

Calibración del Modelo Hydrus-3D para el riego localizado en suelos estratificados con cultivo intensivo (enarenado)

Calibration of Hydrus-3D model for drip irrigation on stratified soil for intensive agriculture (sand covered soil)

Zapata-Sierra, A.J.^{a*}, Roldán-Cañas, J.^b, Reyes-Requena, R.^c, Moreno-Pérez, M.F.^d

^aDepartamento de Ingeniería, Universidad de Almería, Carretera de Sacramento s/n. 04120 Almería, España.
E-mail: ^{a1}ajzapata@ual.es

^bDepartamento de Agronomía, Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, 14071. Córdoba, España.
E-mail: ^{b1}jroldan@uco.es, ^{b2}rafaelreyesr@hotmail.com, ^{b3}mfatima@uco.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 19/02/2020

Aceptado: 31/12/2020

Publicado: 31/01/2021

Citar como: Zapata-Sierra, A.J., Roldán-Cañas, J., Reyes-Requena, R., Moreno-Pérez, M.F. 2021. Calibration of Hydrus-3D model for drip irrigation on stratified soil for intensive agriculture (sand covered soil). *Ingeniería del agua*, 25(1), 1-14. <https://doi.org/10.4995/la.2021.13159>

RESUMEN

El desarrollo del bulbo mojado bajo riego localizado en suelos enarenados presenta un comportamiento diferente del observado bajo suelos homogéneos. La presencia de un cultivo muy activo, también impone una serie de variaciones que no han sido plenamente caracterizadas. El objetivo de este trabajo es presentar la metodología de adquisición de datos y las precauciones necesarias para obtener un modelo que defina con precisión la evolución de la humedad en los bulbos húmedos generados en suelos enarenados característicos de los cultivos hortícolas intensivos. Se ha definido el procedimiento de toma y procesado de datos de humedad en suelos estratificados. Se ha ajustado experimentalmente la curva de retención de humedad del suelo y permeabilidad para cada material. Se ha comprobado que el modelo Hydrus-3D puede reproducir el comportamiento de un suelo enarenado y se ha podido comprobar que las predicciones son adecuadas a lo observado en campo.

Palabras clave | suelos estratificados; bulbo mojado; humedad del suelo; invernadero; riego.

ABSTRACT

The development of the wet bulb under drip irrigation in sand covered soils presents a different behavior from that observed under homogeneous soils. The presence of a very active crop also imposes a series of variations that have not been fully characterized. The aim of this work is to present the data acquisition methodology and the necessary precautions to obtain a model that accurately defines the evolution of moisture in wet bulbs generated in sanded soils characteristic of intensive horticultural crops. The procedure for collecting and processing moisture data in stratified soils has been defined. The soil and permeability curve has been adjusted experimentally for each material. It has been proved that the Hydrus-3D model can reproduce the behavior of a sand covered soils and it has been possible to verify that the predictions are adequate to what has been observed in the field.

Key words | layered soils; wet bulb; soil moisture; greenhouse; watering system.

INTRODUCCIÓN

La utilización de cubiertas de arena para mejorar la humedad y la temperatura del suelo se conocen desde hace tiempo. En los cultivos intensivos del Sureste español se empezó a utilizar desde la mitad del siglo XX, fundamentalmente para evitar el ascenso capilar de las sales que contenía el agua disponible para riego (Pérez et al., 2002). Este hecho unido a la mala calidad de los suelos disponibles y a la presencia de trozos más o menos grandes de caliza en la base de éstos, frecuentemente aflorando en extensas zonas, hizo que el agricultor buscara mejorarlo con el aporte de suelo fértil procedente de otras zonas.

Por otra parte, en la zona hay depósitos lacustres de materiales arcillosos que fueron aprovechados casi de inmediato para este fin. A la capa de suelo más o menos arcilloso y a la capa de arena se añadió una fina capa de materia orgánica (estiércol, compost o turba) para mejorar el ambiente radicular. El arenado, tal y como se ha llegado a estandarizar hoy en día es una técnica que consiste en colocar una capa de suelo de entre 15 y 40 cm encima del material original, una fina capa de materia orgánica y encima de ésta una capa de arena de unos 5 a 10 cm. Un esquema de esta disposición se muestra en la Figura 1.

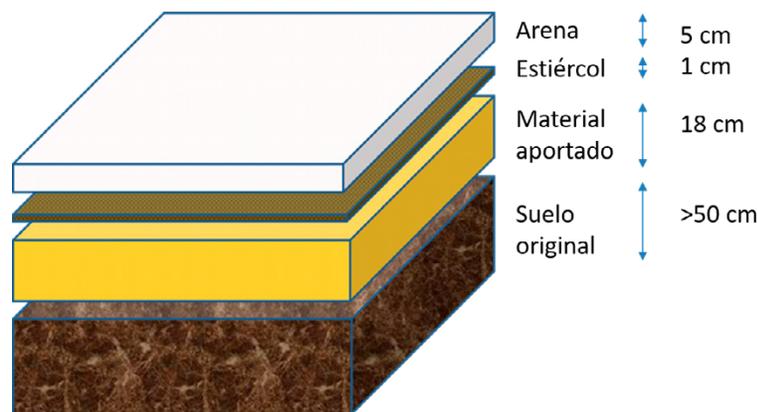


Figura 1 | Esquema de un suelo enarenado.

Para un correcto diseño y manejo de los sistemas de riego localizado se hace necesario conocer la forma del bulbo mojado por los emisores (Arbat et al., 2013). En suelos estratificados, como es el caso de los suelos enarenados, la distribución del agua puede cambiar sustancialmente respecto al caso de suelos homogéneos. Influyen bastante las características de la capa de base y la arena, que no permite ver claramente el área mojada o seca y porque además puede favorecer la circulación del agua por vías privilegiadas. Además, es posible que los bulbos mojados se solapen en un tiempo relativamente corto ya que la práctica habitual es separar los emisores una distancia muy pequeña, típicamente de 20 a 50 cm.

La influencia de la planta tampoco es despreciable, ya que los consumos se deben atender desde un volumen de suelo relativamente pequeño por lo que el secado del perfil puede ser bastante rápido (Fernández et al., 1991). Se han utilizado diferentes técnicas de medida para visualizar la formación del bulbo mojado en este tipo de suelos, desde medidas directas en cortes del perfil hasta el seguimiento de diferentes parámetros de suelo como la tensión del agua en el suelo o el contenido de humedad.

El Servicio de Asesoramiento al Regante de la Junta de Andalucía (SAR) ha realizado varios estudios relacionados con el movimiento del agua en suelos enarenados (Zapata et al., 2015 y 2018). Se ha podido observar que la modelización del movimiento del agua en estos suelos es más compleja como consecuencia de la estratificación. Se exploraron diferentes modelos sencillos para simular la evolución del bulbo mojado (Karmeli et al., 1985; Schwartzman y Zur, 1986; Chu, 1994 y Amin y Ekhmaj, 2006) aunque los resultados no fueron todo lo satisfactorios que cabía esperar. Más recientemente se ha presentado el modelo Hydrus-3D (Šimunek, et al., 2012), basado en la resolución numérica de la ecuación de Richards y que permite la configuración de un sistema con diferentes capas, como las que conforman un sistema enarenado, por lo que resulta muy adecuado para el problema que se pretende estudiar.

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología de adquisición de datos y las actuaciones realizadas para así calibrar adecuadamente el Modelo Hydrus-3D en suelos estratificados “enarenados” utilizados en cultivos hortícolas intensivos de invernaderos bajo las condiciones habituales de riego en esta zona.

MATERIAL Y MÉTODOS

Planteamiento general de los ensayos

Los ensayos se realizan en las instalaciones del Centro IFAPA La Mojenera. La situación de dichas instalaciones se muestra en la Figura 2. Se ha realizado el seguimiento de la formación y evolución del bulbo mojado en dos tipos de suelo enarenado, situados en dos invernaderos diferentes. Las texturas de los suelos aportados son arcillosas, con diferente proporción de materiales gruesos ($D > 2$ mm). Ambos son representativos del cultivo hortícola de Almería. Se ha denominado B7 al suelo aportado con muy pocos elementos gruesos obtenido por decantación de arcillas a partir de materiales procedentes de cantera, y B8 a un material arcilloso procedente directamente de cantera y que contenía una fracción considerable de materiales gruesos. La capa de suelo original era de textura franco arenosa o franco-arcillosa en función de la profundidad y es una grava aluvial de gran permeabilidad, lo que permite el lavado de sales, pero obliga a un control más fino del agua de riego para que no se pierda excesivamente en forma de drenaje. El control se realizará a dos profundidades; justo bajo la capa de arena (5 cm) y en el fondo del perfil de cultivo (15 cm). La capa de materia orgánica consistió en un estiércol bastante maduro de 5 mm de espesor medio en el momento de su implantación. En estas instalaciones se dispone de una estación meteorológica que registra datos de evapotranspiración del interior de invernadero tipo Almería cada hora para hacer el seguimiento de las extracciones de agua del cultivo.

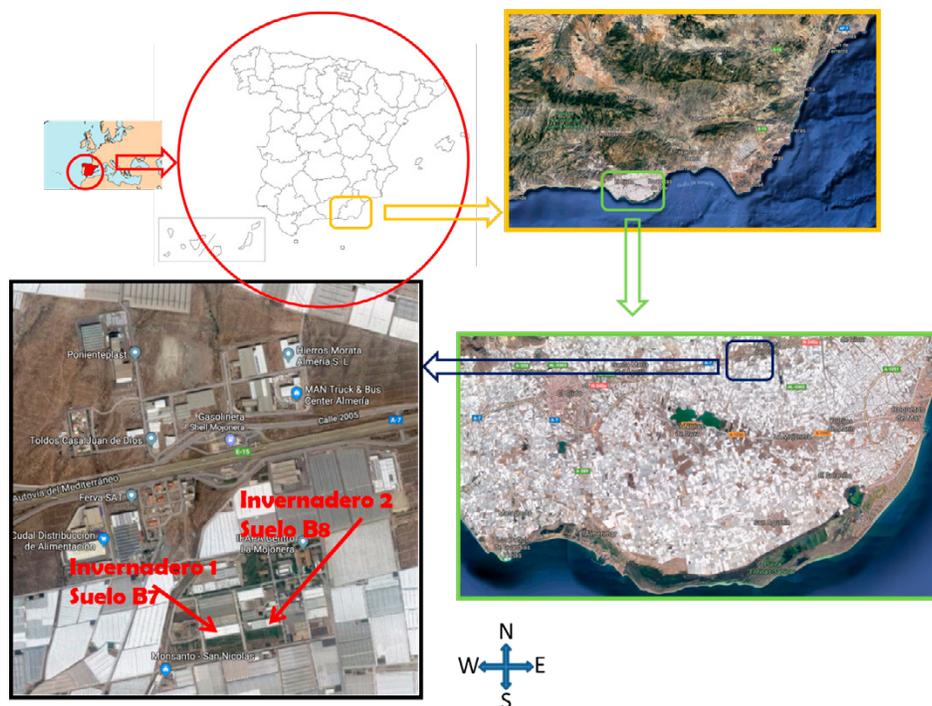


Figura 2 | Situación de los ensayos.

El cultivo fue pimiento variedad Mazo, plantado el día 15 de septiembre en los dos invernaderos seleccionados. El riego es automático, con goteros de caudal nominal $Q_n = 3$ L/h, Autocompensantes, Antidrenaje PJC de Netafim. El control del riego

se realiza mediante tensiómetros clásicos con transductor de presión incorporado, que indica a un ordenador que se ha alcanzado la tensión de consigna y éste ordena al automático de riego que efectúa el mismo mediante la apertura y cierre automáticos de electroválvulas. Para este ensayo la tensión de consigna fue de $\psi=10$ cbar y el tiempo de riego programado es de 20 minutos, lo que significa que el volumen aportado siempre fue de 1 litro por emisor y riego. En estas condiciones cabe esperar variaciones mínimas de la humedad y esto permitirá poner a prueba la sensibilidad de las sondas y del modelo. El riego se inicia desde el mismo día del trasplante, como es habitual en la zona.

Se ha medido la humedad, en 10 puntos distribuidos alrededor de un gotero, 7 sondas a 5 cm de profundidad en la capa de suelo aportado y 3 sondas a 15 cm de profundidad, cerca de la capa de suelo original. La distribución de los puntos de medida se decidió suponiendo que el suelo era muy homogéneo, al tratarse de suelo aportado, para cubrir la zona de mayor interés previsible. El sensor utilizado es el denominado TE5 de *Decagon Devices Inc.* (Pullman Washinton, USA). La señal de cada sensor se recoge mediante un protocolo de comunicaciones que permite la recogida secuencial de un número muy elevado de señales (más de 20 diferentes), se le da escala mediante un procesador y se almacena en una pequeña memoria interna. Cuando el sistema detecta que tiene cobertura, se envía a la red donde se almacena en la web del fabricante y desde allí puede ser descargada en los ordenadores del equipo investigador. La frecuencia de muestreo se ha fijado en un dato cada minuto.

Instalación de los equipos

El marco de plantación coincide con el de los goteros, siendo la separación entre goteros, $S_g=50$ cm y la separación entre ramales de riego, $S_r=120$ cm, por esta razón las sondas se colocaron hasta la mitad del marco de plantación. Las coordenadas de cada sonda se tomaron respecto del gotero y se anotó la referencia de fábrica de cada sonda para comprobar en todo momento la coherencia de las series de datos. En esta primera fase se ha considerado que el suelo es homogéneo en cada capa y por lo tanto se controlará un cuadrante del marco de goteo

El 16 de octubre de 2018 se procedió a la instalación de los sensores en el primer punto de ensayo, con suelo aportado B7. Días más tarde, el 26 de octubre de 2018 se instaló el segundo equipo en un suelo aportado B8 y la disposición de las sondas fue idéntica en cada ensayo y se muestra en la Figura 3, aunque la numeración de cada sonda cambiaba debido a la configuración del equipo. Por otra parte, las posiciones exactas de cada sonda se presentan en la Tabla 1.

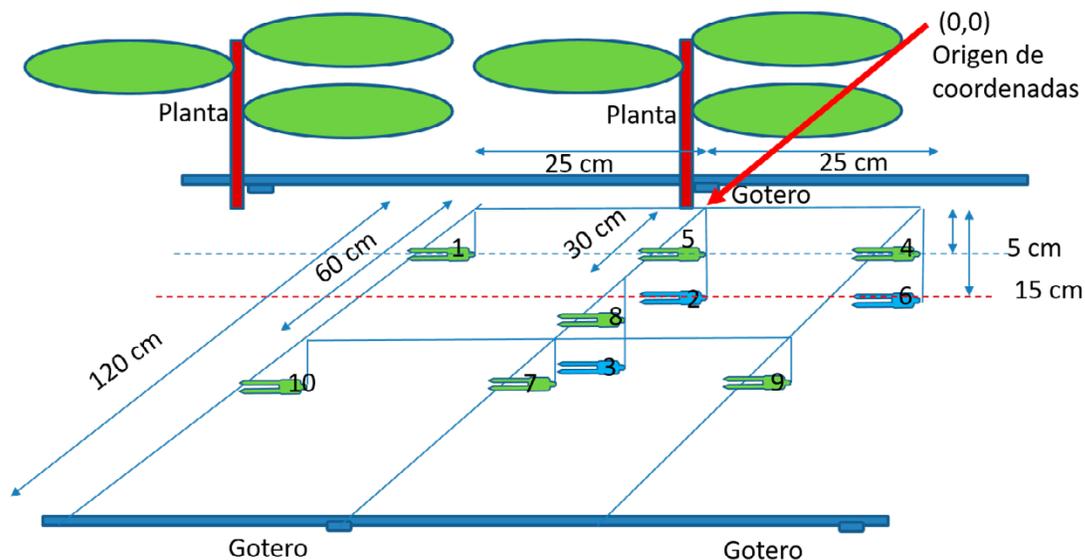


Figura 3 | Disposición y numeración de las sondas en el ensayo 2 ($z=5$ cm., $z=15$ cm.).

Esta distribución se consideró adecuada para tener más información de los puntos, a priori más interesantes, con posibilidad de cambiar la misma si los resultados lo hiciesen aconsejable más adelante.

Tabla 1 | Posición de las sondas del equipo 2.

Sonda	X (cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	-25	0	5
2	0	0	15
3	0	30	15
4	25	0	5
5	-0	0	5
6	25	0	15
7	0	60	5
8	0	30	5
9	25	60	5
10	-25	60	5

Caracterización de los parámetros necesarios para la calibración del modelo Hydrus-3D

El modelo Hydrus-3D, con el que se han tratado los datos, es exigente en parámetros. Para un buen resultado, es preciso caracterizar la textura, la distribución de raíces, la curva de retención, así como la permeabilidad de cada material propuesto.

La textura se ha determinado mediante tamizado a 0.5 y 2 mm del material secado en condiciones de laboratorio para separar las fracciones de grava y arena gruesa. La fracción fina se ha analizado mediante la técnica del densímetro de Bouyoucos (1936).

La curva de retención de humedad de los suelos es una herramienta de interés para su manejo agronómico y es importante en la caracterización del movimiento de agua y sales en los suelos. Se conocen expresiones para estimar las curvas de retención y conductividad hidráulica en función de la humedad (Brooks y Corey, 1964; Van Genuchten, 1980) aunque en nuestro caso los mejores ajustes se obtenían con las propuestas por Brooks y Corey, en función de la humedad θ_i , humedad residual θ_r , porosidad θ_s , potencial de entrada del aire ψ_b , e índice de distribución de poros λ . La curva de retención utilizada ha sido la que se muestra como Ecuación (1):

$$\frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (1)$$

en donde los diferentes coeficientes pueden ser obtenidos de datos de textura o de las curvas medidas directamente a partir de muestras del suelo. En este caso se ha decidido la determinación directa de la curva y el posterior ajuste de los parámetros mediante un esquema de optimización basado en hacer mínima la suma de errores al cuadrado. Se ha utilizado el método de resolución GRG Nonlinear. Esta herramienta es accesible en la hoja de cálculo Excel y, dado que a veces puede no alcanzar el óptimo, se ha procedido a optimizar los parámetros de dos en dos, sin restricciones, para luego, una vez alcanzada una solución aceptable, optimizar el problema completo con todos los parámetros a la vez. Este procedimiento limita la aparición de soluciones óptimas, pero sin sentido hidrológico. (como por ejemplo porosidades cercanas a 1, o valores negativos).

Se tomaron muestras del suelo de los mismos invernaderos donde se realizan los ensayos. Se tomaron cilindros de 11 cm de diámetro de la arena del arenado, suelo aportado y base de suelo original de manera que se dispusiera de una o varias muestras de todo el perfil, tratando de mantener la muestra inalterada. Cada muestra contenía aproximadamente 1 litro de suelo.

Se midió el volumen aparente de cada muestra y el peso y la tensión en días consecutivos. Al concluir la serie de medidas se secó la muestra para obtener el peso seco. La tensión se midió con tensiómetros de bloque de yeso Watermark de Irrometer y el registro se hace con el dispositivo que ofrece el fabricante.

Se han dispuesto las muestras y los sensores con fecha 11 de diciembre de 2018 y se han registrado datos hasta el 18 de febrero de 2019. El dispositivo se montó en un laboratorio a temperatura ambiente y las medidas se tomaron todas a las 8:30 de la mañana. Las unidades de medida de la humedad fueron las que ofrecía el dispositivo (%) y las medidas de tensión del mismo modo lo fueron en cbar (kPa).

La conductividad hidráulica en saturación k_s , se ha determinado mediante un permeámetro vertical de carga constante en condiciones de saturación, cuyo esquema se muestra en la Figura 4. La muestra se tomaba mediante un cilindro afilado hacia el interior y en este mismo dispositivo se procedió a medir la permeabilidad.

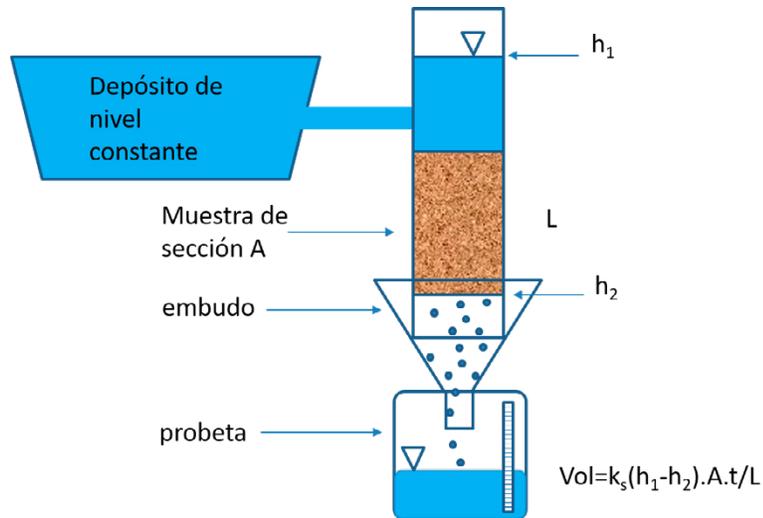


Figura 4 | Esquema del permeámetro vertical de carga constante.

La distribución de raíces se ha determinado mediante muestreo con testigos en diferentes puntos alrededor de la planta. Cada muestra se subdividió en submuestras de 5 cm de profundidad y se contó la longitud de raíces mediante la técnica de Newman (1966). Estos datos se utilizaron para ajustar el modelo de Vrugt et al. (2001a y 2001b), que es el modelo que utiliza Hydrus-3D para caracterizar la extracción de agua por parte de las raíces.

Recogida y manejo de los datos

Después de varios días de prueba, el 23 de octubre comienza la transmisión de datos. Los datos se reciben a través de una aplicación denominada zGreen, proporcionada por el fabricante que permite el acceso a través de un navegador cualquiera en Internet.

La aplicación permite descargar los datos (*Download*) y revisarlos (*Browse*), mediante los correspondientes botones en la esquina inferior izquierda. Los datos pueden ser descargados en formato de texto separado por comas (csv) lo que facilita su adquisición por los programas de cálculo más utilizados.

En un principio se colocaron las sondas más superficiales, a 2 cm de profundidad por debajo de la arena, pero después de unos días midiendo se observaron valores anormalmente bajos en las sondas cercanas a la superficie. Analizado el problema, se comprobó que el sensor tiene una superficie de influencia cilíndrica de 5.5 cm de diámetro, en consecuencia, parte de la lectura se estaba realizando en la capa de arena, que contiene muy poca humedad. Se procedió a reinstalar las sondas a una profundidad de 5 cm para que la lectura se realizase íntegramente en la capa de suelo aportado. Esta operación se realizó con fecha 30 de noviembre de 2018. Los análisis que se presentan en este trabajo se refieren a esta última configuración. Las sondas colocadas en profundidad no sufrieron modificación alguna.

Como se ha comentado anteriormente, se tomaron datos cada minuto desde el inicio del ensayo, octubre de 2018 hasta el final del período de cultivo, 12 de julio de 2019 coincidiendo con el calendario habitual en la zona.

Para la evaluación de la bondad de los ajustes obtenidos se utilizó el denominado índice de ajuste (Willmott, 1981), que, como medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo, varía entre 0 y 1. El índice de ajuste representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial. El valor de ajuste de 1 indica una coincidencia perfecta, y 0 indica que no hay ningún tipo de ajuste. El índice de ajuste puede detectar diferencias aditivas y proporcionales en las medias y variaciones observadas y simuladas; sin embargo, es excesivamente sensible a los valores extremos debido a las diferencias al cuadrado.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\left| p_i - \bar{o} \right| + \left| o_i - \bar{o} \right| \right)^2} \quad (2)$$

donde o_i es el valor observado y p_i el valor simulado y \bar{o} el valor medio de los valores medidos y \bar{p} el valor medio de los valores simulados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos recogidos muestran una escasa variación de la humedad a lo largo del tiempo que se altera solamente coincidiendo con el riego. Se interpreta este comportamiento como una rápida redistribución de la humedad por parte de la capa orgánica y el suelo aportado con lo que las sondas registran variaciones muy pequeñas. Esta circunstancia presenta un escenario de máxima exigencia para las sondas y para el equipo utilizados.

El gran volumen de información recogida no permite percibir claramente el comportamiento general de este sistema. Por este motivo se ha calculado la humedad media mensual para cada sonda, entre los meses de noviembre y marzo se presentan en las tablas 2 y 3. Se indica la posición exacta de cada sonda y el número con el que se registró en cada equipo. Previamente se han eliminado algunos datos anormales producidos por el fallo en la lectura de las sondas 4 y 8 en el suelo B7 y la sonda 10 en el suelo B8.

Tabla 2 | Humedad del suelo media mensual para cada sonda. Suelo B7.

mes	Humedad volumétrica (%)									
	S1	S5	S2	S4	S6	S8	S3	S10	S7	S9
	(25,0,5)	(0,0,5)	(0,0,15)	(-25,0,5)	(-25,0,15)	(0,30,5)	(0,30,15)	(25,60,5)	(0,60,5)	(-25,60,5)
11	14.67	25.25	16.89	6.16	25.80	18.57	21.35	24.46	11.12	13.05
12	15.97	28.24	21.58	5.58	26.03	21.97	23.22	28.28	11.58	11.20
1	16.03	24.50	20.78	5.83	23.72	17.96	22.60	26.17	15.10	12.73
2	16.23	17.91	19.24		19.56		21.99	22.19	22.22	19.44
3	16.42	19.07	19.25		18.52		21.36	21.74	21.94	19.79
4		15.44	15.92				15.87	15.79	15.96	14.82
5		21.14	19.42				21.07	20.95	20.99	20.27

Tabla 3 | Humedad del suelo media mensual para cada sonda. Suelo B8.

mes	Humedad volumétrica (%)									
	S2	S4	S8	S7	S1	S3	S9	S5	S10	S6
	(25,0,5)	(25,0,15)	(0,0,5)	(0,0,15)	(-25,0,5)	(0,30,5)	(0,30,15)	(25,60,5)	(0,60,5)	(-25,60,5)
11	3.51	2.98	5.75	7.02	13.15	4.55	5.09	4.40	12.18	3.56
12	8.74	7.78	14.28	15.88	14.80	10.65	10.88	7.83	15.31	8.48
1	8.47	19.94	12.97	11.88	15.44	9.74	17.02	5.99	6.14	8.29
2	3.02	7.51	4.65	3.70	5.36	2.99	4.37	2.24		2.96
3	7.86	18.43	12.50	8.82	12.62	5.86	16.67	6.22		7.06
4	8.41	18.26	15.64	8.74	11.91	5.30	16.94	7.46		6.89
5	9.34	17.81	17.35	8.18	12.52	6.67	17.48	9.69		7.35

Como se aprecia, las variaciones son bastante estrechas, a pesar de lo cual, el sistema de control del riego es capaz de mantener la humedad del suelo bastante estable.

Como primer análisis de la situación se ha estudiado la distribución media mensual de la humedad. En la Figura 5 se observa que en los meses fríos se forma un bulbo mojado, pero a partir de febrero va desapareciendo y a partir de mayo es imperceptible en el suelo B7 y no muestra nunca un patrón reconocible en el suelo B8. Este efecto puede deberse al trabajo de las raíces, dada la mayor demanda atmosférica, junto a la capacidad de redistribución de la humedad del suelo arcilloso aportado.

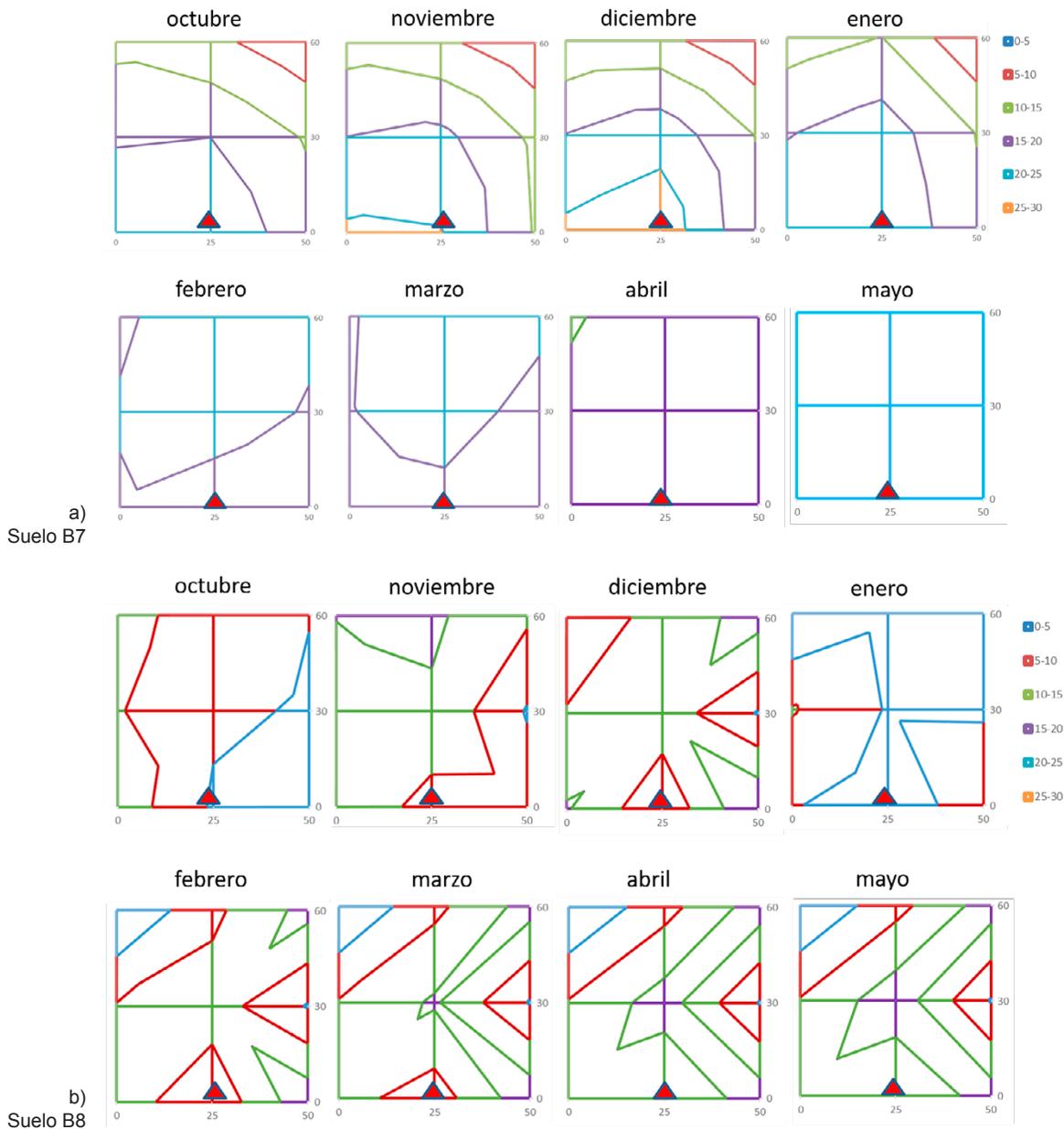


Figura 5 | Humedad media mensual (%) a 5 cm de profundidad en la zona muestreada. El gotero y la planta se encuentran en $x=25$, $y=0$, se indican mediante triángulo rojo ▲. a) Suelo B7, b) suelo B8.

El eje de abscisas de la Figura 5 sigue la línea de la tubería de goteo y su origen se ha colocado justo en la posición de un emisor. Se ha representado hasta la mitad de la distancia entre emisores. Por su parte el eje de ordenadas tiene su origen en la tubería

de goteo y se extiende perpendicularmente a la misma. En la Figura 5 se ha representado hasta el punto medio de la distancia entre líneas de cultivo.

A la vista de estas figuras, parece haber diferencias entre los diferentes sustratos. El suelo B8 contiene más grava y eso parece determinar una distribución más irregular de la humedad. En la práctica cabe esperar que no aparezcan diferencias entre las medidas de las sondas. Si a esto añadimos las diferencias en la calibración de la propia sonda, las figuras no deberían de mostrar diferencias claras, tal y como ocurre en la práctica. El suelo B7, aunque también arcilloso, es mucho más homogéneo y permite que se formen algunos patrones de distribución.

La textura arcillosa de ambos suelos, junto con el efecto de la capa orgánica hacen que la humedad se extienda rápidamente por las capas del suelo y después de un riego la humedad alcanza un valor casi constante.

Hay momentos del año en los que aparece una distribución previsible, en la que la zona más humedecida está alrededor del gotero, pero hay otros momentos, coincidiendo con el desarrollo completo de la planta, en los que aparece una zona de secado alrededor de la planta o no aparece una distribución reconocible. Esta circunstancia arroja luz sobre la importancia de la extracción de la planta en los sistemas de cultivo enarenado intensivo.

Textura de los suelos aportados

Se tomó un testigo vertical en cada suelo y se subdividió cada muestra respetando los cambios de material y en todo caso de un espesor máximo de 5 cm. Se secó cada muestra en laboratorio y se analizó cada submuestra por separado. Mediante tamizado a 2 mm y a 0.5 mm se han separado la grava y la arena gruesa, el resto, fracción fina, se analizó mediante la técnica del densímetro de Bouyoucos para obtener las diferentes clases texturales (arcilla, limo y arena). La variación de cada fracción obtenida en función de la profundidad se muestra en la Figura 6.

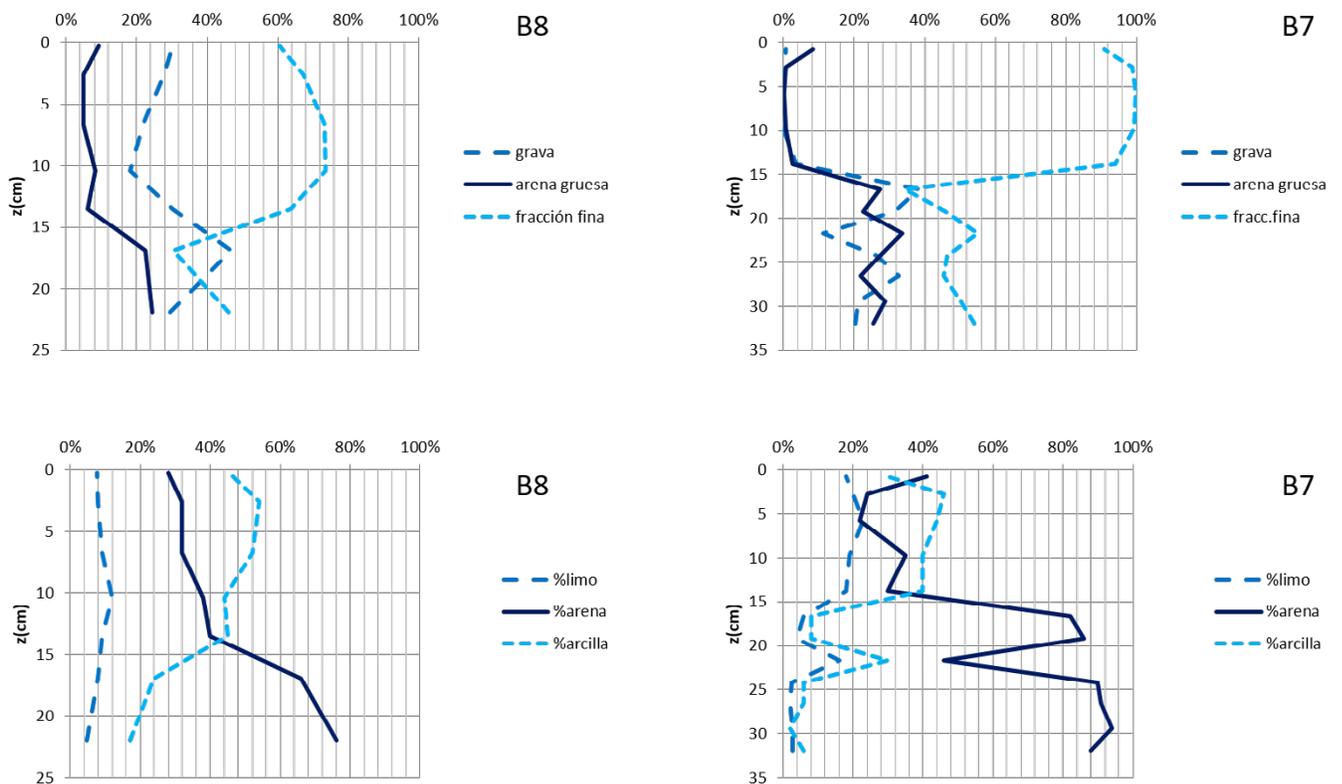


Figura 6 | Granulometría y textura de los suelos empleados en los ensayos

Desde el punto de vista de la textura ambos suelos son arcillosos en su parte aportada y franco arenosos en su parte basal. Esta circunstancia puede dar lugar a errores de cálculo ya que la figura muestra que ambos son diferentes en la distribución de los elementos más gruesos. Por esta razón se hace más necesaria, si cabe, la medida de la curva de retención de humedad del suelo.

Curva de retención de humedad de los suelos del invernadero

Una vez medidos los valores especificados en la metodología, se han calibrado las curvas teóricas. Para ello se ha procedido al ajuste por mínimos cuadrados de la Ecuación (1), utilizando la rutina Solver de Excel para hallar los mejores valores de los parámetros θ_s , θ_r , ψ_b y λ . En la Tabla 4 se ofrecen dichos valores, así como la densidad aparente δ_a y el Índice de ajuste, la según la ecuación 2, del mejor de los ajustes conseguidos. Los datos de humedad se calcularon como valor volumétrico considerando la densidad aparente medida y el volumen aparente de la muestra. En la Figura 7 se muestra la nube de puntos de los datos medidos de humedad (% en volumen) y la curva de mejor ajuste para cada material.

Tabla 4 | Parámetros de la curva de Brooks y Corey obtenidos mediante el procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados.

muestra	Base	B7	B8	Materia Orgánica	Arena de cubierta
θ_s (%)	10,002	25,860	23,892	32,025	8,549
θ_r (%)	0,000	0,000	0,000	9,000	0,003
ψ_b (cbar)	3,388	9,000	4,039	4,160	1,707
λ	0,376	0,156	0,231	0,250	0,326
δ_a (g/cm ³)	1,49	1,74	1,79	1,05	1,75
la(fracción)	0,9723	0,9975	0,9984	0,9865	0,8428

La muestra del suelo B7 se subdividió en dos submuestras correspondientes a partes consecutivas en profundidad del testigo tomado del perfil. Se observó que ambas curvas fueron prácticamente iguales, por lo que se muestran juntas. los suelos B7 y B8, muestran curvas de similar forma, aunque con cierta diferencia en la humedad que contienen para la misma tensión lo que es coherente con suelos de similar textura fina pero diferente cantidad de grava. También las bases muestran el mismo comportamiento lo que se justifica porque todas son arenas más o menos gruesas. Estos resultados son coherentes con las estimaciones realizadas en base a la textura de cada muestra.

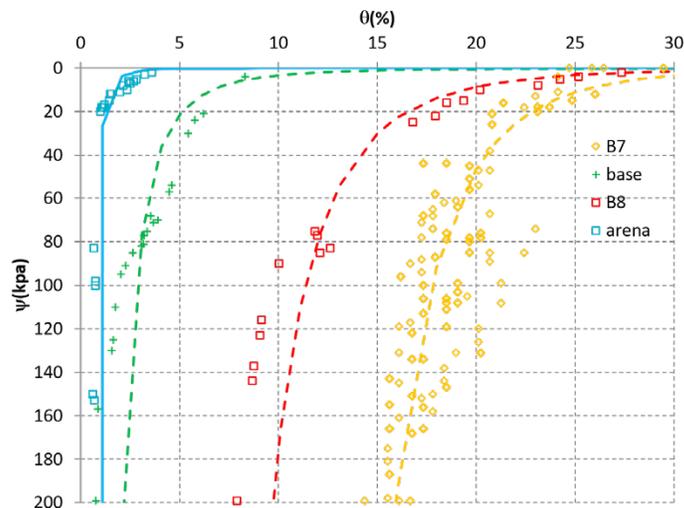


Figura 7 | Nube de puntos y curva de retención de humedad del mejor ajuste para los suelos ensayados.

La permeabilidad medida fue de $k_s=2.9 \times 10^{-6}$ cm/s para el suelo B7 y $k_s=6 \times 10^{-5}$ cm/s para el suelo B8.

A la vista de estas curvas se puede relacionar las humedades expuestas en las tablas 2 y 3 con las tensiones que estarán presentes en el suelo.

Estimación del movimiento del agua mediante el programa Hydrus-3D

Con los datos y curvas medidas, se ha proporcionado la información que el modelo Hydrus-3D necesita. Esta operación se ha concretado en la definición de un modelo 3D, simple con varias capas. La capa más superficial, de 5 cm de espesor será de arena gruesa con las propiedades medidas para este material. La capa de materia orgánica es de 0.5 cm, en consonancia con lo observado en la parcela experimental. La capa de material aportado es de 15 cm, que es el espesor medio observado en las parcelas experimentales. Se ha preparado también una capa de gran espesor (80 cm) con las características del material original.

Se ha observado que las condiciones iniciales del suelo solo pueden ser fijadas como un valor constante para cada profundidad. Dado que las condiciones iniciales del suelo deberían ser variables en las 3 dimensiones del espacio, para reproducir esta situación se han elegido dos días consecutivos de febrero, del que se conoce la evaporación horaria y cuyo episodio de riego se produjo el segundo día. De este modo se consigue llegar al inicio del segundo día con unas condiciones de tensión variables alrededor del emisor y la planta. Los riegos programados para el cultivo, una vez que se alcanza la tensión de 10 cbar, son siempre de duración 20 minutos. En el proceso de riego localizado, se forma una pequeña zona saturada debajo del gotero desde la cual se produce la infiltración. Por esta razón, así como por la constatación de que el modelo es inestable cuando la aplicación se hace desde una superficie muy pequeña, se colocó una fuente variable de flujo 5.7 mm/min, correspondiente a la cuarta parte del caudal del emisor en una superficie de 84 cm² ya que una superficie menor provocaba inestabilidades en el modelo y no llegaba a completar la simulación. Se simula así la cuarta parte del suelo, ya que el modelo coloca por defecto la raíz en las coordenadas (0,0) del bloque simulado. Para las superficies laterales y el fondo del prisma se consideró que la condición más apropiada era la de no flujo, cuya característica principal es que el agua no atravesaría dicha superficie. Dadas las condiciones del ensayo y teniendo en cuenta que tanto el emisor como la planta se sitúan en la esquina superior izquierda, se consideró la condición más apropiada. La superficie superior se consideraba bajo condiciones atmosféricas. Para realizar el ajuste del modelo, se propusieron diferentes valores de tensión inicial, uniforme en todo el perfil, con el requisito de que, en el momento de riego, en la posición del tensiómetro se debía alcanzar la tensión prevista de 10 cbar. La hora registrada del riego en el día elegido, 10 de febrero de 2018, fue las 15:00 horas y la simulación se inició a las 00:00 horas del día anterior. Por tanto, el riego comienza en el tiempo $t=2340$ minutos.

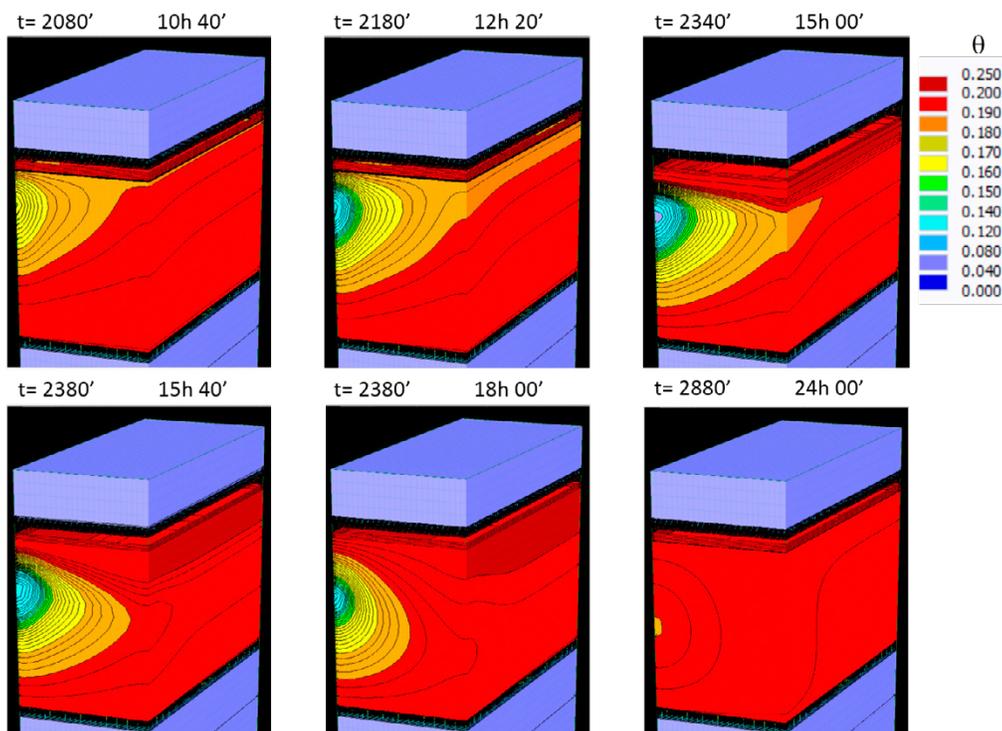


Figura 8 | Evolución de la humedad (fracción) simulada para un día de cultivo y operación de riego de 20 minutos. Se muestra la variación a lo largo del segundo día completo. Suelo B7.

A modo de ejemplo, en la Figura 8 se han seleccionado momentos críticos del día. Como se ha comentado, se inicia la simulación el día anterior para que el día que se desea simular encuentre las condiciones de presión correctamente distribuida en las 3 dimensiones. Se inicia a media mañana, en el minuto 2080 de la simulación. Puede observarse que todavía perdura el efecto de la extracción de agua por el cultivo en el día anterior. Al medio día, coincidiendo con una evapotranspiración fuerte del cultivo, que se produce en el minuto 2180 de la simulación, puede observarse que ya se ha alcanzado una extracción notable por parte del cultivo, que alcanza su mayor extensión en el minuto 2340, cuando se inicia el riego, que en este caso se produce a las 15 horas. A partir de ahí se rellenan las zonas con déficit de humedad a partir del agua aportada y de la redistribución desde otros puntos del perfil. Se aprecia que al final del día se ha alcanzado una situación muy parecida a la del principio.

A la vista de estos resultados, se puede deducir que la posición del tensiómetro, si bien es adecuada para espaciar los riegos, no se encuentra en la parte del suelo que varía más su humedad y, por tanto, debería colocarse más superficial y algo más cerca de la planta y de los emisores.

La oscilación térmica y la evaporación, dentro de un invernadero, se mantienen muy similares para diferentes días del mes de febrero. Para este ejemplo se escogió un día cualquiera en el que se aplicó un riego.

En la Figura 9 se muestra la evolución de la humedad en varias sondas mostradas como ejemplo.

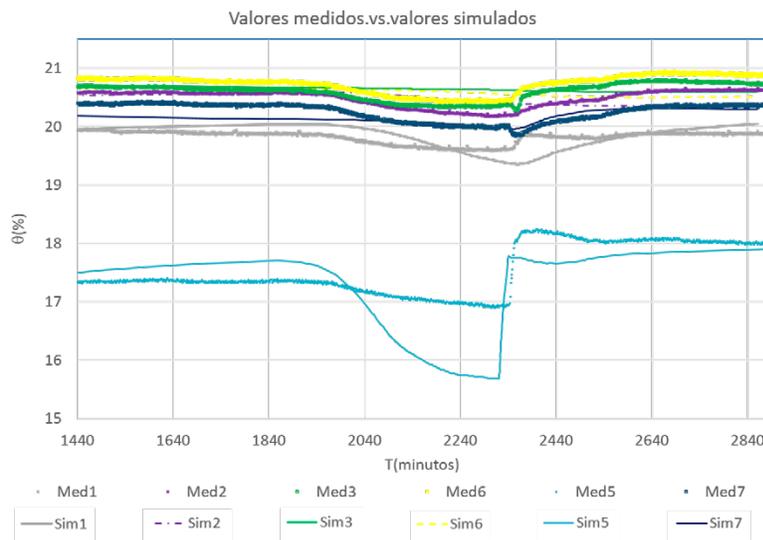


Figura 9 | Evolución de la humedad medida y simulada para el día 10 de febrero de 2018. Sondas numeradas según la distribución de la Figura 3. Suelo B7.

En general el modelo predice bien el comportamiento de la humedad en las condiciones planteadas. Por otra parte, el modelo predice variaciones de la humedad más suaves de las que luego se registran en campo. Este comportamiento puede deberse a que las raíces incrementan la heterogeneidad del suelo y se amplifican un tanto las variaciones de humedad.

La pendiente de la recta valor simulado vs. valor medido y el índice de ajuste para cada punto de observación ensayado, se muestran en la Tabla 5 y sugieren una representación adecuada del movimiento del agua en este tipo de suelos.

Tabla 5 | Pendiente m de la recta valor simulado vs. valor medido que pasa por el origen y coeficiente de ajuste I_a , para una serie de sondas

	Sonda 5	Sonda 2	Sonda 1	Sonda 6	Sonda 3	Sonda 7
$m(0,0)$	0.98980	0.99920	1.00190	0.99280	1.00190	0.99580
I_a	0.99977	0.99889	0.99998	0.99997	0.99998	0.99999

Para el ajuste del modelo se ha utilizado fundamentalmente la condición de que debía predecirse el momento en que se alcanzaba la tensión consigna en el lugar en donde se colocaba el tensiómetro, que para este ensayo se situó a 13 cm del gotero

y a 13 cm de distancia perpendicular a la línea de goteo. La profundidad de la cápsula iba de 10 a 15 cm medida por debajo de la superficie del suelo aportado. En la Figura 10 se presenta la evolución de la tensión (cbar) para las mismas horas descritas para la Figura 8 y para 12 cm de profundidad bajo la superficie del suelo aportado.

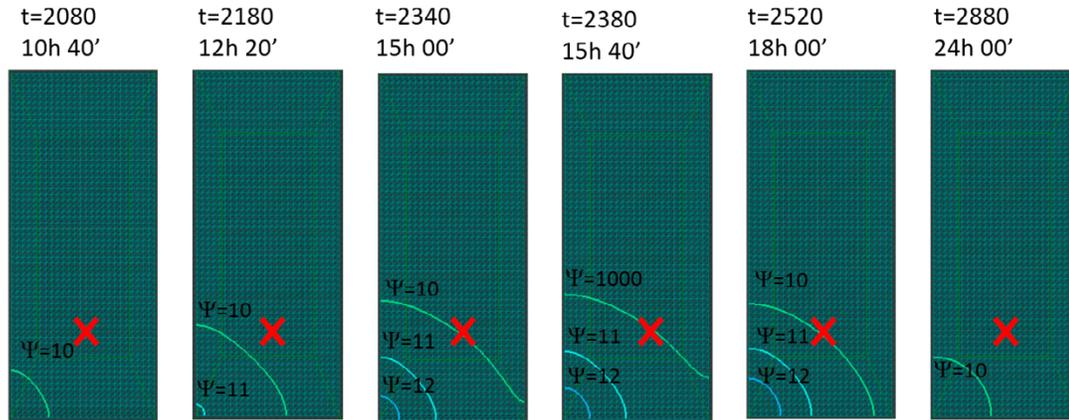


Figura 10 | Evolución de la tensión (cbar) para el día 10 de febrero de 2018. Se muestra la posición del tensiómetro con **X**. Suelo B7, 12 cm de profundidad en la capa de suelo aportado.

Se puede observar que la línea de tensión 10 cbar pasa por la posición del tensiómetro aproximadamente a la hora en que se inició el riego. Se mantienen las condiciones de tensión algunos minutos y hacia la medianoche ya se han recuperado las condiciones iniciales.

CONCLUSIONES

Se ha definido un procedimiento de toma y procesado de datos de humedad en suelos estratificados.

Se ha ajustado experimentalmente la curva de retención de humedad del suelo para cada material y se ha colocado la información en el modelo Hydrus-3D, eliminando así incertidumbre en cuanto a este valor.

Se ha procedido a reproducir en el modelo Hydrus-3D las condiciones de comportamiento de un suelo enarenado y se ha podido comprobar que las predicciones son adecuadas a lo observado hasta el momento. Se ha definido así el procedimiento para simular adecuadamente los suelos estratificados con capa de arena.

Se ha podido comprobar que la inclusión de un día previo en las simulaciones permite que las condiciones iniciales se puedan definir en las 3 dimensiones de una operación de riego localizado.

Se ha podido simular con éxito lo que se venía observando en cuanto a la distribución de humedad en torno a la planta. Cabe destacar que, en las condiciones de cultivo intensivo, regado por goteo, con control automático del riego, como el que se presenta, la mayor parte del año no se forma una zona humedecida en torno a los goteros sino más bien una zona seca en torno a la planta.

A la vista de los resultados expuestos cabe recomendar que los tensiómetros de control del riego se coloquen más cerca de emisores y planta y a menor profundidad, de lo que se está haciendo en la actualidad.

Se pretende utilizar esta herramienta en próximos trabajos para estudiar con mayor precisión la evolución de la humedad en los bulbos húmedos generados en suelos enarenados característicos de los cultivos hortícolas intensivos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto RTA2015-00029-C02-02, financiado por el INIA.

REFERENCIAS

- Amin, M.S.M., Ekhmaj, A.I.M. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. *7th Int. Micro Irrigation Congress, PWTC*, Kuala Lumpur, Malaysia, 10–12.
- Arbat, G., Puig-Bargués, J., Duran-Ros, M., Barragan, J., Cartagena, F. 2013. Drip-Irrigator: Computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.009>
- Bouyoucos, G.J. 1936. Directions for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. *Soil Science*, 42, 225-230. <https://doi.org/10.1097/00010694-193609000-00007>
- Brooks, R., Corey, T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers n° 3*, Fort Collings. Colorado State University.
- Chu, S.T. 1994. Geen-Ampt Analysis of wetting patterns for surface emitters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(2), 414-421. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\)120:2\(414\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:2(414))
- Fernández, J.E., Moreno, F., Cabrera, F., Arrue, J.L., Martín-Aranda, J. 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and soil*, 133(2), 239-251. <https://doi.org/10.1007/BF00009196>
- Karmeli, D., Peri, G., Todes, M. 1985. *Irrigation Systems: Design and Operation*. Ed. Oxford University Press. Cape Town.
- Newman, E. 1966. A Method of Estimating the Total Length of Root in a Sample. *Journal of Applied Ecology*, 3(1), 139-145. <https://doi.org/10.2307/2401670>
- Pérez, J., López, J., Fernández, M.D. 2002. *La agricultura del sureste: situación actual y tendencias de las estructuras de producción en la horticultura almeriense*, 2a. edición Madrid: Editorial Caja Rural Intermediterránea.
- Schwartzman, M., Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3), 242-253. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:3\(242\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242))
- Šimunek, J., Van Genuchten, M.T., Šejna, M. 2012. HYDRUS: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1263-1274. <https://doi.org/10.13031/2013.42239>
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vrugt, J., Hopmans, J., Šimunek, J. 2001a. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4), 1027-1037. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541027x>
- Vrugt, J.A., Van Wijk, M.T., Hopmans, J.W., Šimunek, J. 2001b. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resources Research*, 37(10), 2457-2470. <https://doi.org/10.1029/2000WR000027>
- Willmott, C.J. 1981, On the Validation of Models. *Physical Geography*, 2(2), 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Zapata-Sierra, A.J., López-Segura, J.G., Cánovas-Fernández, G., Baeza-Cano, R. 2018. Caracterización del bulbo mojado por un gotero en suelos arenados mediante sondas fdr. *XXXVI Congreso Nacional de Riegos*, Valladolid, 2018, 1-8. <https://doi.org/10.25028/CNRiegos.2018>
- Zapata-Sierra, A.J., Contreras, J., Usero, F., Baeza, R. 2015. Influencia de la textura del suelo en los bulbos húmedos desarrollados en suelo enarenado con emisores de riego localizado de bajo caudal. *XXXIII Congreso Nacional de Riegos* Universitat Politècnica de València, Valencia 2015, 74-84. <https://doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1431>