science* 188: 135-143.