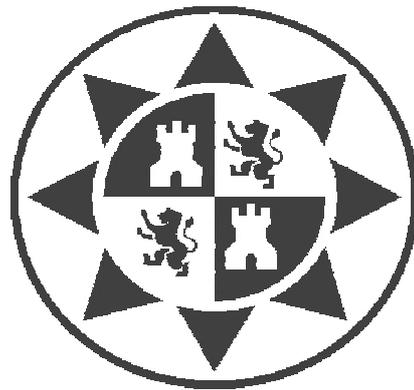

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Ingeniero Técnico Industrial



PROYECTO FIN DE CARRERA

**Efecto combinado de riego deficitario y de la calidad del agua sobre la
acumulación de sales en el suelo bajo riego localizado**

José María Bayona Gambín

Cartagena, Julio 2009



JUAN JOSÉ ALARCÓN CABAÑERO y OUSSAMA HUSSEIN MOUNZER,
INVESTIGADORES DEL DEPARTAMENTO DE RIEGO DEL CENTRO DE
EDAFOLOGIA Y BIOLOGIA APLICADA DEL SEGURA - CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS.

CERTIFICAN:

Que el presente Trabajo Fin de Carrera titulado: **“Efecto combinado de riego deficitario y de la calidad del agua sobre la acumulación de sales en el suelo bajo riego localizado”**, presentado por D. José María Bayona Gambín, ha sido realizado bajo nuestra dirección para optar al título de Ingeniero Técnico Industrial, especialidad Química Industrial.

Y para que conste a los efectos oportunos firmamos el presente en Murcia a veintinueve de junio de dos mil nueve.



Universidad
Politécnica
de Cartagena

JUAN IGNACIO MORENO SÁNCHEZ, PROFESOR TITULADO DE
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA, DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

CERTIFICA

Que el presente Trabajo De Fin De Carrera Titulado: **“Efecto combinado de riego deficitario y de la calidad del agua sobre la acumulación de sales en el suelo bajo riego localizado”**, presentado por Dn. JOSÉ MARÍA BAYONA GAMBIN, ha sido realizado bajo mi dirección para optar al título de Ingeniero Técnico Industrial, especialidad en química industrial.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente en Cartagena a dos de Julio de dos mil nueve.

El presente trabajo fin de carrera ha sido realizado en el Centro de Edafología y Biología aplicada del Segura, Departamento de Riego del consejo Superior de Investigaciones Científicas y financiado por los siguientes proyectos de investigación: Sustainable orchard irrigation for improving fruit quality and safety - IRRIVAL (EU-FP6-FOOD-CT-2006-023120) y CONSOLIDER INGENIO 2010 (MEC CSD2006-0067).

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría darle las gracias a mi familia por darme la oportunidad de estudiar una carrera y por la paciencia que han tenido conmigo en el transcurso de la misma.

Agradecer a Juan José Alarcón, investigador del departamento de Riego del C.E.B.A.S la oportunidad de realizar el Proyecto Fin de Carrera. A Oussama Mounzer, Francisco Pedrero, Emilio Nicolás, Rosalía Alcobendas, Francisco Pérez y Diana Bauzá. Gracias a todos por portarse tan bien conmigo durante este período y tener la oportunidad de seguir adelante.

Gracias a mi gente de Cartagena con la que tantos buenos ratos he pasado durante estos años y sigo pasando.

INDICE

1.	INTRODUCCION.....	1
1.1	Problemática del agua en la Región de Murcia.....	2
2.	ESTRATEGIAS DE RIEGO y RECURSOS NO CONVENCIONALES	3
2.1	Riego de precisión	4
2.2	Riego deficitario	4
2.3	Recursos de agua no convencionales	5
2.4	Agua regenerada y riesgo de salinidad.....	6
3.	MOVIMIENTO DE AGUA y SOLUTOS EN EL SUELO.....	7
3.1	Introducción	7
3.2	Modelos matemáticos	9
3.3	Modelo numérico HYDRUS-2D.....	11
3.4	Descripción de los parámetros del modelo HYDRUS-2D	11
3.4.1	Extracción radicular	11
3.4.2	Características hidrodinámicas del suelo.....	12
3.4.3	Método de elementos finitos.....	12
3.4.4	Transporte de solutos	12
4.	MATERIAL Y MÉTODOS	13
4.1	Parcela experimental.....	13
4.1.1	Ubicación y material vegetal.....	13
4.1.2	Suelo	15
4.1.3	Cabezal de riego y fuentes de agua	15
4.1.4	Sistema de riego	17
4.1.5	Diseño experimental.....	18
4.1.6	Instrumentación y Medidas	19
4.2	Calibración del modelo numérico HYDRUS-2D	23
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
5.1	Necesidades hídricas, aportes de agua (ETc, Riego_acc).....	28
5.2	Estado hídrico del suelo.....	29
5.3	Conductividad eléctrica de la solución del suelo y de la pasta saturada.....	32
5.4	Validación del modelo HYDRUS-2D	34
6.	CONCLUSIONES.....	41
7.	BIBLIOGRAFIA	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de precipitaciones en la región de Murcia.....	2
Figura 2: diagrama ombrotérmico.	2
Figura 3: Representación gráfica de la curva de retención o relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo y su carga hidráulica.....	8
Figura 4: Ubicación de la finca experimental en Campotéjar-Murcia.....	14
Figura 5: Finca experimental “Lo Montero” - Campotéjar.	14
Figura 6: Parcela de mandarinos y tratamientos de riego y.	19
Figura 7: Instrumentos.	20
Figura 8: Geometría del perfil de suelo simulado..	24
Figura 9: Representación gráfica de la función de estrés (Feddes et al., 1978).....	25
Figura 10: Evolución de la calidad del agua.	28
Figura 11: Evolución del contenido de agua en el suelo para los seis tratamientos.....	31
Figura 12: Evolución del potencial mátrico del suelo.	32
Figura 13: Conductividad eléctrica de la solución del suelo.	34
Figura 14: Conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada.....	34
Figura 15: Evolución del contenido de agua en el suelo.....	35
Figura 16: Relación entre los valores observados y los valores simulados del stock hídrico a 20 cm del gotero.....	37
Figura 17: Simulación de la distribución bidimensional de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (CEs).....	39
Figura 18: Simulación de la distribución bidimensional de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (CEs).....	40

INDICE de TABLAS

Tabla 1: Valores de entrada en la ecuación de Vrugt et al. (2001).....	25
Tabla 2: Parámetros de la función de estrés determinada por Feddes et al. (1978)	26
Tabla 3: Valores de la evapotranspiración de referencia (ET_0 mm.mes ⁻¹) y del cultivo (ET_c mm.mes ⁻¹), de los coeficientes de cultivo, de las precipitaciones (mm.mes ⁻¹) y de los aportes de riego (mm.mes ⁻¹) aplicados durante la campaña 2007/2008.	29

RESUMEN

La región de Murcia padece de un déficit hídrico estructural debido a un desajuste entre las entradas y las salidas hídricas de la cuenca del Segura junto con unas precipitaciones muy escasas y mal repartidas en el tiempo y en el espacio. Esta situación está imponiendo la aplicación de estrategias de riego deficitario y el uso de aguas de baja calidad para fines de riego, lo que podría poner en riesgo la sostenibilidad del sistema de producción agraria.

En este trabajo se ha planteado el objetivo de evaluar el efecto combinado del riego deficitario controlado "RDC" y de la aplicación de aguas depuradas de baja calidad sobre la acumulación de sales en el suelo. Para ello, en una finca comercial con mandarinos adultos bajo riego localizado, se diferenciaron 6 tratamientos de riego. Se aplicó un Control (100% ETc) y un RDC (50% ETc durante la segunda fase de crecimiento del fruto utilizando 3 fuentes de agua de distinta calidad [buena ($CE \approx 1$), baja ($CE \approx 3$) y variable ($1 \leq CE \leq 4$)]. Cada 15 días, se registraron las variaciones del contenido de agua en el suelo, el potencial mátrico y la composición química de la solución del suelo. Además, se tomaron muestras gravimétricas al inicio de los ensayos, al final de la aplicación de RDC y al final de la estación de riego. A posteriori se compararon los datos registrado en campo con simulaciones matemáticas utilizando el modelo HYDRUS-2D.

OBJETIVOS

En las zonas semiáridas y áridas, la escasez de los recursos hídricos, la irregularidad espacial y temporal de las precipitaciones y la creciente competencia por el agua entre los sectores agrícola, urbano e industrial están exigiendo la adopción de estrategias de ahorro de agua. Estas estrategias no se limitan a ajustar los aportes de riego a las necesidades hídricas reales de los cultivos sino que tienden por un lado, a imponer un déficit hídrico controlado evitando afectar a la producción final y por otro lado a buscar nuevos recursos hídricos de los cuales las aguas regeneradas de baja calidad parecen ser muy prometedoras a pesar de su elevado contenido en sal.

En la región de Murcia, la aplicación de riegos deficitarios y el uso de aguas de baja calidad se están extendiendo en varias zonas agrícolas sin tener en cuenta el posible efecto negativo que podría darse sobre la sostenibilidad del sistema agua-suelo-planta.

Ante esta situación, se ha planteado en este trabajo el objetivo de hacer un seguimiento detallado de la calidad del agua de riego y evaluar la sostenibilidad del uso de las aguas regeneradas y estudiar los posibles efectos de su combinación con estrategias de riego deficitario controlado (RDC) sobre la acumulación de sales en el suelo. Con los datos observados se calibrará un modelo numérico que predice el movimiento de sales en el suelo en función de la cantidad y calidad del agua aplicada en distintos tratamientos de riego.

1. INTRODUCCION.

La región de Murcia con una extensión de 11.317 km² se encuadra hidrológicamente un 97,5 % en la denominada Cuenca del Segura. Esta cuenca tiene un déficit hídrico estructural debido a un desajuste entre las entradas y las salidas al territorio. Estas entradas y salidas son; precipitación, evaporación, transpiración, recarga del acuífero, escorrentía superficial, escorrentía subterránea al río, aportación del río, transferencia superficial desde/hasta otro territorio y la transferencia subterránea hacia el mar.

La Región de Murcia presenta las características propias del clima mediterráneo semiárido con temperatura media anual de 18°C, veranos calurosos (registrando máximas absolutas de 40°C) e inviernos suaves (11°C de temperatura media en los meses de enero y diciembre). En general, las precipitaciones son escasas (aproximadamente 300-350 mm/año) en todo el territorio regional y mal distribuidas en el espacio y en el tiempo. La mayor parte de la superficie agrícola en la Región recibe menos de 250 mm al año, como se puede apreciar en mapa de la figura 1. Además, estas precipitaciones, a veces de carácter torrencial, suelen concentrarse en periodos como la primavera (abril) o el otoño (octubre) dando lugar a un periodo de sequia que se extiende desde mayo hasta septiembre haciendo del verano una estación eminentemente seca con mucha demanda de riego (Figura 2).

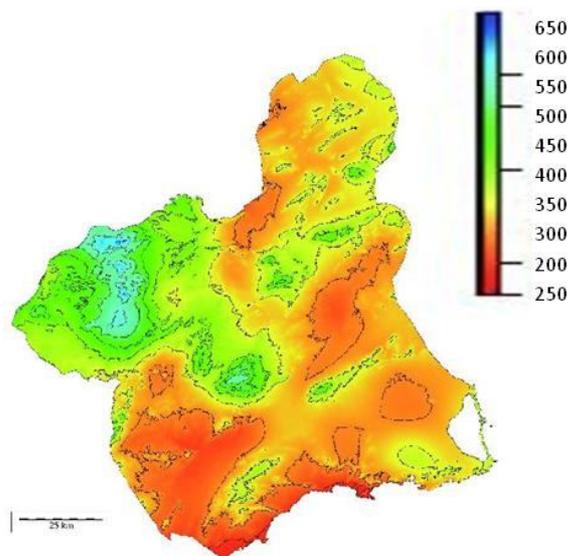


Figura 1: Mapa de precipitaciones en la región de Murcia

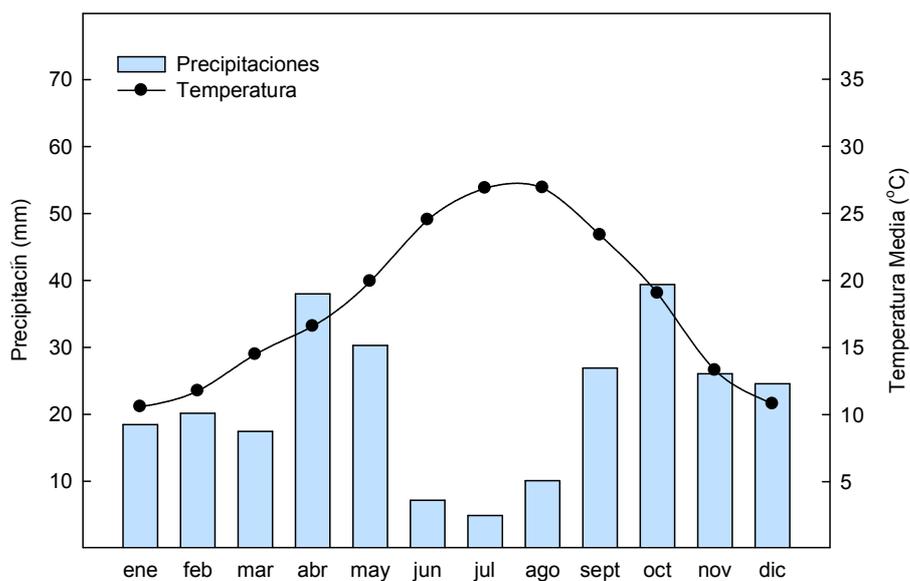


Figura 2: Diagrama ombrotérmico.

1.1 Problemática del agua en la Región de Murcia

La Estadística Agraria Regional aportada por la Consejería de Agricultura de la Comunidad Autónoma de Murcia informa que la superficie total del regadío ha aumentado de 117.230 ha en 1967 hasta 230.000 ha en

la fecha actual. Este aumento, en condiciones climáticas áridas y semiáridas, requiere de gran cantidad de agua lo que incrementa las salidas de agua por evapotranspiración y sitúa el déficit del balance regional en 460 hm³.año⁻¹ (Portal del Agua de la Región de Murcia www.portalagua.com).

El agua es un bien vital y un recurso común para los distintos sectores productivos de la sociedad. Por lo que, cualquier déficit hídrico podría incrementar la competencia entre los usuarios del agua, degenerar la calidad de los recursos hídricos y hacer del agua un recurso escaso y un factor limitante no sólo para el desarrollo de nuevos regadíos sino también para la sostenibilidad de la superficie actual. En España, la repercusión que el agua tiene sobre el sector frutícola es muy importante. Esta realidad unida al hecho de que la mayor parte de las plantaciones se localizan bajo clima caracterizado por la irregularidad de las precipitaciones y el desarrollo de fuertes déficit hídricos, está exigiendo medidas de ahorro como puede ser la gestión del agua con precisión, la adaptación de estrategias de riego deficitario para optimizar los recursos disponibles (Fereres y Soriano 2007) y promueve el uso de los recursos de agua no convencionales como pueden ser las aguas residuales regeneradas (Mantell et al. 1985; Del Amor, 2000).

2. ESTRATEGIAS DE RIEGO y RECURSOS NO CONVENCIONALES

El manejo eficiente del agua de riego depende por un lado de la eficiencia de distribución y uniformidad del sistema utilizado y por otro lado de la toma de decisión en cuanto a la dosis y frecuencia de aplicación. Los sistemas de riego localizado son los más eficientes, siempre y cuando su instalación sigue un diseño hidráulico y agronómico adecuado. Sin embargo, esta eficiencia queda vulnerable si no se acompaña con una gestión basada en las necesidades hídricas reales del cultivo en cuestión.

2.1 Riego de precisión

El manejo de riego de precisión se basa en aplicar la mínima cantidad de agua necesaria para cubrir las necesidades hídricas del cultivo en el espacio y en el tiempo, mojando la zona radicular efectiva y asegurándose que el agua de riego es fácilmente disponible para las raíces y los procesos críticos de la planta. Dicho de otra manera, el riego de precisión debe de cumplir los siguientes requisitos; (1) evitar mojar las zonas sin cultivar, (2) utilizar un sistema de riego localizado cuando proceda, (3) limitarse a mojar sólo la zona radicular efectiva con agua fácilmente disponible, (4) estimar con precisión las necesidades hídricas reales del cultivo e, (5) identificar las etapas de crecimiento menos sensibles a condiciones de estrés hídrico.

En los últimos años, gracias al desarrollo científico y tecnológico se produjeron avances importantes en el manejo del agua de riego mediante el empleo de sistemas de riego localizado equipados con programadores automatizados y sensores de precisión capaces de evaluar el estado hídrico del suelo (Mounzer et al., 2008; Thompson et al., 2007; Fares et al., 2006), o de la planta (Ortuño et al., 2006; Intrigliolo and Castel, 2004) para estimar con precisión y en tiempo real los requerimientos de riego.

2.2 Riego deficitario

El riego deficitario consiste en reducir los aportes de agua por debajo de las necesidades hídricas de la planta con el objetivo de ahorrar agua sin reducir significativamente la producción final del cultivo ni la calidad de su cosecha. Existen varias estrategias de riego deficitario como puede ser el riego deficitario permanente “RDP”, el desecamiento parcial de la zona radicular “DPR” y el riego deficitario controlado “RDC”.

El RDP se basa en reducir los aportes de agua en un porcentaje fijo durante todo el ciclo de riego por debajo de las necesidades hídricas óptimas de la planta. La aplicación del DPR pretende someter la mitad del sistema radicular a condiciones de déficit hídrico durante un periodo de 10 a 15 días con el objetivo de estimular la síntesis del ácido abscísico (ABA), que producirá el cierre parcial de los estomas (Dry et al., 2001) y por lo tanto,

reducirá las pérdidas de agua por transpiración. Por último, el RDC se fundamenta en reducir los aportes hídricos durante los periodos fenológicos menos sensibles a un déficit hídrico controlado de tal manera que no se producen pérdidas significativas en la producción ni la calidad de la cosecha (Chalmers et al., 1981).

Dado que el efecto de la falta de agua sobre la producción final varía en función de la magnitud del déficit hídrico, del momento y de la manera de su aplicación, de las estrategias señaladas, el RDC es la que mejor se adapta a los objetivos de un riego deficitario (Torrecillas et al., 1996, Girona et al., 2003).

2.3 Recursos de agua no convencionales

Las aguas residuales regeneradas constituyen un recurso no convencional de agua cuyo volumen se ha incrementado en los últimos años debido a las preocupaciones por el medio ambiente y al cumplimiento del reglamento europeo (91/271/EEC). En condiciones de escasez de agua, la competencia entre los usuarios y el incremento de los precios hacen de las aguas regeneradas, continuamente disponibles y gratuitos, un recurso muy solicitado para el sector agrícola.

La Región de Murcia aprovecha la totalidad de las aguas regeneradas producidas en las 80 depuradoras repartidas por toda la geografía murciana. El 50 por ciento de ellas emplean el sistema de tratamiento terciario que elimina los nutrientes inorgánicos mediante procesos físico-químicos para asegurar una máxima calidad del agua, apta para su aplicación en usos agrícolas y en las condiciones adecuadas para el vertido sin riesgo de contaminación de los cauces. El volumen total de aguas residuales tratadas en 2008 en las plantas en servicio, fue de 106 Hm³, experimentando cada año un crecimiento con respecto a años anteriores, suponiendo el 45,4 % del agua regenerada en España. Este volumen equivale a un 17 % de los recursos renovables correspondientes a la región de Murcia, procedentes de la cuenca del Segura (601 Hm³ al año) y representa el 12,8 % del volumen de agua

utilizada en el regadío murciano (880 Hm³ al año), si se incluye la dotación total del agua trasvasada (CARM, 2007).

2.4 Agua regenerada y riesgo de salinidad

La reutilización del agua residual puede contribuir a disminuir la contaminación del medio ambiente y aporta un beneficio económico al aprovechar los nutrientes como nitrógeno y fósforo (Stott, et al., 1997). Sin embargo, su elevado contenido de sales, debido al uso doméstico e industrial del agua, es uno de los principales inconvenientes para su utilización extensiva. Las sales no se alteran por el proceso de depuración y su uso para riego podría afectar a las propiedades físicas y químicas del suelo especialmente bajo sistemas de producción moderna e intensiva (Hillel, 2000; Pérez-sirvent et al., 2003 y Angin et al., 2005).

Cada aporte de agua de riego conlleva cierta cantidad de sal. Los cultivos absorben la mayor parte del contenido de agua en el suelo y dejan a la mayor parte de sales de la solución del suelo que se acumulan progresivamente en la zona radicular de las plantas. La programación inadecuada de los aportes de agua y fertilizantes ha provocado, a largo plazo, la acumulación de sales en el suelo bajo riego localizado (Darwish et al., 2005). Por otro lado, la aplicación de agua de baja calidad durante mucho tiempo ha aumentado la compactación del suelo y ha reducido su capacidad de retención (Wang et al., 2003).

Las aguas regeneradas suelen tener una concentración de sales superior a la que se encuentra en los recursos hídricos naturales. Por lo que, su uso para riego supone un riesgo de salinización si no se adaptan las prácticas agrícolas correspondientes; ejemplo de ello pueden ser la selección de cultivos tolerantes a la salinidad, la adaptación de nuevas tecnologías y la mejora de la gestión del riego. Esta última requiere un buen conocimiento del movimiento del agua y del transporte de las sales en el suelo así como de las relaciones en el sistema agua-suelo-planta.

3. MOVIMIENTO DE AGUA y SOLUTOS EN EL SUELO

3.1 *Introducción*

La cantidad de agua presente en el suelo resulta del balance hídrico entre los aportes por lluvia y/o riego y las pérdidas por escorrentía, evapotranspiración y drenaje profundo. El movimiento del agua entre dos puntos del suelo se origina por la diferencia de potencial energético del agua y se produce desde el estado de mayor energía al de menor, buscando un estado de equilibrio que anule el gradiente de potencial existente. El movimiento del agua en el suelo es tridimensional multifactorial y su patrón varía en función de la composición, textura y estructura del suelo, de la temperatura del mismo, del grado de saturación y de la geometría de los espacios porosos así como de los equilibrios químicos de las sales en la solución del suelo y de la interacción suelo-agua-planta.

La determinación del contenido volumétrico de agua en el suelo o grado de saturación en función del estado energético del agua en el mismo da lugar a representar la denominada curva de retención o relación $h(\theta)$ que es característica de cada suelo y cuya forma depende de la estructura del suelo, y de la geometría y distribución de los tamaños de los poros (Figura 3).

En este tipo de curvas se pueden diferenciar, tres regiones: 1) región de entrada de aire, que corresponde a la franja en que el suelo se encuentra saturado donde el potencial varía pero el contenido de agua no disminuye. 2) región capilar, en la que pequeños incrementos de la succión provocan el drenaje de los poros más pequeños del suelo, y el contenido de agua en el suelo disminuye rápidamente, 3) región de adsorción, en la que únicamente queda el agua adsorbida a las partículas del suelo; en esta última región, importantes cambios de potencial se asocian con pequeños cambios de contenido de agua. El ancho de cada región y la pendiente de la curva varían en función de la textura y de la estructura del suelo. De igual modo pueden

variar para el mismo suelo en función de que esté en proceso de desecamiento o humectación. Este fenómeno, llamado histéresis, se debe a la presencia de aire atrapado y a que los ángulos de contacto del agua con las partículas del suelo no son iguales durante ambos procesos.

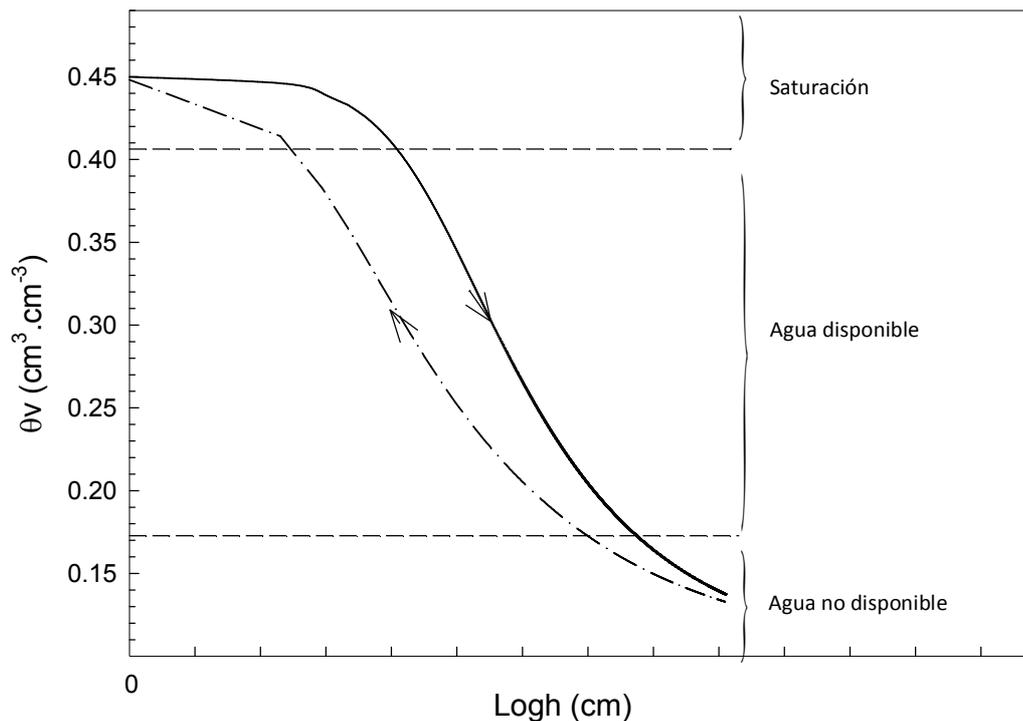


Figura 3: Representación gráfica de la curva de retención o relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo y su carga hidráulica. La línea continua representa el proceso de desecamiento y la línea discontinua representa el proceso de recarga.

La curva de retención y la función conductividad hidráulica son las dos propiedades más importantes que determinan las relaciones hidráulicas en el suelo. A pesar de que su determinación in situ es la más representativa de las condiciones reales del suelo (Klute, 1986), resulta que es un método muy laborioso y que consume mucho tiempo (Kutilek y Nielsen, 1994). Como consecuencia se han desarrollado varios modelos matemáticos en búsqueda de la ecuación que pueda describir adecuadamente las relaciones hidrodinámicas del suelo.

3.2 Modelos matemáticos

El movimiento del agua en el suelo fue descrito por primera vez por Darcy en 1856 quien estableció matemáticamente que en condiciones de suelo saturado, el volumen de agua que fluye por unidad de tiempo en una columna de suelo es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica y al área transversal de la columna e inversamente proporcional a la longitud de la columna,

$$Q = -k_{sat} * A * \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Ecuación 1}$$

siendo,

Q , caudal de agua que fluye ($m^3 s^{-1}$)

k_{sat} , conductividad hidráulica a saturación (ms^{-1})

A , área transversal de la columna (m^2)

ΔH , diferencia de presión hidráulica (m)

L , longitud de la columna (m)

Posteriormente, se ha realizado un considerable progreso en el desarrollo conceptual y la descripción matemática del flujo de agua en condiciones saturadas como no saturadas. En 1899 Slichter generalizó la ley de Darcy en una ecuación tridimensional,

$$q = -k_{sat} * \nabla \psi_h \quad \text{Ecuación 2}$$

donde q es el flujo de agua, k es la conductividad hidráulica a saturación y ψ_h es el potencial energético total del agua en el suelo que resulta de la suma del potencial de presión (ψ_p), del potencial gravitacional (z) y el potencial mátrico (ψ_m).

Estas ecuaciones son válidas para la zona saturada en la cual todos los poros interconectados están llenos de agua. Sin embargo, en condiciones agrícolas, cualquiera que sea el sistema de riego utilizado, los flujos de agua en el suelo suelen producirse en condiciones no saturadas donde $\psi_p = 0$. Por lo que, en 1931 Richards trató a la conductividad hidráulica (k) como función del potencial matricial (ψ_m) y extendió a condiciones de flujo no saturado la generalización de Slichter, originariamente concebida para flujo saturado. Por consiguiente:

$$q = -k(\psi_m) * \nabla \psi_h \quad \text{Ecuación 3}$$

o

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta) \frac{\partial (\psi_m + \psi_z)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(\theta) \frac{\partial (\psi_m + \psi_z)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial (\psi_m + \psi_z)}{\partial z} \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

La modelización del transporte de solutos es más complicada porque depende de los factores que gobiernan el transporte de agua como de los procesos químicos y biológicos que podría sufrir un soluto en el entorno agua-suelo-planta. El transporte de solutos se describe a menudo en base a la ley de Fick que puede ser expresada en su forma más simple como:

$F = -D \frac{dc}{dx} dA$ y que indica que el flujo másico (F) que atraviesa por difusión molecular una sección transversal (dA) por unidad de tiempo es directamente proporcional al gradiente de concentraciones (dc) en la dirección considerada (dx).

Ambas ecuaciones de movimiento del agua y del transporte de solutos son diferenciales no lineales cuya resolución depende de la determinación de las funciones hidráulicas del suelo en cuestión $\psi_m = f(\theta)$ y $k = f(\psi_m)$ o $k = f(\theta)$ así como de los parámetros del soluto a estudiar lo que dificulta resolverlas de forma analítica.

3.3 Modelo numérico HYDRUS-2D

El modelo HYDRUS-2D/3D (Simunek et al. 2006) es un código con enfoque numérico que soluciona el flujo bi y tridimensional de agua así como el transporte de solutos y calor bajo diferentes regímenes de saturación del suelo. El HYDRUS estima estos flujos mediante la resolución numérica de la ecuación de Richards y la ecuación de convección-dispersión respectivamente. Para contabilizar las extracciones de agua por parte de las raíces del cultivo, el HYDRUS incorpora a la ecuación de Richards un sumidero.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[k \left(k_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{iz}^A \right) \right] - S \quad \text{Ecuación 5}$$

en donde θ es el contenido volumétrico de agua en el suelo [$L^3.L^{-3}$], h es la carga hidráulica [L], S representa un sumidero [T^{-1}], x_j ($j=1,2$) representa las coordenadas espaciales, t es el tiempo, k_{ij}^A son los componentes no dimensionales de un tensor, y k es la conductividad hidráulica no saturada [$L.T^{-1}$] representada por:

$$k(h, x, y, z) = k_s(h, x, y, z) * k_r(h, x, y, z) \quad \text{Ecuación 6}$$

en donde k_r es la conductividad hidráulica relativa y k_s es la conductividad hidráulica saturada [$L.T^{-1}$].

3.4 Descripción de los parámetros del modelo HYDRUS-2D

3.4.1 Extracción radicular

El sumidero representa el volumen de agua extraído por unidad de tiempo en unidad de volumen de suelo debido al consumo de agua por la planta. El término S se define según el modelo de Feddes et al. (1978) como sigue:

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad \text{Ecuación 7}$$

donde, $\alpha(h)$ es una función adimensional de estrés hídrico ($0 \leq \alpha \leq 1$) y S_p es el consumo potencial de agua por la planta [T^{-1}].

3.4.2 Características hidrodinámicas del suelo

En HYDRUS, la determinación de las características hidrodinámicas del suelo puede basarse en el modelo de van Genuchten (1980), quien utiliza la distribución estadística de los poros descrita por Mualem (1976) para estimar la relación entre la conductividad hidráulica en condiciones no saturadas y la carga hidráulica utilizando la siguiente ecuación:

$$k(h) = k_s * \frac{\left(1 - (\alpha h)^{n-1} (1 + (\alpha h)^n)^{-m}\right)^2}{(1 + (\alpha h)^n)^{\frac{m}{2}}} \quad \text{Ecuación 8}$$

en donde k_s (cm d⁻¹) es la conductividad hidráulica no saturada, α es el parámetro del suelo que aproxima la entrada de aire, n es el parámetro del suelo en relación con el grado del déficit y m es el parámetro del suelo relacionado con el agua residual. Estos parámetros determinan la forma de la curva $h(\theta)$ y su ajuste con los datos observados en campo.

3.4.3 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales. Este método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». Los fundamentos matemáticos de este método se han descrito por Newman (1975), Zienkiewicz (1977) y Pinder y Grey (1977).

3.4.4 Transporte de solutos

El transporte de solutos se describe mediante la ecuación de convección-dispersión en la fase líquida y de difusión en la fase gaseosa como sigue:

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c}{\partial x_i} + \mu_s \rho s + \gamma_w \theta + \gamma_s \rho s c_s \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde c es la concentración de la solución [ML^{-3}], s es la concentración adsorbida [-], q_i es la componente del flujo [LT^{-1}], μ_w y μ_s son las constantes de primer orden del soluto en la fase líquida [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$] y sólida [T^{-1}] respectivamente; ρ es la densidad del suelo [ML^{-3}], S es el término sumidero relativo al transporte de agua, c_s es la concentración del sumidero [ML^{-3}], D_{ij} es el tensor de los coeficientes de dispersión [L^2T^{-1}]

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 Parcela experimental

4.1.1 Ubicación y material vegetal

Los estudios experimentales del presente trabajo se llevaron a cabo en una finca comercial de cítricos llamada “lo Montero” y ubicada al nordeste de la región de Murcia en el paraje de Campotéjar a 7 Km al norte de Molina de Segura ($38^{\circ}07'N$, $1^{\circ}13'W$) (Figura 4). Es una zona semiárida con una Evapotranspiración potencial (ET_p) de $1500 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ y una media anual de precipitaciones que no supera los 350 mm. Estas precipitaciones suelen ser de carácter torrencial y acontecen en los meses de media a baja demanda climática.

La finca tiene un total de 12,2 ha de cultivo de cítricos (Figura 5). Para realizar los ensayos, se seleccionó una parcela de 5 ha cultivadas con Mandarinos (*Citrus clementina* cv. ‘Orogrande’) adultos, de 8 años de edad e injertados sobre patrón Carrizo [*Citrus sinensis* (L.) Osb. x *Poncirus trifoliata* L.], en un marco de 5 x 3,5 m para realizar los ensayos.



Figura 4: Ubicación de la finca experimental en Campotéjar-Murcia ($38^{\circ} 07'N$; $1^{\circ} 13'O$).



Figura 5: Finca experimental "Lo Montero" - Campotéjar ($38^{\circ} 07'N$; $1^{\circ} 13'O$). (1) Parcela de mandarinos, (2) EDAR del norte de Molina de Segura y (3) Trasmase Tajo-Segura.

4.1.2 Suelo

El suelo es de textura Arcillo-Limosa. Las características físicas del suelo se determinaron a partir de muestras recogidas a distintas profundidades (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) en 3 ubicaciones distintas seleccionadas al azar. La densidad aparente es de $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$ y se determinó a partir de muestras de suelo inalterado extraídas en varios sitios y a distintas profundidades con una barrena especialmente designada para este fin. La capacidad de retención de agua en el suelo a 33 y 1500 kPa fue determinada mediante el uso de las ollas de presión según el método de Richards. Este suelo posee unos contenidos volumétricos de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}) y en el punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) de 25 % y 8 % respectivamente, teniendo por tanto una capacidad de retención de agua disponible de 17 %.

4.1.3 Cabezal de riego y fuentes de agua

La parcela experimental se equipó con un cabezal de riego independiente del resto de la finca y se emplearon tres fuentes de agua de calidad distinta. La primera fuente “F1” procedente del trasvase Tajo-Segura y considerada de buena calidad agronómica con una conductividad eléctrica ligeramente superior a la unidad ($CE \approx 1 \text{ dS.m}^{-1}$). La segunda fuente “F2” de agua de riego provenía de la depuradora de Molina Norte con una conductividad eléctrica superior a 4 dS.m^{-1} . Esta fuente se mezclaba a nivel del cabezal de riego con agua de la fuente “F1” para mantener la CE alrededor de 3 dS.m^{-1} dado que los cítricos no manifiestan reducciones significativas en la producción final hasta valores de conductividad eléctrica igual a $2,5 \text{ dS.m}^{-1}$ (Alva y Syvertsen, 1991). La tercera fuente de agua “F3” se proporcionaba por la comunidad de regante de Campotéjar y cuya calidad variaba en el tiempo ($1 \leq CE \leq 4$) en función de los recursos de agua disponibles en cada momento y de la política de gestión acordada por los gestores.

➤ **Trasvase TAJO-SEGURA**

El trasvase Tajo-Segura es una de las obras hidráulicas de ingeniería más grandes realizadas en España. Mediante este trasvase, se deriva agua del río Tajo desde los embalses de Entrepeñas (Provincia de Guadalajara) y Buendía (Provincia de Cuenca) al río Segura a través de la presa del embalse de El Talave.



Fotografía 1: Trasvase Tajo-Segura

➤ **Comunidad de regantes**

La Comunidad de regantes de Campotéjar comprende una extensión de terreno de 4.000 has y consta de 1.100 comuneros. Utiliza tres fuentes de agua para el abastecimiento de sus regantes (agua del Trasvase Tajo-Segura, agua subterránea y agua regenerada). La utilización de una fuente u otra, o la distribución de una mezcla de agua depende de la disponibilidad de agua de buena calidad, así como de una serie de criterios agronómicos que llevan a adoptar una estrategia de suministro basada en el ahorro el agua de buena calidad para los meses de alta demanda de riego. Así, durante los meses de menor demanda (Noviembre-Marzo) se utiliza un 50% agua de pozo, un 30% del trasvase y un 20% de depuradora. Durante los meses de mayor demanda (Abril-Octubre) se aplica un 15% agua depurada, 45% agua de pozo y 40% agua trasvase (comunicación personal). Se busca siempre utilizar el agua de peor calidad durante la época de menor demanda y guardar la de mejor calidad para la época de mayor demanda.

➤ **Depuradora de molina norte.**

La depuradora de Molina Norte tiene una capacidad de $9.125.000 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ y actualmente trabaja a $3.733.594 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$. El sistema de depuración utilizado es de fangos activos de doble etapa.



Fotografía 2: EDAR de Molina Norte

4.1.4 Sistema de riego

La parcela de mandarina disponía de un sistema de riego localizado con un lateral por hilera de árboles y 3 goteros auto-compensantes de $4 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ por árbol separados de 90 cm entre sí. La gestión del riego se realizó por tiempos empleando para ello un programador de riego tipo NTC 116 (NutriControl) instalado en el cabezal del sistema de riego localizado. Los aportes de agua fueron programados semanalmente en función de la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) estimada a partir de la evapotranspiración de referencia (E_{To}) aplicando los datos climáticos locales facilitados por el servicio de información agraria de Murcia (SIAM) y corregida por los coeficientes de cultivo “ K_c ” correspondientes. Los valores de K_c aplicados son los proporcionados por Doorenbos y Pruitt (1986) y Fereres y Goldhamer (1990) y teniendo en consideración la lluvia acaecida la semana anterior.

La cantidad de agua aplicada se midió mediante contadores volumétricos instalados a pie de parcela.

4.1.5 Diseño experimental

Atendiendo a las 3 fuentes de agua señaladas se diferenciaron 6 tratamientos de riego que vienen detallados a continuación:

- C-AT** : Regado con agua procedente del trasvase para cubrir el 100% de la ETc durante todo el ciclo del cultivo.
- RDC-AT** : Regado con agua procedente del trasvase para cubrir el 50% de la ETc durante la fase de acumulación de azúcares y el 100 % de la ETc durante el resto del ciclo productivo.
- C-AC** : Regado con agua procedente de la comunidad de regantes para cubrir el 100% de la ETc durante todo el ciclo del cultivo.
- RDC-AC** : Regado con agua procedente de la comunidad de regantes para cubrir el 50% de la ETc durante la fase de acumulación de azúcares y el 100 % de la ETc durante el resto del ciclo productivo.
- C-AD** : Regado con agua procedente de la depuradora de Campotéjar para cubrir el 100% de la ETc durante todo el ciclo del cultivo.
- RDC-AD** : Regado con agua procedente de la depuradora de Campotéjar para cubrir el 50% de la ETc durante la fase de acumulación de azúcares y el 100 % de la ETc durante el resto del ciclo productivo.

Cada tratamiento estaba formado por 4 repeticiones distribuidas según un diseño experimental completamente aleatorio. Cada repetición constaba de 3 x 4 árboles (10 árboles de borde y 2 centrales como testigos) (Figura 6).

En 2008, la fase de acumulación de azúcares se extendió desde el 22 de Junio hasta el 13 de Agosto.



Figura 6: Parcela de mandarinos con 6 tratamientos de riego y 4 repeticiones por tratamiento. Los círculos coloreados indican los árboles testigo en cada repetición y los colores representa los distintos tratamientos como sigue: Azul oscuro y claro: Control y RDC respectivamente con agua del trasvase, Rojo y Naranja: Control y RDC respectivamente con agua de la depuradora, Verde y amarillo: Control y RDC respectivamente con agua de la comunidad de regantes.

4.1.6 Instrumentación y Medidas

En tres repeticiones de cada tratamiento se equipó un árbol testigo con 2 lisímetros de succión, 3 tensiómetros tipo WaterMark y un tubo de acceso de sonda de neutrones (Figura 7) a 90 cm del tronco y en un plan perpendicular a la lateral de riego. Los lisímetros de succión de la marca “SDEC”, de 40 cm de longitud y 63 mm de diámetro, se instalaron a 30 cm de profundidad y a 10 y 30 cm del gotero. Los 3 tensiómetros tipo WaterMark se ubicaron a 20 cm del gotero donde se introdujeron a 20, 40 y 60 cm de profundidad. La instalación de ambos instrumentos se realizó cuidadosamente utilizando una lechada de suelo para asegurar un buen contacto con el mismo. En el lado opuesto a los tensiómetros y a 20 cm del gotero se instaló un tubo de acceso de sonda de neutrones. El tubo de hierro galvanizado de 41.5 mm de diámetro interior y 140 cm de longitud, se introdujo hasta 1 m de profundidad.

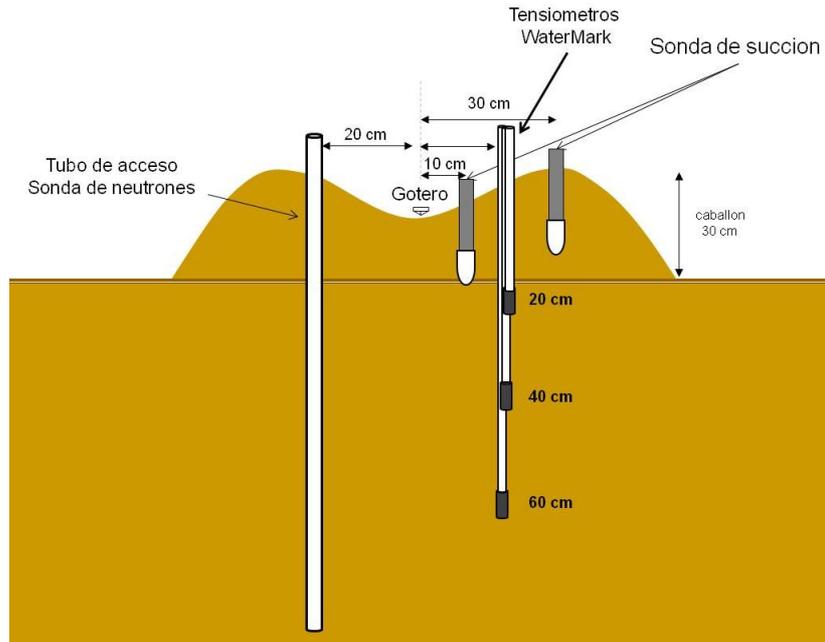
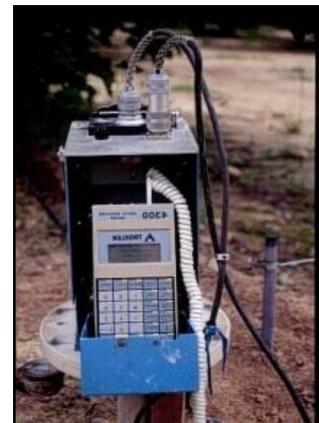


Figura 7: Instrumentos de medición del contenido de agua en el suelo, del potencial mátrico y de muestreo de la solución del suelo.

➤ 4.1.6.1 Estado hídrico del suelo

Se realizaron medidas cada quince días del contenido volumétrico de agua del suelo, mediante el uso de una sonda de neutrones (TROXLER, modelo 4300) (Fotografía) y del potencial matrico, mediante tensiómetros tipo WaterMark.

La sonda de neutrones se basa en la termalización de neutrones emitidos por una fuente radioactiva constituida por una mezcla de (Americium 241: Beryllium) doblemente encapsulada. El número de neutrones termalizados es función del contenido de humedad del suelo, y por tanto depende de la textura de éste, lo que exige, en cada tipo de suelo, la determinación de una ecuación de calibración.



Fotografía 3: Sonda de Neutrones

Las medidas se realizaron, desde 20 hasta 100 cm de profundidad, a intervalos de 10 cm. El tiempo de integración de cada lectura de la sonda fue de 30 s. Dado los errores de medida en superficie con la sonda de neutrones, la humedad en los primeros 10 cm se determinó con la técnica de reflectometría en el dominio del tiempo o Time Domain Reflectometry (TDR), usando un equipo (TEKTRONIX, modelo 1502B). Para ello se instalaron, a 10 cm de cada tubo de acceso, dos varillas de acero inoxidable, separadas 4 cm, de 0.7 cm de diámetro y 15 cm de longitud.

El equipo TDR consta de una unidad de emisión y detección de ondas electromagnéticas, que aplica una diferencia de potencial corta y rápida a través de un cable coaxial de 50 ohmios conectado a dos electrodos (varillas de acero inoxidable no imantable) mediante unas pinzas. Cuando la señal alcanza el final de las varillas, se refleja y vuelve hacia la unidad central, donde es identificada por un cambio en la diferencia de potencial mediante un osciloscopio.

Los tensiómetros WaterMark constan de un par de electrodos incrustados y bien protegidos dentro de una capsula porosa. El movimiento del agua entre el suelo y la capsula produce un cambio en la resistencia eléctrica entre los 2 electrodos del sensor. Estos cambios en la resistencia se convierten a potencial mátrico mediante una ecuación de calibración proporcionada por el fabricante y cubren el rango entre 0 y -200 kPa (Irrometer 2005).

➤ 4.1.6.2 Solución del suelo

La solución del suelo es la solución retenida en los poros del mismo donde se extienden las raíces de la planta para cubrir sus necesidades hídricas y nutritivas. Esta solución se queda retenida por fuerzas de tipo matricial y su disponibilidad disminuyen conforme disminuye el contenido de humedad en el suelo y aumentan las fuerzas de retención (se hacen negativas).

La sonda de succión es el único método viable para extraer “in-situ” la solución del suelo sin proceder a diluciones de la misma, a pesar de que su funcionamiento se limita a condiciones de potencial matricial mayor de -100 kPa. Aunque este intervalo es muy pequeño, si se le compara con el correspondiente de “agua disponible” para la planta, no debe olvidarse que la parte más importante del movimiento de agua en el suelo se realiza a potenciales matriciales superiores a -100 kPa (Aragüés et al., 1986). Este método es relativamente rápido y sencillo y su fiabilidad mecánica es buena.

Cada 15 días y en cada uno de los lisímetros de succión se generaba una tensión equivalente a -80 kPa utilizando una bomba eléctrica de vacío de la marca “SDEC” (Fotografía 4). Al día siguiente se recogía la solución, se embasaba y se llevaba a analizar en el laboratorio.



Fotografía 4: Bomba de vacío y lisímetro de succión.

➤ 4.1.6.3 Extracto de pasta saturada

La preparación de la pasta saturada se efectúa de la siguiente manera: se añade lentamente agua destilada a una muestra en agitación de suelo (200-400 g. aprox.) seco al aire libre y, generalmente, molido y tamizado por tamiz de 2 mm; se mezcla bien y se deja reposar durante la noche, al menos, durante 4 horas para conseguir el equilibrio entre el suelo y la solución. Una vez comprobado el punto de saturación, a partir de esta pasta y, por filtrado con succión en un embudo de vacío con papel de filtro Whatman Nº 50, se obtiene el extracto saturado (Rhoades y Clark, 1978).

La conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada y su contenido en calcio, magnesio y sodio se determinaron 3 veces durante el experimento. Al inicio de los ensayos (enero), al final de la aplicación del RDC (agosto) y al final de la estación de riego (Diciembre). En cada fecha se tomaron muestras de suelo a 10 y 30 cm del gotero y a 20, 40 y 60 cm de profundidad en cada punto.

4.2 *Calibración del modelo numérico HYDRUS-2D*

La evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo y la conductividad eléctrica de la solución del suelo a escala horaria se simularon durante un año aplicando el modelo HYDRUS 2D (Šimůnek et al., 2006) en un perfil de suelo regado por goteo con 2 tipos de agua y sometido a 2 estrategias de riego. A pesar de algunas limitaciones, la CE es la forma estándar de expresar la salinidad de las aguas y suelos, debido a la rapidez y reproducibilidad de la media y a su buena fiabilidad en el intervalo usual de concentraciones en aguas y suelos (Aragüés et al., 1986).

El perfil de suelo simulado fue el de un corte perpendicular a la línea de goteros a 90 cm del tronco. Las dimensiones del perfil fueron de 250 cm de largo, desde el gotero hasta la mitad de la calle, y 1 m de profundidad a excepción de los primeros 50 cm desde el gotero donde la profundidad del

perfil es variable entre 100 y 130 cm debido a la topografía del caballón sobre el cual están plantados los arboles (Figura 8). Las condiciones de contorno fueron definidos como flujo nulo en los bordes del perfil a “ $r=0$ ” y “ $r=250$ ” y drenaje libre en el límite inferior. La parte superior del perfil se sometió a condiciones atmosféricas donde el flujo de evapotranspiración potencial fue calculado de la evapotranspiración de referencia según la ecuación de Penman Monteith y los coeficientes del cultivo en cuestión y considerando que la evaporación superficial no supera el 5% del total de la ETc (Skaggs et al., 2004). El flujo de agua entrante en el perfil fue considerado como variable en el tiempo según la programación de riego (dosis y frecuencia) aplicada en campo.

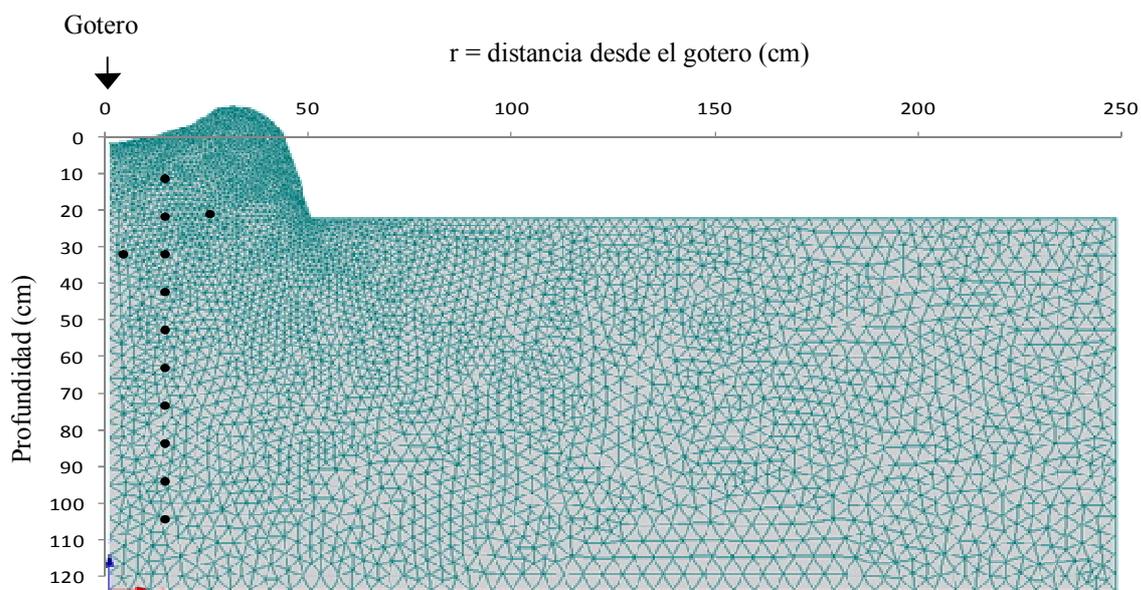


Figura 8: Geometría del perfil de suelo simulado. Los puntos negros representan los nudos de observación equivalentes a los puntos de muestreos en el campo.

El alcance del radio saturado por debajo del gotero fue variable en función de las condiciones de humedad en el suelo y el tiempo de riego programado. Este radio fue determinado por el mismo modelo HYDRUS-2D utilizando un código modificado y facilitado por el autor (comunicación personal). Este código es capaz de cambiar las condiciones de contorno en el

límite superior del perfil desde las condiciones Newman (flujo) a las condiciones Dirichlet (tensión) cada vez que la carga hidráulica para acomodar el flujo entrante es superior a cero (Gärdenäs et al., 2005). La distribución de la extracción de agua por las raíces fue descrita con la función bidimensional de Vrugt et al. (2001), cuyos parámetros se estimaron a partir de observaciones de campo y experiencias previas (Tabla 1).

Tabla 1: Valores de entrada en la ecuación de Vrugt et al., 2001 para la distribución bidimensional de las raíces en el suelo.

Parámetro	Distribución vertical	Distribución horizontal
Máxima profundidad de raíces	150 cm	75 cm
Profundidad de la Máxima intensidad	100 cm	40 cm
Parámetro de ajuste	1.5	1

El efecto conjunto del estado energético del agua en el suelo y de la magnitud de la transpiración potencial sobre la extracción de agua por las raíces fue considerado a partir del modelo de Feddes et al. (1978) (Figura 9) utilizando los valores representados en la tabla 2.

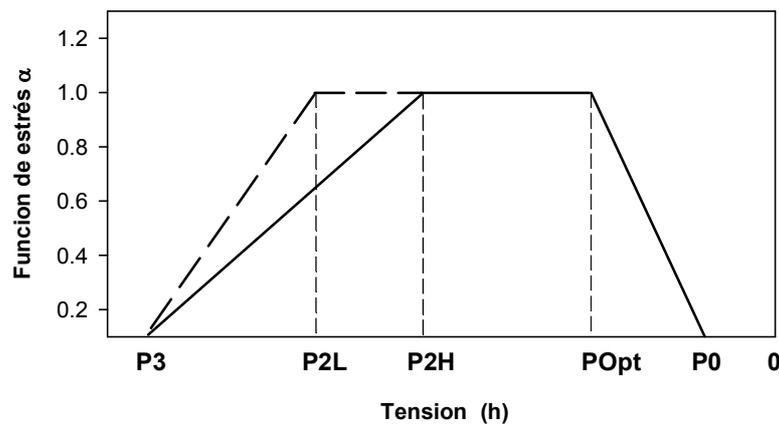


Figura 9: Representación gráfica de la función de estrés determinada por Feddes et al. (1978). Las líneas continua y discontinua se aplican en condiciones de baja (L-Tp) y alta (H-Tp) transpiración potencial respectivamente.

Tabla 2: Parámetros de la función de estrés determinada por Feddes et al. (1978) y sus valores aplicados en este trabajo.

Parámetro	Descripción	Valor utilizado
Po	Tensión de agua en el suelo [L] por debajo de la cual empieza la extracción de agua por las raíces	-1
POpt	Tensión de agua en el suelo [L] por debajo de la cual la extracción de agua por las raíces es máxima	-20
P2H	Tensión de agua en el suelo [L] por debajo de la cual la extracción de agua por las raíces empieza a disminuir progresivamente cuando la transpiración potencial es igual a r2H	-500
P2L	Tensión de agua en el suelo [L] por debajo de la cual la extracción de agua por las raíces empieza a disminuir progresivamente cuando la transpiración potencial es igual a r2L	-800
P3	Tensión de agua en el suelo [L] por debajo de la cual la extracción de agua es nula.	-8000
r2H o H-Tp	Transpiración potencial [LT ⁻¹], alta.	0.1
r2L o L-Tp	Transpiración potencial [LT ⁻¹], baja.	0.05

Los valores de la evapotranspiración del cultivo (Evaporación = 0.05*ETc y Transpiración = 0.95 ETc), del flujo entrante de riego y de la conductividad eléctrica del agua de riego fueron introducidos a escala horaria en el modelo HYDRUS-2D. El suelo se ha considerado homogéneo en todo el perfil y sus características hidrodinámicas (θ_r , θ_s y K_s) así como los parámetros (α , m y n) del modelo de van Genuchten (1980) se estimaron a partir de los datos de textura y densidad aparente utilizando la red neuronal artificial incorporada dentro del HYDRUS-2D.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de la calidad del agua de riego se realizó mediante análisis mensuales de las tres fuentes de agua disponibles, AT (Agua trasvase Tajo-Segura), AC (Agua Comunidad de Regantes) y AD (Agua Depuradora). Se llevó a cabo un seguimiento de la conductividad (CE), de la relación de adsorción de sodio (RAS) y de los sólidos disueltos totales (SDT)

desde noviembre de 2007 hasta octubre de 2008 como se presenta en la Figura 10 (A, B, C y D). La CE de la fuente “AT” se mantuvo ligeramente por encima de la unidad registrando una media anual de $1,19 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. La calidad de la fuente “AD” osciló alrededor de una media anual de $3,18 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ gracias a la mezcla automatizada con agua de la fuente “AT” que se realizaba en el cabezal de riego. La CE de la fuente “AC” manifestó unas fluctuaciones considerables entre 1 y $3,8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Esto, demuestra la variabilidad temporal de la disponibilidad de los recursos hídricos y refleja la estrategia de distribución de agua descrita anteriormente y adoptada por la administración de la comunidad de regantes.

Durante la estación de riego, los valores de la RAS de la fuente AT fueron bajos y ligeramente variables registrando un valor medio anual de 1,75 mientras que los valores de la RAS de las fuentes AC y AD oscilaron entre 3 y 9 marcando valores máximos en Julio (Figura 10B). La evaluación conjunta de la CE y la RAS de las tres fuentes de agua siguiendo la clasificación de calidad de agua para riego adoptada por la FAO (Ayers y Westcott, 1985), resulta favorable descartando posibles riegos de sodificación y problemas de infiltración de agua en el suelo (Figura 10C). Sin embargo, queda altamente recomendable la aplicación de una fracción de lavado porque las sales que no afectan a la estructura del suelo pueden aumentar el potencial osmótico en la solución del mismo reduciendo por lo tanto la disponibilidad del agua para la planta. Por ejemplo; la concentración media anual de los sólidos disueltos totales (SDT) de las fuentes AC y AD (Figura 10D) fue alrededor de $1,5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Es decir, durante la estación de riego, la aplicación de un promedio de $5000 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de estas fuentes de agua podría aportar alrededor de $7500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de sólidos que se concentran en la superficie mojada bajo riego localizado. Esta no suele superar el 30% de la superficie total en el caso de árboles frutales, lo que equivaldría a un aporte anual de sólidos igual $2,5 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

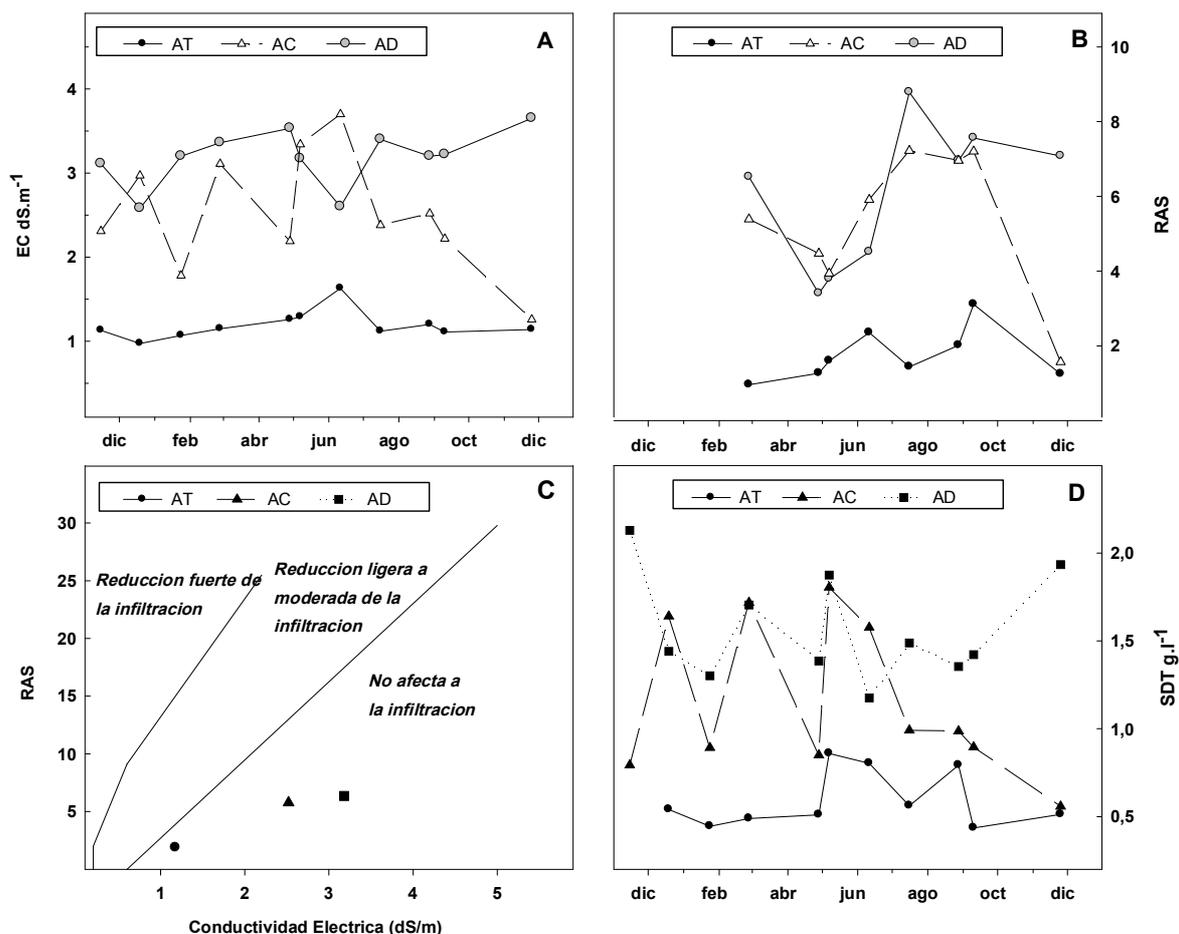


Figura 10: (A) Evolución de la Conductividad Eléctrica CE; (B) Relación de Adsorción de Sodio RAS; (C) Relación RAS-CE de los distintos tipos de agua de riego; (D) Evolución de Sólidos Disueltos Totales SDT.

5.1 Necesidades hídricas, aportes de agua (ETc, Riego_acc)

Los datos de la evapotranspiración de referencia (ET_o), los coeficientes de cultivo y la lluvia acaecida, recogidos en la tabla 3, fueron utilizados para determinar los aportes de riego. Así, en el tratamiento C se aplicaron un total de 594 mm frente a 498 mm en el tratamiento RDC, lo que supuso un ahorro del 17 %.

Tabla 3: Valores de la evapotranspiración de referencia (ET_o mm.mes⁻¹) y del cultivo (ET_c mm.mes⁻¹), de los coeficientes de cultivo, de las precipitaciones (mm.mes⁻¹) y de los aportes de riego (mm.mes⁻¹) aplicados durante la campaña 2007/2008.

	ET_o	K_c	ET_c	Precip.	Riego	
					Control	RDC
Noviembre-07	68.39	0.45	30.78	0.00	6.50	6.50
Diciembre-07	47.7	0.40	19.08	2.40	18.40	18.40
Enero-08	41.86	0.42	17.58	10.60	8.60	8.60
Febrero-08	50.42	0.50	25.21	3.70	24.20	24.20
Marzo-08	52.83	0.50	26.42	26.40	10.30	10.30
Abril-08	118.04	0.55	64.92	0.80	67.10	67.10
Mayo-08	136.08	0.55	74.84	3.40	82.20	82.20
Junio-08	144.58	0.60	86.75	67.00	94.20	79.00
Julio-08	165.7	0.60	99.42	44.50	88.90	36.70
Agosto-08	185.31	0.60	111.19	4.80	119.10	91.00
Septiembre-08	169.96	0.55	93.48	0.00	68.30	68.30
Octubre-08	117.02	0.50	58.51	48.60	6.54	6.54
Total	1297.89		708.17	212.20	594.34	498.84

5.2 Estado hídrico del suelo

Los registros quincenales del contenido volumétrico de agua en el suelo realizados con la sonda de neutrones y el equipo TDR permitieron determinar el stock hídrico hasta 1 m de profundidad y seguir su evolución a lo largo de la estación de riego. En la figura 11 se puede observar el efecto de las estrategias de riego aplicadas sobre la evolución del stock hídrico en la zona radicular. En los tratamientos control regados al 100% de la ET_c con las 3 fuentes de agua, el stock hídrico se mantuvo alrededor de capacidad de campo (200-250 mm.m⁻¹). Para los tratamientos RDC regados al 50% desde el 22 de junio hasta el 13 de agosto, el stock hídrico sufrió un agotamiento

considerable alcanzando un déficit máximo del 70% por debajo de la capacidad de campo en el caso del tratamiento RDC-AT (80-100 mm.m⁻¹). La reanudación del riego en agosto al 100% de la ETc produjo una recuperación progresiva y lenta del contenido de agua inicial. El agotamiento del stock hídrico fue más pronunciado en el RDC-AT que en RDC- AC y RDC- AD. Esto podría deberse a que el agua procedente del trasvase con menor contenido de sales quedo más disponible para la planta que el agua de baja calidad.

Esta observación se corrobora al analizar la evolución de potencial mátrico medido con tensiómetros WaterMark a distintas profundidades (Figura12). En los tres tratamientos control (C-AT, C-AC y C-AD), el potencial mátrico se mantuvo por encima de -20 kPa durante todo el ciclo de producción, indicando la presencia de condiciones óptimas de humedad en los primeros 60 cm de profundidad. En los tratamientos bajo riego deficitario controlado (RDC-AT, RDC-AC y RDC-AD), solo los primeros 20 cm de suelo se mantuvieron a un potencial superior a -20 kPa mientras que a 40 y 60 cm de profundidad el potencial del agua disminuyo progresivamente debido al déficit de agua aplicado. En el perfil del suelo bajo RDC con agua de buena calidad “AT” el potencial mátrico fue significativamente inferior a los valores registrados bajo RDC y aplicación de agua de baja calidad. Esto destaca otra vez la presencia de un potencial osmótico generado por las sales y que disminuye la disponibilidad del agua para las plantas regadas con aguas de baja calidad.

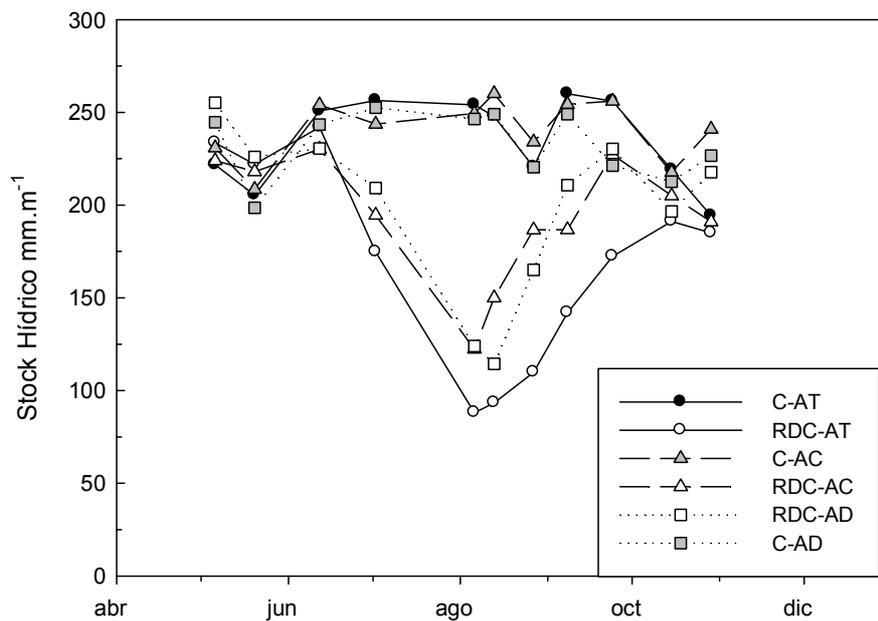


Figura 11: Evolución del contenido de agua en el suelo para los seis tratamientos. Cada punto es el promedio de 3 repeticiones. Las siglas C y RDC corresponden al tratamiento control, y de riego deficitario controlado respectivamente. Las fuentes de agua utilizadas fueron AT (Agua trasvase Tajo-Segura), AD (Agua Depuradora) y AC (Agua Comunidad de Regantes).

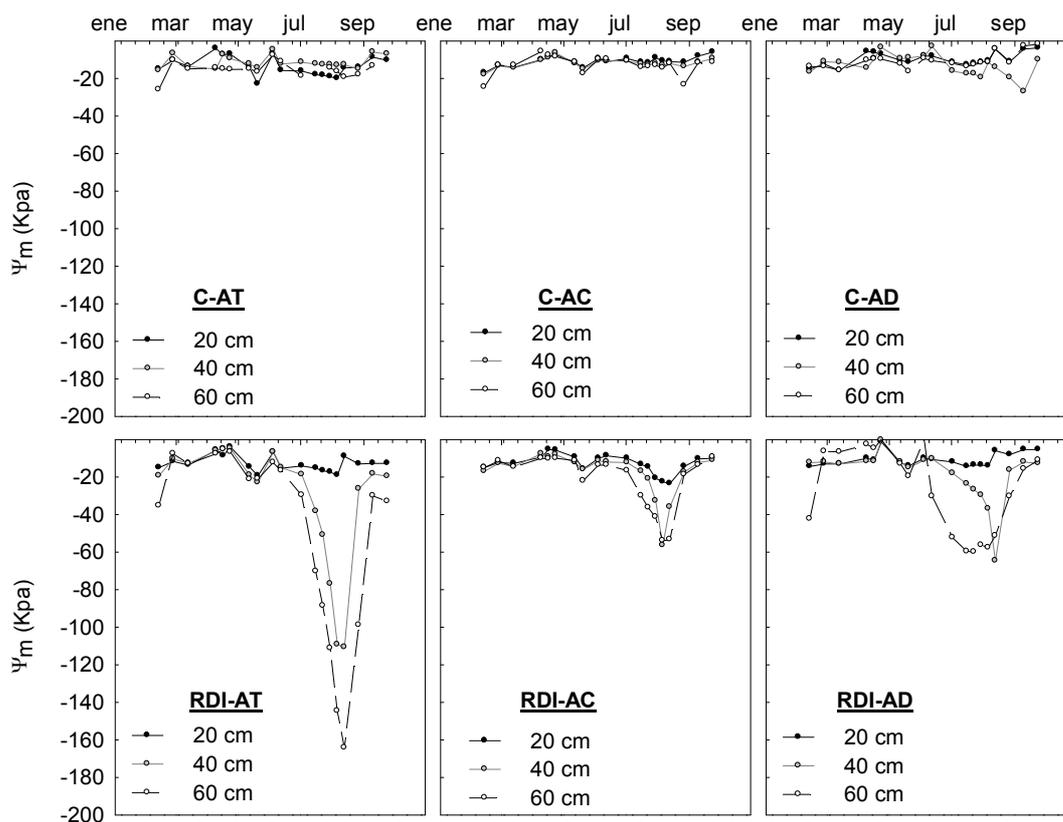


Figura 12: Evolución del potencial mátrico del suelo para los seis tratamientos de riego. Las siglas son iguales a las descritas en la figura 11.

5.3 Conductividad eléctrica de la solución del suelo y de la pasta saturada.

La calidad de la solución del suelo fue evaluada a partir de muestras extraídas cada 15 días a 30 cm de profundidad y a 10 y 30 cm del gotero mediante lisímetros de succión. Los valores de CE registrados, sea a 10 ó a 30 cm del gotero, fueron muy dispersos sin ninguna diferencia significativa entre los distintos tratamientos (Figura 13). Tampoco se observó una clara diferencia entre ambas distancia del gotero. Sin bien, los valores observados a 30 cm fueron ligeramente superiores a aquellos observados a 10 cm del gotero reflejando una mayor absorción de la planta a esta última distancia.

En enero la CEE media de todos los tratamientos fue de 2,45 dS.m⁻¹ existiendo solo diferencias significativas en el tratamiento regado con agua

“AD”, el cual registró a 30 cm del gotero una CEe de 3,75 dS.m⁻¹ considerablemente superior al resto de las muestras (Figura 15A).

En agosto, al final del RDC y antes de reanudar el riego al 100% de la ETc se registraron importantes diferencias en los valores de la CEe entre tratamientos y entre distancias del gotero como se detalla a continuación;

- 1- Entre tratamientos control, los valores de la CEe se clasificaron de menor a mayor: C-AT < C-AD < C-AC. Estos resultados coinciden con la calidad del agua de riego como se ha descrito anteriormente en la figura 10A. Por otro lado, el tratamiento C-AC fue el único en manifestar una CEe significativamente superior a 30 que a 10 cm del gotero.
- 2- Entre tratamientos RDC, el orden de clasificación de los valores de la CEe fue similar al de los tratamientos control: C-AT < C-AD < C-AC. Sin embargo, las discrepancias fueron más pronunciadas, mostrando unas diferencias considerables entre tratamientos y entre distancias del gotero, sobre todo, en los tratamientos regados con agua de baja calidad. Se nota como la reducción de los aportes de riego durante los meses de alta demanda climática duplica la concentración de sales en la zona radicular. Este fenómeno, somete la planta a un estrés adicional provocado por el aumento del potencial osmótico y la reducción de la disponibilidad del agua restante en el suelo.

En diciembre, la reducción de la demanda climática permitió a los aportes de riego y a las precipitaciones desplazar las sales fuera de la zona radicular. Como consecuencia, desaparecieron las diferencias entre tratamientos y entre distancias del gotero para marcar de nuevo un valor promedio de 2,31 dS.m⁻¹ muy cerca del valor registrado en enero del mismo año (Figura 14).

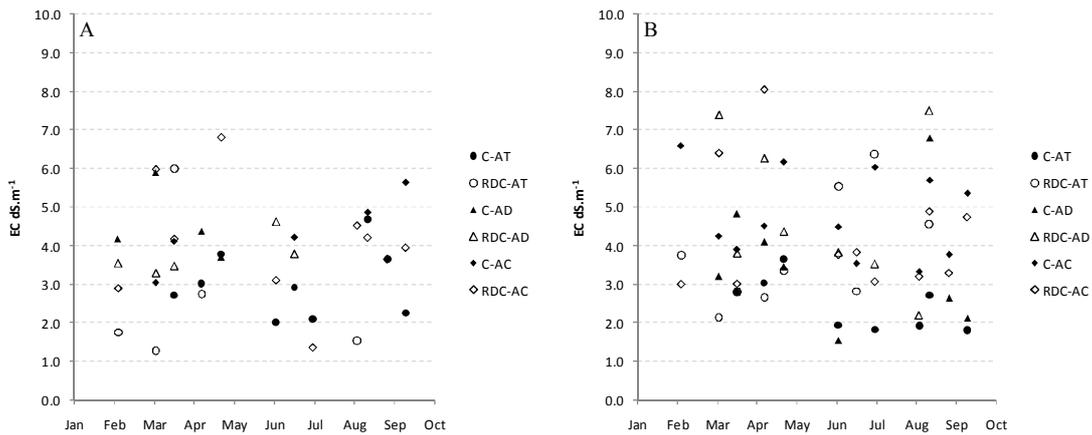


Figura 13: Conductividad eléctrica de la solución del suelo extraída a 30 cm de profundidad, (A) a 10 y (B) a 30 cm del gotero.

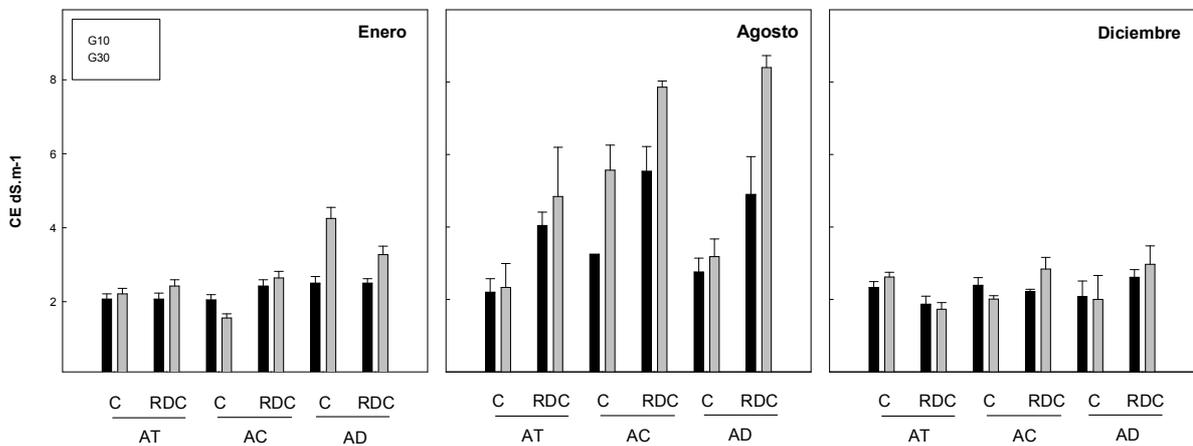


Figura 14: Conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada en los distintos tratamientos de riego a 10 cm (G10) y a 30 cm (G30) del gotero, al principio de la estación de riego (enero), al final de la aplicación del RDC (agosto) y al final de la estación de riego (diciembre). Las siglas C y RDC corresponden a tratamiento control y riego deficitario controlado respectivamente. Las siglas AT, AC y AD corresponden a las aguas de riego procedentes del trasvase, de la comunidad de regantes y de la depuradora respectivamente. Cada punto es el promedio de 9 valores tomados a 3 profundidades en tres repeticiones. Las barras verticales representan el error estándar.

5.4 Validación del modelo HYDRUS-2D

Para la validación del modelo HYDRUS-2D se compararon, bajo dos estrategias de riego, los valores simulados de stock hídrico con sus

equivalentes registrados en campo con sonda de neutrones en un perfil de 100 cm de profundidad y situado a 20 cm del gotero (Figura 16). En el tratamiento control, regado al 100% de sus necesidades hídricas, se observa un buen ajuste entre los datos observados y aquellos simulados durante toda la estación de riego. Para el tratamiento RDC se produjo un desfase entre los datos observados y los datos simulados durante del periodo de relleno del perfil. A partir del 13 de agosto, cuando se reanudó el riego al 100% de la ETc, el stock hídrico tardó más de 50 días para recuperar el nivel que tenía a principios de junio. Según la simulación numérica, la recuperación no tardó más de 20 días. Esto apunta a la posible presencia de un fenómeno de histéresis en la curva de humectación del suelo. Es decir que para el mismo valor de potencial hídrico, el suelo de la parcela experimental, puede tener valores de humedad distintos según si está en fase de humectación o en fase de desecamiento. A mencionar, que el efecto de histéresis no se ha tenido en cuenta en la calibración del modelo.

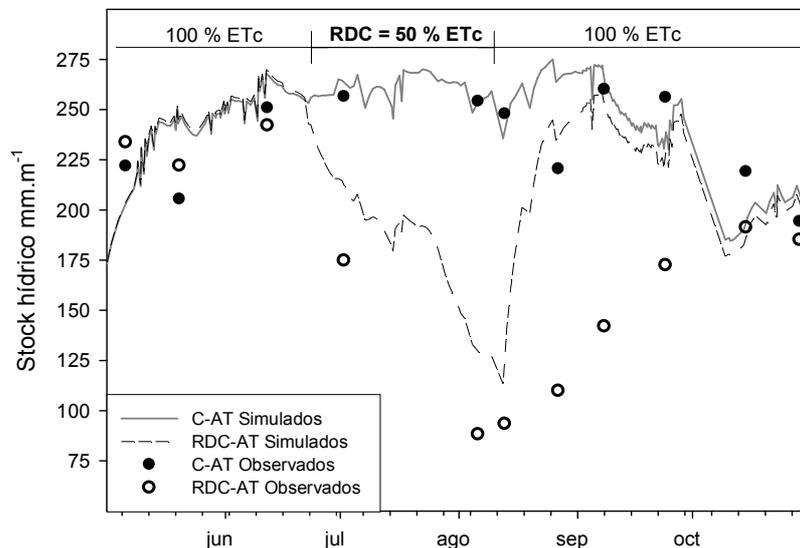


Figura 15: Evolución del contenido de agua en el suelo. Los puntos rellenos y abiertos representan los valores observados en campo en los tratamientos control (C) y deficitario (RDC) respectivamente. La línea continua y discontinua representan los valores simulados con el HYDRUS-2D para los mismos tratamientos.

La figura 16 representa la correlación entre los valores observados y simulados del stock hídrico y de la conductividad eléctrica de la solución del suelo respectivamente. Ambas series de datos se ajustan a una regresión lineal con un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.43 para el stock hídrico y 0.65 para la CEs. En la gráfica de ajuste del stock hídrico (Figura 16A), cabe destacar que el mayor número de los valores se ajusta bastante a la línea 1:1 a excepción de los valores registrados durante el periodo de rehumectación del tratamiento RDC.

La correlación de la CEs indica que el modelo HYDRUS-2D tiende a subestimar los valores registrados en campo. Esto se debe a que el modelo de movimiento de agua y el de transporte de solutos escogidos en la configuración de entrada consideran que la totalidad de agua y solutos es móvil en el suelo. Es decir que el agua de riego es capaz de arrastrar toda la sal que podría encontrar en su camino. Como consecuencia, la conductividad de la solución del suelo se acerca progresivamente a la del agua de riego. Este problema se resolvería aplicando el modelo de porosidad dual que se basa en suponer que el medio consiste en dos dominios separados pero conectados. De ellos, uno es asociado a una red de fracturas, macroporos o poros intraagregados, mientras que el otro dominio representa bloques de la matriz o agregados de suelo. Así, los modelos de porosidad doble generalmente implican dos ecuaciones de flujo/transporte que están acopladas mediante un término fuente/sumidero que permite representar la transferencia de agua/soluto entre ambos subdominios (Simunek et al., 2003).

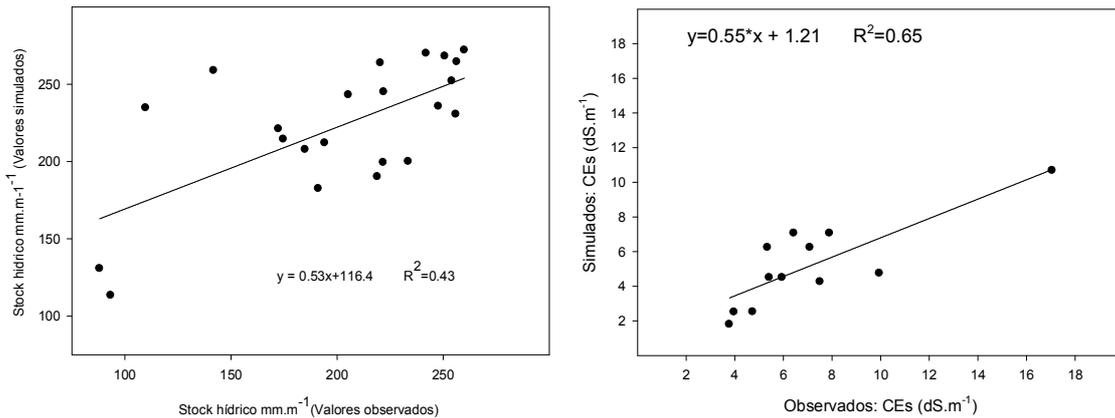


Figura 16: Relación entre los valores observados y los valores simulados del stock hídrico a 20 cm del gotero.

Con carácter ilustrativo, en las figuras 19 y 20, se ha representado la distribución bidimensional de la conductividad eléctrica de la solución del suelo CEs en un corte de suelo perpendicular a la línea de goteros hasta 1 m de profundidad. En ellas se representan 2 perfiles de suelo, uno bajo riego al 100% de la ETc y otro con riego deficitario al 50% de la ETc desde el 22 de junio hasta el 13 de agosto. En enero, al inicio de los ensayos, la CEs se consideró homogénea en todo el perfil e igual al valor determinado en laboratorio. Este valor fue igual a $CEs = 4,5 \text{ dS.m}^{-1}$ y $CEs = 7 \text{ dS.m}^{-1}$ para los tratamientos regados con agua del Trasvase y de la depuradora respectivamente.

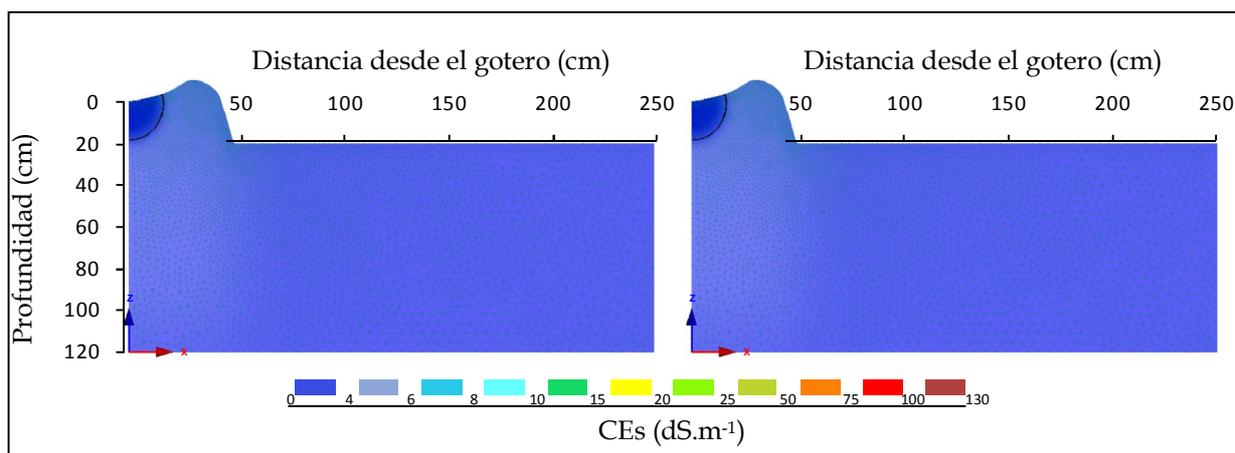
En agosto se puede apreciar, por un lado, el mayor lavado de sales que provocó el riego con agua del trasvase frente al mismo efecto provocado con aguas procedentes de la depuradora. Por otro lado, se nota que el riego deficitario hace reducir el volumen de suelo mojado por debajo del gotero. Como consecuencia, el agotamiento de la zona radicular es mayor y la CEs es más elevada. Las sales se concentran en profundidad provocando valores muy superiores a 75 dS.m^{-1} .

Desde agosto hasta diciembre, la reducción de la demanda climática y la caída de precipitaciones junto con los aportes de riego consiguen empujar

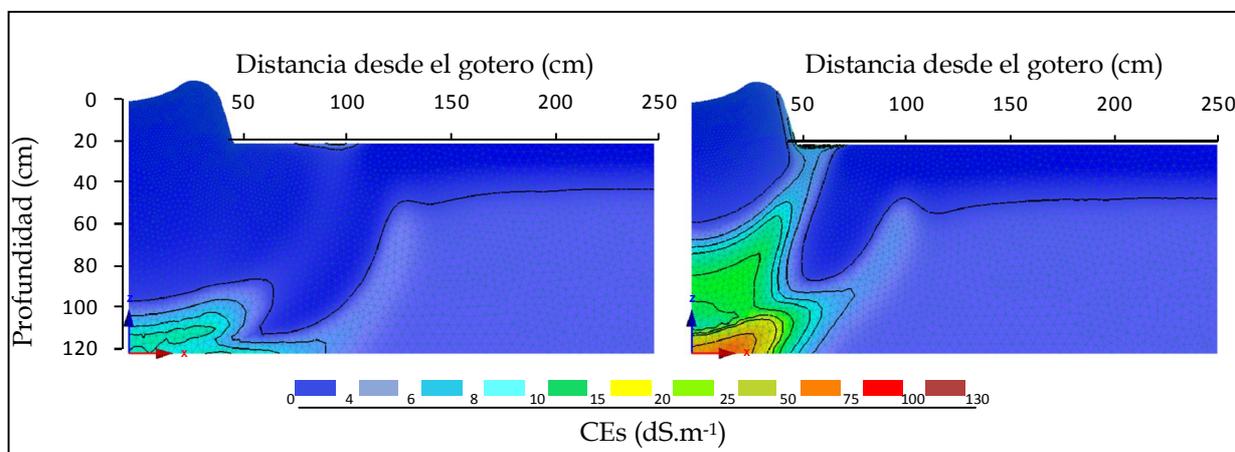
las sales en profundidad para recuperar valores de CEs muy parecidos e incluso inferiores a los valores de partida,

Este comportamiento se debe a que el perfil del suelo en cuestión, está considerado profundo, con drenaje libre en su límite inferior. Por lo tanto, la cantidad de agua aplicada puede infiltrarse con facilidad arrastrando las sales fuera de la zona radicular del cultivo. Sin embargo, en condiciones de suelo compactado, suelo poco profundo o suelo con capas impermeables los valores alcanzados de CEs podrían poner en riesgo no sólo la producción del cultivo, sino su sostenibilidad a corto plazo y la del suelo a corto y largo plazo.

15 Enero: inicio del ensayo



13 Agosto: fin del RDC



15 Diciembre: fin de la estación de riego

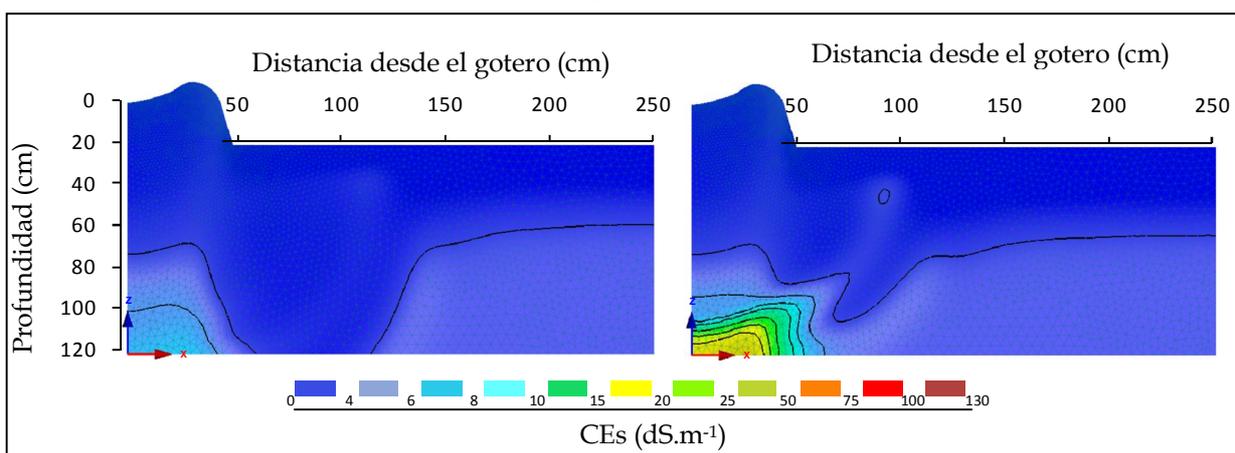
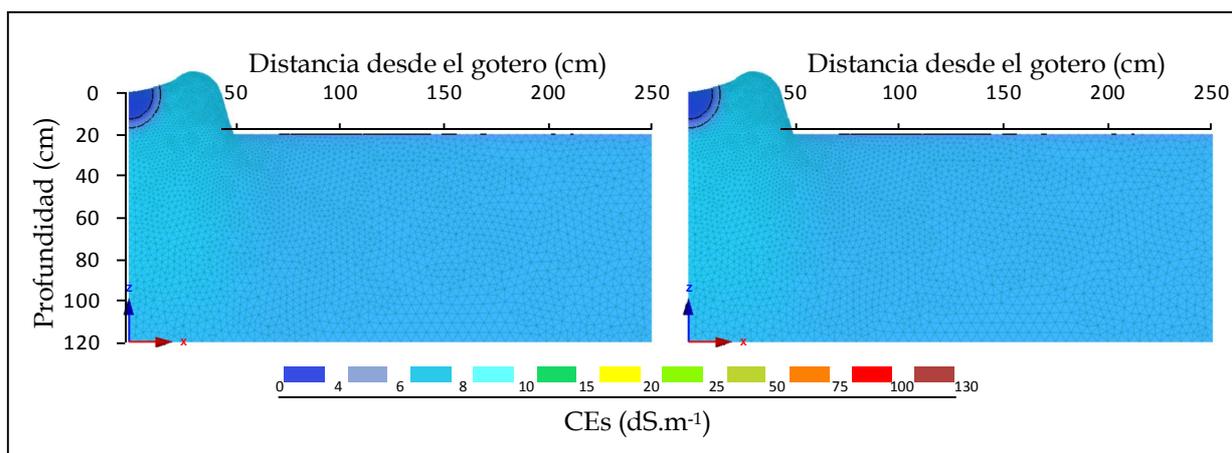
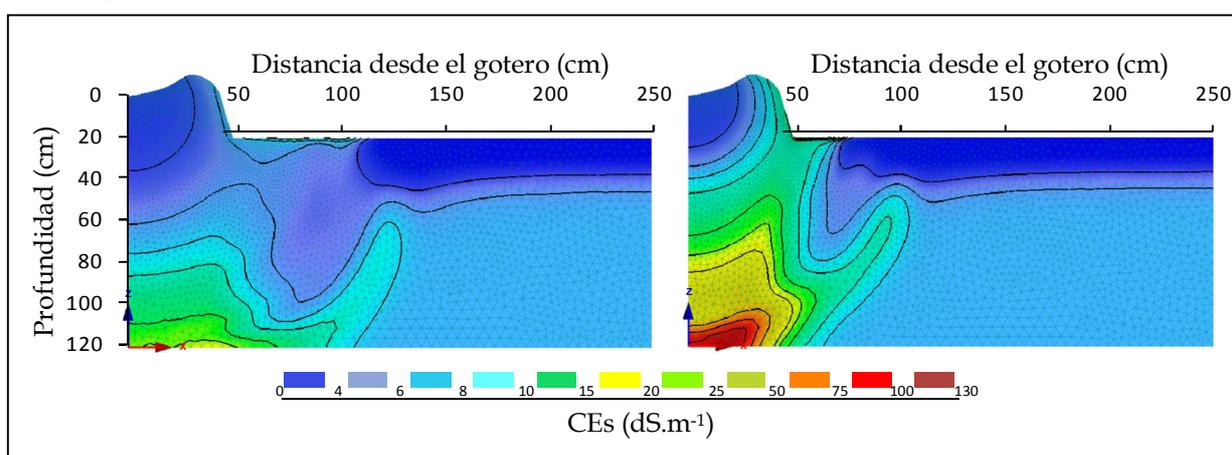


Figura 17: Simulación de la distribución bidimensional de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (CEs) en un perfil de suelo perpendicular a la línea de goteros y regado con agua de buena calidad (Trasvase). Los gráficos a la izquierda y a la derecha corresponden al tratamiento control y RDC respectivamente. Los gráficos representan el estado inicial en enero (arriba), al final de la aplicación del RDC (en medio) y al final de la estación de riego (abajo).

15 Enero: inicio del ensayo



13 Agosto: fin del RDC



15 Diciembre: fin de la estación de riego

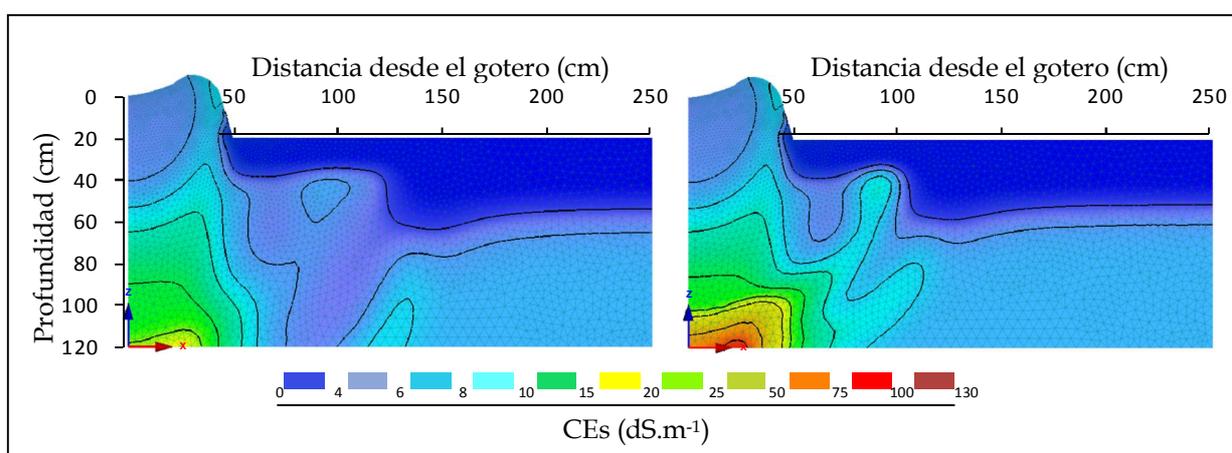


Figura 18: Simulación de la distribución bidimensional de la conductividad eléctrica de la solución del suelo (CEs) en un perfil de suelo perpendicular a la línea de goteros y regado con agua de baja calidad (Depuradora). Los gráficos a la izquierda y a la derecha corresponden al tratamiento control y RDC respectivamente. Los gráficos representan el estado inicial en enero (arriba), al final de la aplicación del RDC (en medio) y al final de la estación de riego (abajo).

6. CONCLUSIONES

La estrategia de riego deficitario supuso un considerable ahorro de agua (17 %). El uso de aguas regeneradas para fines de riego no produjo acumulación de sales en la zona radicular al final del primer año de su aplicación. No obstante, la concentración de sales se incrementó considerablemente durante los meses de alta demanda evapotranspirativa. Este incremento fue más pronunciado en los tratamientos con déficit hídrico y agua regenerada, mostrando un efecto combinado entre la calidad y la cantidad de agua aplicada.

Los resultados del modelo numérico HYDRUS-2D se ajustaron aceptablemente a los valores observados en campo, si bien, un mejor ajuste de los parámetros de entrada mejoraría los resultados. En este sentido, el modelo ha demostrado su capacidad para simular el movimiento de sales en el suelo abriendo un nuevo campo de investigación de las relaciones agua-suelo-planta. La aplicación de este modelo nos permitirá modelizar la zona de extracción de la planta y evaluar la acumulación de sales en el suelo con las estrategias de riego y técnicas de cultivo más relevantes.

7. BIBLIOGRAFIA

Alva A. K., Syvertsen J. P., 1991. Irrigation water salinity affects soil nutrient distribution, root density, and leaf nutrient levels of citrus under drip fertigation. *Journal of Plant Nutrition*, V14, no 7, 715-727p.

Angin I, AV. Yaganoglu, M. Turan, 2005. Effects of long-term wastewater irrigation on soil properties. *Journal of Sustainable Agriculture*, V26, n3, 31-42.

Aragues. R., Millan. M., Quilez D. Y Fernandez M., 1986. Métodos de medida de la salinidad del suelo. I y II. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid-España. 91 pp.

Ayers, R.S. y Westcott, D. W. 1989. Water quality for agriculture. FAO. Irrigation and Drainage. N° 29 Rev. Roma.

CARM, 2007. Consejería de Agricultura de la Región de Murcia.

Chalmers, D., Mitchell, P. and Van Heek, L. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal American Society for Horticultural Science*. 106 (3): 307-312.

Darcy, H. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, París.

Darwish, T, Atallah T., El Moujabber M. and Khatib N., 2005. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon. *Agricultural Water Management*, V: 78, 152-164 pp.

Del Amor García, F., 2000. El riego con aguas salobres en Murcia (Proyectos en marcha durante la última sequía. Situación actual y perspectivas). Publicaciones CEBAS-CSIC-Programa de Asesoramiento en Riegos, Murcia.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1986. Las necesidades de agua de los cultivos. Paper 24. FAO of the United Nations. Roma (Italia), 194 pp

Dry P.R., Loveys B.R., McCarthy M.G., and Stoll M., 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *J. Int. Sci. Vigne*, 35 n° 3, 129-139.

Fares A., Hamdhani H., Polyakou V., Dogan A. and Valenzuela H., 2006. Real-time soil water monitoring for optimum water management. *Journal of the American Water Resources Association*, V42, pp. 1527-1535.

Feddes, R. A., P. J. Kowalik, and H. Zaradny, 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons, New York, NY.

Fereres E. and M.A. Soriano, 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* 58: 147-159 pp.

Fereres, E. y Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. In: *Irrigation of Agricultural Crops*. B.A. Steward and D.R. Nielsen (Eds.), Agronomy no 30. Published by ASA, CSSA y SSA, Madison. Wisconsin. USA. 987-1017.

Gärdenäs, A., J.W. Hopmans, B.R. Hanson, and J. Šimůnek. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agric. Water Manage.* 74:219–242 pp.

Girona J., Mata M., Arbonés A., Alegre A., Rufat J. and Marsal J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils, *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 128, 432–440pp.

Hillel, D., 2000. Salinity management for sustainable irrigation: Integrating science, environment and economics. The World Bank, Washington DC.

Intrigliolo DS, Castel JR (2004) Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrig Sci* 23, pp. 93–102

Irrrometer. 2005. Watermark Soil Moisture Measurement: Installation and Operation Manual.

Klute A., 1986. Methods of Soil Analysis, Part 1, Agronomy Monograph, Series No 9 (2nd Edition). ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.

Kutílek, M. and Nielsen D., 1994. Soil Hydrology. Cremlingen Destedt: Catena Verlag. 370pp.

Mantell A, H. Frenkel and A. Meiri, 1985. Drip irrigation of cotton with saline-sodic water. *Irrig. Sci.* 6, pp. 95–106.

Mounzer, O., Mendoza Hernandez R., Abrisqueta I., Vera J, Ruiz-Sánchez M.C., Tapia L.M., Plana Arnaldos V., and Abrisqueta J.M., 2008. Estimating evapotranspiration by capacitance and neutron probes in a drip-irrigated apricot orchard. *Interciencia*, V 33: pp. 586-590.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), pp. 513-522.

Neuman, S. P., Galerkin approach to saturated-unsaturated flow in porous media, Chapter 10 in *Finite Elements in Fluids, Vol. I, Viscous Flow and Hydrodynamics*, edited by R. H. Gallagher, J. T. Oden, C. Taylor, and O.C. Zienkiewicz, John Wiley & Sons, London, pp. 201-217, 1975.

Ortuño M.F., Garcia-Orellana Y., Conejero W., Ruiz-Sanchez M.C., Alarcon J.J. and Torrecillas A. 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees* 20, pp. 1–8.

Pérez-Sirvent C., M.J. Martínez-Sánchez, J. Vidal and A. Sánchez, 2003. The role of low-quality irrigation water in the desertification of semi-arid zones in Murcia, SE Spain. *Geoderma*, n^o 113. pp. 109-125.

Pinder, G. F., W. G. Gray, 1977. Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press, New York, N.Y.

Rhoades, J.D. y Clark, M., 1978. Sampling procedure and chemical methods in use at the U.S. Salinity Laboratory for characterizing salt-affected soils and waters. Contribution no 640 of the U.S. Salinity Laboratory, USDA, Riverside, California, 24 p.

Richards, L.A., 1931, Capillary conduction of liquids through porous media. Physics, vol. 1: pp. 318-333.

Šimůnek, J., Jarvis, N. J., van Genuchten, M. Th. & Gärdenäs, A. 2003. Nonequilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone: review and case study. Journal of Hydrology, 272, pp. 14-35.

Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media, Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, p. 241

Skaggs TH, Trout TJ, Simunek J, Shouse PJ., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. J Irrig Drain Eng ASCE 130:304–310

Slichter, C.S. 1899. Theoretical investigation of the motion of ground waters. 19th Ann. Rep., Part II, Geological Survey. pp.295-384.

Stott, K., Keeler, J., Van, Q.N. and Shaka, A.J. (1997) J. Magn.Reson., 125, pp. 302–324.

Thompson, Gallardo M. , Valdez L.C. and Fernández M.D., 2007. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. Agricultural Water Management, V92, pp. 13-28.

Torrecillas et al., 1996 A. Torrecillas, J.J. Alarcón, R. Domingo, J. Planes and M.J. Sánchez-Blanco, Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars, Plant Sci. 118, pp. 135–143

van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892-898.

Vrugt, J.A., Hopmans, J.W., Šimůnek, J., 2001. Calibration of a two dimensional root water uptake model. Soil Sci. Soc. Am. J. 65 (4), pp. 1027–1037.

Wang Z., A.C. Chang, L. Wu. And D. Crowley, 2003. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. Geoderma, n^o 114: pp. 261-271.

Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*, 3rd ed., McGraw-Hill, London, United Kingdom, 1977.