

Simulación y Validación del Contenido de Agua en el Suelo con el Modelo HYDRUS.

Ruiz Salleres, I., Nortes, P.A., González Real, M.M., Baille, A.

Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Área de Ingeniería Agroforestal. Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 7052, Fax: 968 32 7031. E-mail: isabel.ruiz.salleres@gmail.com

Resumen. Se utilizó un modelo de simulación (Hydrus 2D/3D) de la dinámica y contenido hídrico de agua (θ) en el perfil del suelo de un cultivo de almendro (finca experimental Tomas Ferro, UPCT-ETSIA) sometidos a tres estrategias de riego: control regado al 100% de la evapotranspiración estándar (CTL); riego por desecación parcial de raíces (PRD) y riego deficitario controlado (RDC). Se estudió su nivel predictivo en las tres estrategias y su sensibilidad a una variación en los parámetros de entrada. Los resultados muestran que el modelo requiere la identificación previa de un número importante de parámetros de entrada para poder simular correctamente el contenido de agua en el perfil del suelo. En el análisis de sensibilidad se observó que el modelo es muy sensible a las variaciones de los parámetros hidráulicos del suelo, en especial la conductividad hidráulica de saturación, el flujo de agua aportado y la superficie mojada.

1 Introducción

La agricultura de regadío es una de las actividades de mayor consumo de agua en el planeta, destinándose a este sector, aproximadamente, el 70 % del consumo total de agua, lo que explica el interés por los sistemas y estrategias de riego que incrementan la eficiencia de uso del agua. Para llevar a cabo este objetivo, es necesario potenciar las estrategias de riego deficitario por goteo y optimizar los parámetros operacionales que utilizan los regantes, tales como la frecuencia, la velocidad y duración de la aplicación de agua, y la elección, ubicación y colocación de los emisores y laterales.

Los modelos de estimación del contenido y de la dinámica de agua del suelo son una herramienta valiosa en la optimización del diseño de sistemas de riego dado que, una vez validados, permiten evaluar las estrategias de riego (ej. riego deficitario controlado, RDC, riego por desecación parcial de raíces, PRD), con un enfoque rápido y poco costoso basado en un análisis detallado de la distribución espacio temporal de agua.

En este trabajo, se utilizó un modelo de elementos finitos (HYDRUS-2, Šimůnek et al. 1999), aplicable a medios porosos parcialmente saturados, que simula en dos y tres dimensiones la dinámica de agua, la transferencia de energía, el movimiento de solutos y sus variables saturadas en el suelo. El modelo se basa en la solución numérica de la ecuación de Richard para el flujo de agua.

La utilización del modelo requiere ensayos previos de campo con el objeto de caracterizar las propiedades físicas del suelo y su contenido en humedad en diferentes capas. Los objetivos específicos fueron: (i) estudiar la sensibilidad del modelo a los principales parámetros de entrada; (ii) analizar la calidad del modelo para predecir la distribución espacial del contenido de agua en el suelo bajo diferentes

estrategias bajo distintos regímenes hídricos y (iii) caracterizar el nivel predictivo del modelo a escala horaria y a escala diaria, a lo largo del ciclo de desarrollo, en las tres estrategias de riego.

2 Materiales y Métodos

2.1 Condiciones experimentales

Los datos experimentales corresponden a un estudio realizado en 2007 en la Estación Experimental Tomás Ferro (ESEA) (37°35'N, 0°59'W), en una parcela de 1 hectárea de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) Webb, cv 'Marta' injertada sobre portainjerto 'Mayor') y plantados en diciembre de 1999 a marco de plantación de 6m x 7m. Se establecieron subparcelas experimentales formadas por 12 árboles por parcela y tres parcelas por tratamiento. Se establecieron tres tratamientos de riego: CTL, regado al 100 % de la evapotranspiración estándar del cultivo (ET_c) durante todo el ciclo; RDC regado a 100 % ET_c , excepto durante la fase IV (llenado del grado) en la que se regó al 30 % de la ET_c y por último, un PRD, regado al 50 % de la ET_c durante todo el ciclo de desarrollo.

El contenido volumétrico de agua en el suelo se determinó con un sensor de humedad FDR (DIVINER 2000 ® series II), calibrado previamente en la misma parcela experimental. La medición de la humedad del suelo se llevó a cabo, en todos los tratamientos, con un intervalo semanal en todos los tubos de acceso entre las 8 y 9 h (hora local). Se utilizaron los datos climáticos de la estación automática ubicada en la ESEA. Los parámetros climáticos se registraron y almacenaron en un datalogger Campbell modelo CR1000 (Campbell Scientific Inc., USA) cada 15 minutos. Se midió la temperatura y humedad relativa del aire (sonda HMP45C, Vaisala, Finlandia), la radiación solar global (piranómetro CMP6 de Kipp&Zonen, Holanda) y la radiación neta (radiómetro Q-7.1, Radiation and Energy Systems, Seattle, Washington,

USA), la pluviometría (sensor FSS500, Campbell Scientific Inc., USA) y la velocidad del viento (anemómetro A100R, Vector Instruments, UK) y dirección del viento (veleta W200P, Vector Instruments, UK). Las necesidades hídricas máximas del cultivo fueron calculadas a partir de la expresión:

$$ET_c = K_r ET_o = K_c K_l ET_o \quad \text{Ec. 1}$$

donde ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia (calculada con la fórmula Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998)), ET_c representa las necesidades hídricas máximas del cultivo en riego por goteo, K_c es el coeficiente de cultivo, K_l el coeficiente de localización y K_r es el coeficiente de riego empleado para la programación del riego.

2.2 Modelo Hydrus

HYDRUS 2D simula en dos dimensiones la dinámica de agua, la transferencia de energía, el movimiento de solutos y sus variables saturadas en el suelo (Šimunek et al. 2007). La dinámica del flujo se resuelve por el método de elementos finitos (Galerkin). El modelo se basa en la solución numérica de la ecuación de Richards (Ec. 2):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) \right] - S \quad \text{Ec. 2}$$

donde θ es el contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), t es el tiempo, z es la profundidad (cm), h el potencial hídrico del suelo (tensión, en cm), K es la conductividad hidráulica (cm día^{-1}) y S es el término sumidero (volumen de agua extraída por volumen de suelo debido a la absorción de la planta, en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{t}^{-1}$).

El paquete de software consiste en un programa informático de cálculo y un gráfico interactivo basado en la interfaz de usuario. El modelo requiere un número importante de parámetros de entrada, tales como la geometría de superficie de suelo, procesos que se van a simular, propiedades hidráulicas del suelo (van Genuchten, 1980), características del suelo, condiciones de humedad iniciales, condiciones climáticas, evapotranspiración y cantidad de agua aplicada en el suelo. Con estos parámetros, el modelo proporciona la evolución temporal de las siguientes variables de salida, distribuidas por capas de suelo en función de la profundidad elegida: (i) valores de potencial matricial para cada capa y contenido volumétrico de humedad del suelo (θ); (ii) velocidad de infiltración de agua en el suelo y vector velocidad; (iii) flujo de agua y flujo acumulado. También proporciona una animación del comportamiento del agua en el suelo.

3 Resultados

3.1. Simulaciones de la dinámica del agua en el perfil a escala diaria y horaria

A escala diaria, se simuló el contenido de humedad en el suelo (θ) para el periodo comprendido entre el 1 de marzo y el 15 de septiembre de 2007. Se consideró

un suelo con características homogéneas en los primeros 80 cm, un flujo de agua aplicado de $6,36 \text{ cm h}^{-1}$ y con un diámetro mojado de 40 cm. La densidad radicular se consideró igual al 70 %, en la capa de 0 a 15 cm, y al 30 % en la capa de 15 a 40 cm. El marco simulado fue de 6 m de longitud x 1,20 m de profundidad.

En todos los tratamientos la evolución del contenido de humedad del suelo (θ) es bastante similar en el periodo sin riego que corresponde a la fase II y parte de la fase III (Fig. 1). Los diferentes tratamientos de riego se empezaron a aplicar a partir de mediados de mayo.

En CTL el modelo da una buena estimación de los valores observados de θ (Fig. 1A), con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,84 y un error estándar $SE = 0,021 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$. En el tratamiento PRD (Fig. 1B), el modelo simula de forma correcta la variación de θ que corresponde a los ciclos de riego y de desecación de raíces (ej. la mitad del sistema radicular se mantiene en proceso de desecación mientras que la otra se riega al 100 % ET_c , alternando el riego entre ambas cada 15 días, aproximadamente). El valor de θ varía de $0,2 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (periodo de desecación) a $0,4 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (riego al 100 % ET_c). En este tratamiento, el modelo proporciona también una simulación correcta de los valores medidos ($R^2 = 0,92$; $SE = 0,023 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$). En el tratamiento RDC el modelo proporciona un patrón de distribución del contenido de humedad que difiere sensiblemente del observado. En este caso, el nivel de predicción del modelo fue mucho más bajo ($R^2 = 0,29$, $SE = 0,045 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$), debido a que tiende a sobreestimar los valores medidos de θ (Fig. 1C) en el periodo en el que se aplica un 30% de la ET_c (fase de llenado del grano).

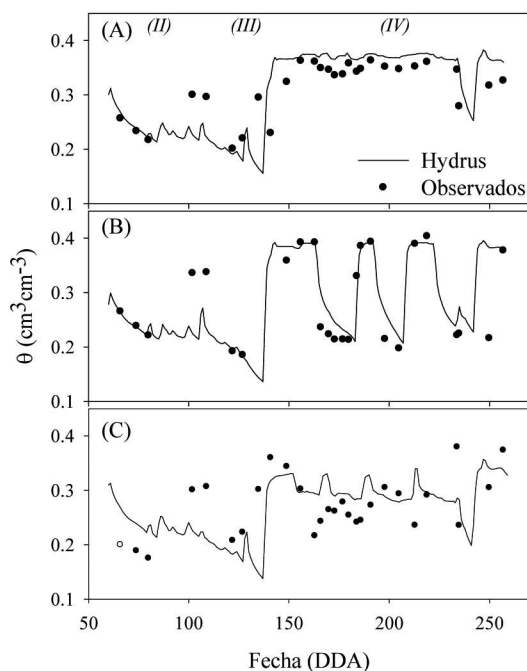


Fig.1. Comparación de los valores observados y estimados (modelo Hydrus) del contenido de humedad del suelo (θ) en los primeros 30 cm de profundidad, para los tratamientos CTL (A),

PRD (B) y RDC (C). Las líneas discontinuas separan los estados de desarrollo II, III y IV.

A escala horaria las simulaciones se realizaron en periodo de verano en el tratamiento CTL considerando un solo gotero (Fig. 2). Las simulaciones se hicieron considerando condiciones similares a las utilizadas a escala estacional, excepto el marco de suelo (1 m longitud x 1,20 m de profundidad). El modelo simula correctamente la tendencia de los valores observados de θ . Sin embargo, existe un desfase temporal entre los valores estimados de θ y los observados en los 20 primeros centímetros. Además, a partir de los 30 cm el modelo presenta una subestimación de θ que puede ser debida a una falta de precisión del sensor de medida de θ . Es decir, a esta profundidad, el contenido de humedad varía dentro de una gama estrecha ($0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) que corresponde a la sensibilidad del sensor utilizado.

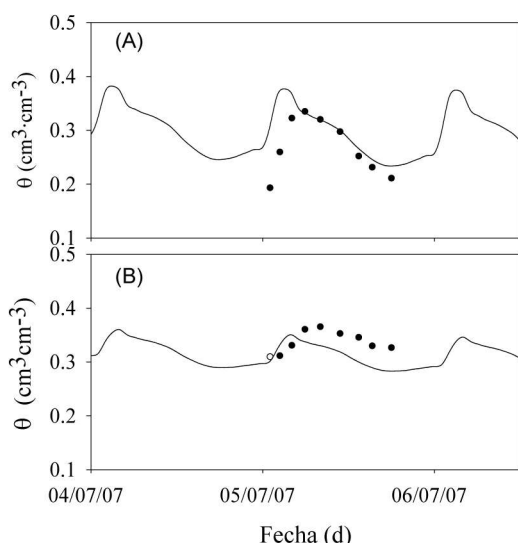


Fig. 2. Comparación de los valores observados y estimados (modelo Hydrus) del contenido de humedad en el suelo (θ) para el tratamiento CTL. Día 5 de julio de 2007. Promedio: (A) de los primeros 20 cm y (B) de los 20-40 cm de profundidad.

3.2. Análisis de sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del modelo Hydrus-2D a variables de suelo, de la planta y de condiciones de contorno. Se seleccionaron los parámetros a modificar analizando las salidas del modelo cuando varía un solo parámetro. Se estudió la sensibilidad a variaciones (i) de parámetros que caracterizan la respuesta de las raíces al estrés hídrico (Feddes et al., 1978), como el índice de estrés crítico (CSI) o el potencial que corresponde a un máximo de extracción de agua (Popt), (ii) a una tasa de transpiración variable (de 0,1 y 0,5 cm día^{-1} , P2L y P2H respectivamente), (iii) a una variación de la conductividad del suelo, y (iv) a una variación del flujo de agua aplicada o del diámetro de suelo mojado.

Los resultados mostraron que el modelo es especialmente sensible a los cambios en las propiedades del suelo, en especial a la conductividad

hidráulica y a las condiciones de riego CTL, PRD, RDC. Sin embargo, el modelo es poco sensible a una variación de los parámetros de absorción radicular (Popt, P2L y P2H). Este comportamiento puede ser debido a que en las simulaciones no se ha tenido en cuenta la concentración de solutos del agua.

4 Conclusiones

El modelo Hydrus utilizado para simular el contenido de agua en el suelo (θ) así como su variabilidad espacial requiere un número relativamente importante de parámetros de entrada para obtener una estimación correcta del perfil de θ en el suelo. Además, exige una estimación fiable de las características hidráulicas del suelo, siendo muy sensible a los valores de θ a saturación, a la humedad residual y a la conductividad hidráulica a saturación. El modelo es capaz de simular el aumento rápido de θ después del riego, así como la influencia que ejerce la evapotranspiración del cultivo en la evolución temporal de θ (tratamientos: CTL y PRD).

Su nivel predictivo es satisfactorio para las capas superiores del suelo en las que θ presenta mayor variabilidad (perfil: 0-40 cm), mientras que para capas más profundas parece depender de las hipótesis sobre las características del suelo, la densidad radicular y el tipo de flujo de drenaje en estos horizontes de suelo (interfase zona radicular-no radicular).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de la Comisión Europea (grant numbers: FP6-2004-FOOD-3B C023120_IRRIQUAL project and FP7-KBBE-2009-3-245159_SIRRIMED project).

Referencias

- [1] Allen RG, Pereira LS, Raes D, and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome: FAO - irrigation and drainage paper 56.
- [2] Šimůnek J., Sejna M., van Genuchten M.Th., 2007. Technical Manual, The Hydrus Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Prague, Czech Republic: PC-Progress.
- [3] Van Genuchten M. Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, 44, 892-898.
- [4] Feddes R. A., Kowalik P. J., and Zaradny H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York, NY.