

Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo

• Fidencio Cruz-Bautista* •
Universidad de Sonora, México

*Autor de correspondencia

• Alejandro Zermeño-González • Vicente Álvarez-Reyna • Pedro Cano-Ríos •
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México

• Miguel Rivera-González •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Mario Siller-González •
Instituto Politécnico Nacional, México

Resumen

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (julio-agosto, 2015). Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 131-140.

La forma y el volumen de suelo mojado que se obtiene cuando los emisores aplican el agua es la característica más importante en el diseño de los sistemas de riego por goteo. El volumen de suelo mojado representa la cantidad de agua almacenada, mientras que su extensión, profundidad y diámetro deben coincidir con el sistema radicular de la planta y espaciamiento entre emisores y líneas regantes. Por esta razón, el objetivo del presente estudio fue desarrollar ecuaciones para describir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo en un riego por goteo. Se usó información de patrones de humedecimiento de suelo y características físicas e hidráulicas de tres diferentes texturas para el desarrollo de dos ecuaciones. Los resultados mostraron que estas ecuaciones describen el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de suelos de textura franco-arenoso, franco-arcilloso o franco-limoso, con una confiabilidad de 90 y 94%. Estas ecuaciones muestran que la extensión del bulbo de humedecimiento es función del volumen de agua aplicada, caudal del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo en el suelo. Los resultados demostraron que estas ecuaciones pueden utilizarse para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en un sistema de riego localizado, así como el número de emisores necesarios para humedecer el volumen de suelo requerido.

Palabras clave: modelo matemático, volumen de suelo mojado, riego por goteo, patrón de humedecimiento.

Abstract

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (July-August, 2015). Modeling to Estimate the Dimensions of the Wet Bulb in Trickle Irrigation. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 131-140.

The shape and volume of the wet soil resulting from the application of water by emitters is the most important factor in the design of trickle irrigation systems. The wet soil volume represents the amount of stored water, and the extension, depth and diameter should coincide with the radicle system of the plants and the spacing between emitters and irrigation lines. Therefore, the objective of this work was to develop equations to describe the advance of water in the wet bulb with a trickle irrigation system. Information related to soil wetting patterns and physical and hydraulic characteristics were used with three different textures to develop two equations. The results show that these equations describe the lateral and vertical advance of the water in the wet bulb of sandy-loam, clay-loam and silty-loam soils with a reliability of 90 to 94%. These equations show that the extension of the wet bulb depends on the volume of water applied, the flow of the emitter, the saturated hydraulic conductivity, initial and residual moisture contents of the soil and the silt content. The results demonstrate that these equations can be used to estimate the extension of the wet bulb in the soil with a localized irrigation system, and thereby determine the number of emitters needed to moisten the volume of soil required.

Keywords: Mathematical model, wetted soil volume, drip irrigation, wetting-pattern.

Recibido: 05/09/2012
Aceptado: 30/04/2015

Introducción

Conocer la distribución del agua bajo los emisores en los sistemas de riego por goteo es un requisito para su diseño y operación, pues la característica más importante en el diseño de este tipo de sistemas es la forma y el volumen de suelo mojado que se obtienen cuando los emisores aplican el agua. Por una parte, el volumen de suelo mojado representa la cantidad de agua almacenada en el suelo; mientras que su extensión, profundidad y diámetro deben coincidir con la profundidad del sistema radicular de la planta y con el espaciamiento entre emisores y líneas regantes (Zur, 1996; Maia, Luiz, Francismar, & Dantas, 2010). El volumen de suelo mojado y su extensión es función de la textura y estructura del suelo, conductividad hidráulica saturada y contenido de humedad inicial, así como del caudal del emisor y el volumen total de agua aplicada (Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi, Mosavi, & Parvanak, 2011). También otras variables, como la posición relativa del emisor, cantidad y frecuencia de riego, cambios temporales y espaciales del contenido de humedad en el suelo, entre otras, afectan al régimen del movimiento del agua en el suelo (Mmolawa & Or, 2000; Ruiz-Canales, Plana, Ruiz-Sánchez, Franco, & Abrisqueta, 2005; Kandelous & Simunek, 2010). Entonces, si se conoce la distribución del agua dentro del volumen de suelo mojado, el o los emisores se pueden ubicar y manejar de tal forma que se garantice la colocación precisa del agua y nutrientes en la zona radicular de las plantas (Ruiz-Canales *et al.*, 2005; Amin & Ekhnaj, 2006; Elmaloglou & Diamantopoulos, 2009). No obstante, existen pocos estudios que muestran la dinámica de la distribución de agua en el suelo con riego por goteo en condiciones de campo.

Por tal razón, el objetivo de este estudio fue desarrollar ecuaciones para describir el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor en un sistema de riego por goteo superficial.

Consideraciones teóricas

El patrón de la distribución del agua en el suelo

es una de las características que influye de manera significativa en el diseño de los sistemas de riego localizado. En este sentido, se han hecho varios estudios para determinar la distribución y el patrón de humedecimiento del agua en el suelo, usando sofisticados modelos analíticos y numéricos (Dasberg & Or, 1999). Asimismo, se han desarrollado varios modelos empíricos, analíticos y numéricos para predecir los patrones de humedecimiento del suelo con riego por goteo, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards (Cook, Fitch, Thorburn, Charlesworth, & Bristow, 2006; Kandelous & Simunek, 2010). No obstante que la mayoría de estos modelos incorporan variables como caudal del emisor, volumen de agua aplicada y propiedades hidráulicas del suelo para sus predicciones, muchos de ellos no se presentan en forma directamente aplicable al diseño y manejo de sistemas de riego localizado, aparte de basarse en soluciones para las cuales existen fuertes restricciones (Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi *et al.*, 2011, Ramírez de Cartagena & Sáinz-Sánchez, 1997). Por su parte, los modelos empíricos y semi-empíricos, desarrollados de forma típica a través de análisis de regresión o de las observaciones de campo, son más convenientes de usar para el diseño y operación de estos sistemas de riego (Ramírez de Cartagena & Sáinz-Sánchez, 1997; Amin & Ekhnaj, 2006; Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi *et al.*, 2011).

Con base en lo antes señalado y congruente con las aproximaciones introducidas por Shwartzman y Zur (1986), y Amin y Ekhnaj (2006), se proponen las ecuaciones (1) y (2) para relacionar las variables explicativas respecto al avance del agua en los bulbos de humedecimiento. Estas ecuaciones derivan de una selección de variables con el método Stepwise y la relación no lineal entre ellas se puede expresar como:

$$r = \beta_0 V^{\beta_1} K_s^{\beta_2} \theta_v^{\beta_3} \quad (1)$$

$$Z = \beta_0 V^{\beta_1} Q^{\beta_2} \theta_v^{\beta_3} \theta_r^{\beta_4} L_i^{\beta_5} \quad (2)$$

donde r = avance lateral (L); Z = avance vertical (L); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, b_4$ y β_5 son los coeficientes de regresión; V = volumen de agua aplicada (L³); Q = caudal del emisor (L³ T⁻¹); K_s = conductividad hidráulica saturada (L T⁻¹); θ_v = contenido de humedad inicial del suelo (L³ L⁻³); θ_r = contenido de humedad residual del suelo (L³ L⁻³); L_i = contenido de limo (%).

Materiales y métodos

El estudio se realizó en tres texturas de suelo localizadas en la región lagunera de Coahuila, México. La primera textura de suelo correspondió a un franco limoso, situado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. La segunda textura correspondió a un franco arcilloso, situado en el Instituto Tecnológico de Torreón, y la tercera clase textural de suelo correspondió a un franco arenoso, situado en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, ubicado en Matamoros Coahuila.

Para las pruebas de humedecimiento en campo se instaló un equipo de riego por goteo superficial. El equipo de riego se constituyó con un contenedor para agua, cabezal de riego y línea regante. La línea regante se integró por una manguera de polietileno de 12.7 mm de diámetro, tramos de tubines de polietileno de 6.35 mm de diámetro y emisores. Los tubines se colocaron sobre la línea regante con una separación de 1.5 m. El emisor se instaló al final de cada tubin.

Se realizaron tres pruebas de humedecimiento en cada textura de suelo para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos que se forman bajo los emisores. Las pruebas consistieron en la aplicación de tres volúmenes diferenciados de agua en el suelo con el equipo de riego descrito. La primera prueba se realizó con emisores de caudal nominal de 2 litros por hora (lph), con un tiempo de riego de 0.5, 1.0,

1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 6.5 y 8.0 horas. Las otras dos pruebas se realizaron bajo el mismo procedimiento, usando emisores de caudal nominal de 4 y 8 lph, respectivamente.

Variables medidas

Parámetros físicos e hidráulicos del suelo

Se determinó la proporción de partículas sólidas de cada uno de los suelos con el método del hidrómetro de Bouyoucos y la clasificación textural se hizo con el triángulo de texturas. También se determinó el contenido de humedad de los suelos mediante el método gravimétrico, antes de cada prueba, a las profundidades señaladas en el cuadro 1. Además, se determinó la conductividad hidráulica saturada de los suelos *in situ* con el permeámetro de Guelph, usando 5 y 10 cm de carga hidráulica, de acuerdo con el procedimiento descrito por Reynolds y Elrick (1985), y Reynolds *et al.* (2002). También se modelaron los parámetros de la curva de retención de agua y conductividad hidráulica saturada de los suelos usados (cuadro 2), usando el programa ROSETTA, versión: 1.2 (Schaap, Leij, & Van Genuchten, 2001), que usa las relaciones constitutivas de Van Genuchten (1980) y Mualem (1976) en sus estimaciones (Skaggs, Trout, Simunek, & Shouse, 2004; Kandelous & Simunek, 2010):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

donde $\theta(h)$ representa el contenido de agua para un determinado potencial hidráulico (h); θ_s y θ_r son los contenidos de agua a saturación y residual; α y n son parámetros que influyen en la forma de la función de retención de agua:

$$K(h) = K_s S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{1/n} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

y $K(h)$ es la conductividad hidráulica insaturada, siendo L la conectividad entre los poros, K_s la conductividad hidráulica saturada y S_e la saturación efectiva definida como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

Patrón de humedecimiento en el bulbo

El patrón de humedecimiento del bulbo bajo los emisores se obtuvo por medición directa del frente de humedecimiento (avance lateral y vertical) en el suelo en campo, inmediatamente después de que finalizó el riego de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Finalizado el tiempo de riego de 0.5, 1.0, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 6.5 y 8.0 horas, se midió el área humedecida de suelo bajo cada emisor.
- Se excavó $\frac{1}{4}$ de círculo del área de suelo humedecido y se trazó una cuadrícula en las coordenadas (x, z) y (y, z) , centrada en el punto fuente del emisor (figura 1).
- Finalizado el trazo, se midió la longitud del frente de humedecimiento en las direcciones horizontal y vertical.

Análisis de datos

Para determinar los coeficientes de las ecuaciones (1) y (2), se utilizaron los datos medidos del avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento en campo; también se emplearon los datos de las características físicas e hidráulicas de los tres tipos de suelo en donde se realizaron las pruebas de humedecimiento (cuadros 1 y 2). Como se ha señalado, las variables de las ecuaciones (1) y (2) presentan una relación no lineal respecto a la variable dependiente, por lo cual se hicieron intrínsecamente lineales a través de una transformación logarítmica para facilitar su análisis y obtener los coeficientes mediante una regresión lineal múltiple (Amin & Ekhmaj, 2006).

Resultados

Ecuaciones para predecir la distribución del agua en los bulbos de humedecimiento

Las ecuaciones (6) y (7) muestran los coeficientes obtenidos para las variables propuestas en las ecuaciones (1) y (2). Estas variables son las que influyen en el avance del agua en el bulbo de humedecimiento, con una confiabilidad de 90 y 94%, respectivamente, y se expresan como:

$$r = 0.14 V^{0.353} K_s^{-0.110} \theta_v^{-0.387} \quad (6)$$

$$Z = 7.906 V^{0.458} Q^{-0.152} \theta_v^{0.386} \theta_r^{0.349} L_i^{-0.421} \quad (7)$$

donde r = avance lateral (m); Z = avance vertical (m); V = volumen de agua aplicada (m^3); K_s = conductividad hidráulica saturada (m s^{-1}); Q = caudal del emisor ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); θ_v = contenido de humedad inicial del suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r = contenido de humedad residual del suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); L_i = contenido de limo (%).

La ecuación (6) muestra que el avance lateral (r) es función del volumen de agua aplicada, de la conductividad hidráulica saturada y del contenido de humedad inicial del suelo. Los coeficientes de significancia parciales (prueba t) para estas variables son 24.85, -3.93 y -7.45, respectivamente, con coeficiente de determinación múltiple de 0.90 y una $P(F > 209.26) \leq 0.01$. El avance vertical (Z) del agua en el bulbo de humedecimiento se explica de acuerdo con la ecuación (7) por el volumen de agua aplicada, el caudal del emisor, el contenido de humedad inicial y residual del suelo, y el contenido de limo. Los coeficientes de significancia parciales para estas variables son 20.06, -4.55, 4.10, 3.92 y -8.31, respectivamente, con coeficiente de determinación múltiple de 0.94 y una $P(F > 194.74) \leq 0.01$.

Forma y extensiones de los bulbos de humedecimiento bajo un emisor

Cuadro 1. Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos donde se realizaron las pruebas del patrón de humedecimiento.

Clase textural	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena	Humedad inicial	Densidad aparente	Conductividad hidráulica asaturada
	(cm)	(%)	(%)	(%)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(g cm^{-3})	(cm h^{-1})
Franco limoso	0 – 20	28	46	26	0.098	1.146	2.050
	20 – 40	24	54	22	0.105	1.154	
	40 – 60	30	52	18	0.127	1.241	
Franco arcilloso	0 – 20	26	22	52	0.066	1.139	3.283
	20 – 40	36	32	32	0.075	1.113	
	40 – 60	44	30	26	0.103	1.362	
Franco arenoso	0 – 20	11	12	77	0.030	1.468	2.803
	20 – 40	11	9	80	0.048	1.538	
	40 – 60	8	8	84	0.063	1.526	

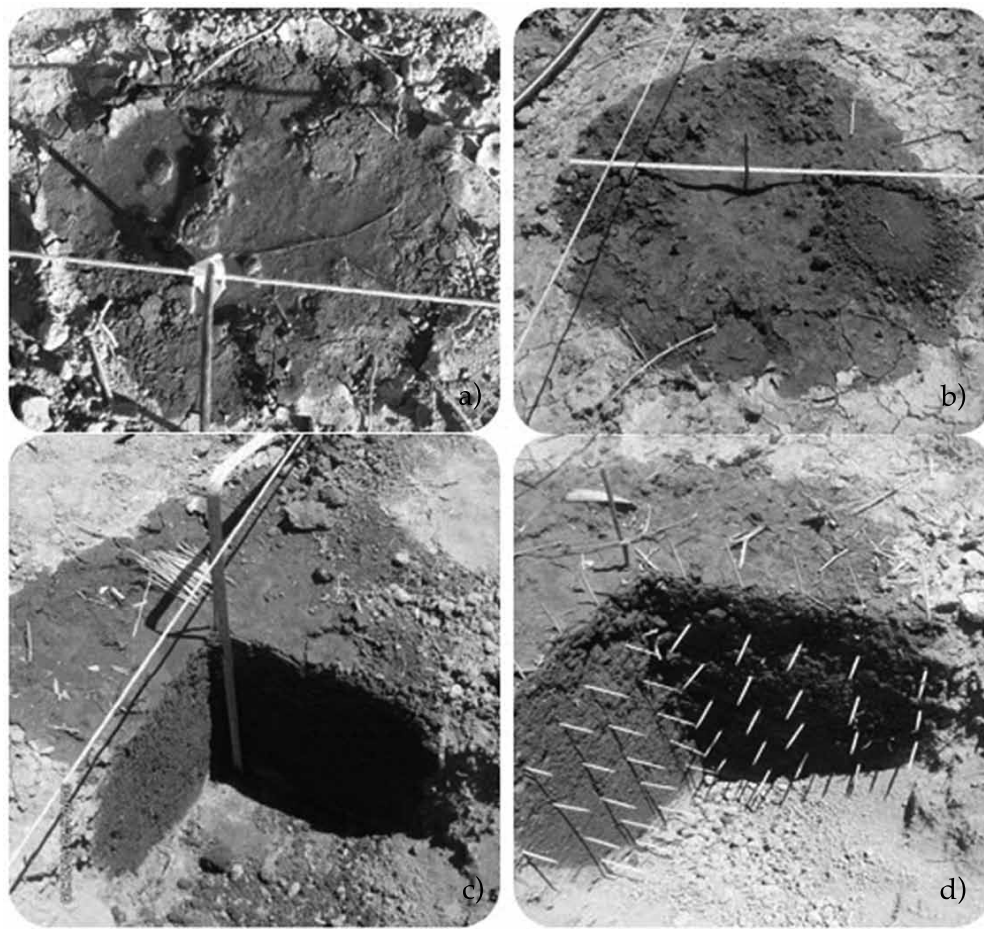


Figura 1. Forma y extensión del bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor: a) aplicación de agua por el emisor; b) superficie de suelo humedecido; c) perfil del suelo humedecido; d) extensión de suelo humedecido (cuadrícula en x, y, z , con separación de 5 cm), centrado en el punto fuente.

Cuadro 2. Parámetros hidráulicos de los suelos donde se realizaron las pruebas de patrón de humedecimiento, obtenidos con el programa ROSETTA, versión 1.2 (Schaap et al., 2001).

Clase textural	Profundidad (cm)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	K_s cm h ⁻¹	α cm ⁻¹	n	L
Franco limoso	0-20	0.071	0.495	1.928	0.013	1.351	-0.357
	20-40	0.062	0.480	2.210	0.009	1.413	0.207
	40-60	0.075	0.482	1.173	0.008	1.384	-0.046
Franco arcilloso	0-20	0.071	0.507	3.944	0.034	1.294	-1.611
	20-40	0.087	0.531	2.183	0.022	1.271	-1.472
	40-60	0.081	0.483	0.434	0.014	1.227	-1.439
Franco arenoso	0-20	0.041	0.401	5.152	0.050	1.416	-1.337
	20-40	0.043	0.386	4.797	0.051	1.435	-1.359
	40-60	0.037	0.386	7.336	0.056	1.499	-1.212

θ_s y θ_r representan el contenido de agua a saturación y residual; k_s , la conductividad hidráulica saturada; α , la relación inversa de la entrada de aire en el suelo; n , la medida de la distribución del tamaño de poros del suelo, y L es la conectividad entre los poros. Estos son los parámetros que influyen en la función de retención de agua.

Respecto a la forma y extensión de los bulbos de humedecimiento, se muestra sólo un lado del frente de humedecimiento (figura 2), pues se asume que el avance del frente es simétrico en el suelo. En el cuadro 3 se muestra la proporción de variación en el avance lateral y vertical del agua en los bulbos de humedecimiento entre las texturas de suelo y el volumen de agua aplicada.

Discusión

Las ecuaciones (6) y (7) muestran las variables que influyen en el avance del agua en el bulbo de humedecimiento, con una confiabilidad de 90 y 94%, respectivamente. El avance lateral y vertical (r y Z) del agua en el bulbo se explica por la relación que existe entre el volumen de agua aplicada (V), caudal del emisor (Q), conductividad hidráulica saturada (K_s), contenido de humedad inicial y residual del suelo (θ_v y θ_r), y contenido de limo (L_i). También se aprecia que la variable que más contribuye al movimiento lateral y vertical del agua en los bulbos húmedos es el volumen de agua aplicada (V). Esto se debe a que V muestra los coeficientes de significancia parciales (prueba t) más altos (24.85 y 20.06, respectivamente). De mismo modo, V presenta coeficientes de correlación de 0.905 y 0.910 respecto a las variables dependientes r y

Z . Estos resultados concuerdan con información reportada por Schwartzman y Zur (1986), Gil-Marín (2001), Amin y Ekhmaj (2006), y Nafchi et al. (2011). Entonces la extensión del bulbo de humedecimiento que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en suelos de textura franco-arenoso, franco-arcilloso o franco-limoso depende, por orden de importancia, del volumen de agua aplicada, es decir, el tiempo de riego, caudal del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual, y contenido de limo del suelo.

Las variables mostradas en las ecuaciones (6) y (7) son significativas para un total de nueve variables que se consideraron a ser explicativas para el avance lateral y vertical (r y Z) del agua en el bulbo. Otras variables que también se tomaron en cuenta en el proceso de selección fueron densidad aparente, contenido de arena y arcilla. Para el caso de las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos (cuadros 1 y 2), éstos se analizaron de manera diferenciada para cada estrato del perfil del suelo, en concordancia con lo que sugiere Ramírez de Cartagena y Sáinz-Sánchez (1997).

El método Stepwise no consideró a la conductividad hidráulica saturada (K_s) como otra de las variables que influyen en el avance vertical del agua en el bulbo de humedecimiento,

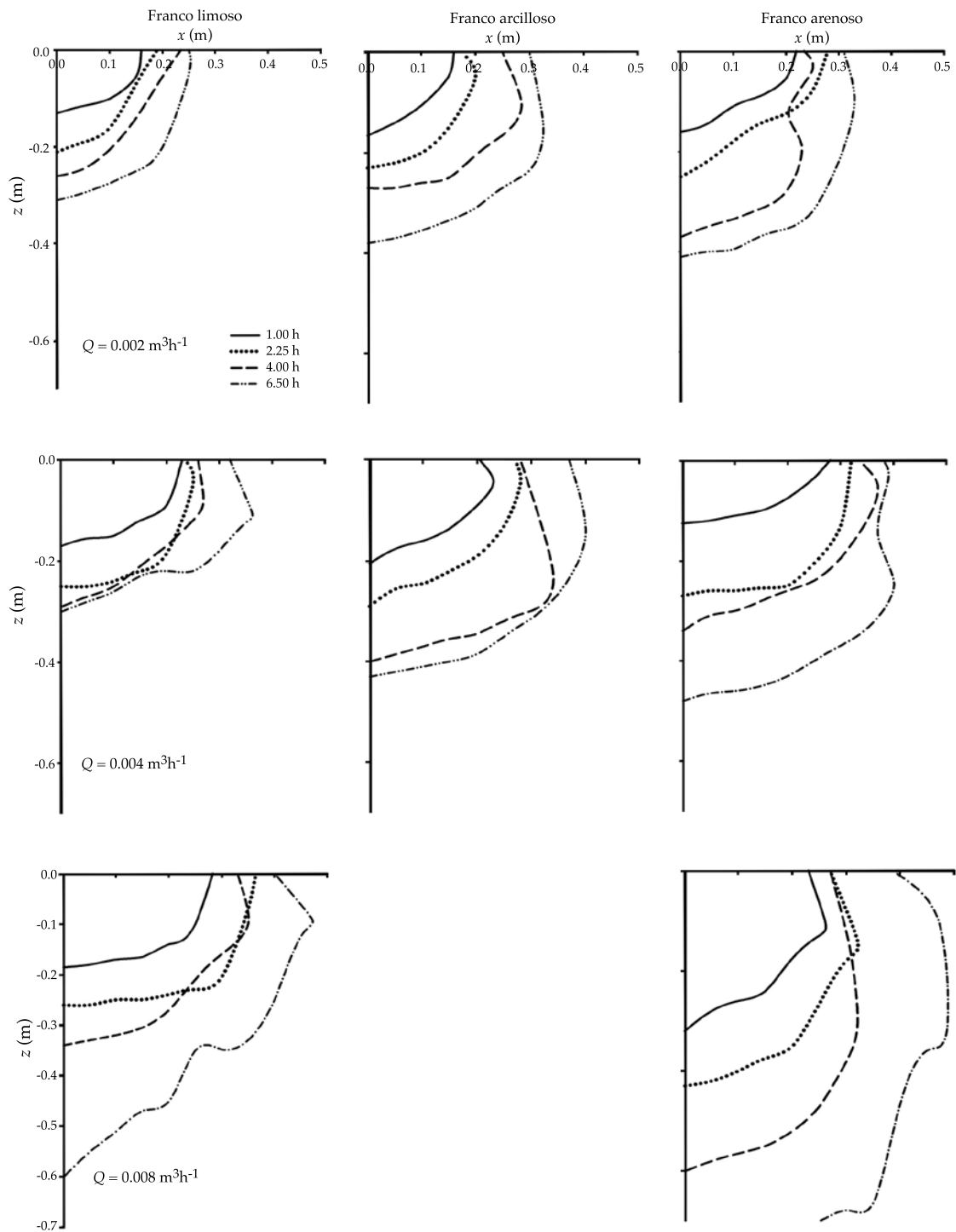


Figura 2. Avance del frente de humedecimiento en los bulbos en los suelos después 1.0, 2.25, 4.0 y 6.5 horas de riego.

como lo proponen Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), y Kandelous, Liaghat y Abbasi (2008) en sus modelos y como pudiera

esperarse. Pero haciendo un análisis detallado, se detecta que la K_s guarda una relación inversamente proporcional con el contenido de hu-

Cuadro 3. Variación en el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento entre las texturas de suelo y volumen de agua aplicada.

Q (m ³ h ⁻¹)	Franco limoso-arcilloso		Franco limoso-arenoso		Franco arcilloso-arenoso	
	(%)		(%)		(%)	
	Lateral	Vertical	Lateral	Vertical	Lateral	Vertical
0.002	0.3	7.3	0.5	10.8	0.8	3.9
0.004	0.8	9.1	1.0	10.2	0.8	5.6
0.008			1.0	16.6		

medad inicial y residual (θ_v y θ_r), y el contenido de limo (L_i) que sí fueron consideradas debido a que las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos varían con la profundidad. Caso contrario con el avance lateral o radial del agua, donde el suelo presenta cierta homogeneidad y se asume que la filtración es en sentido vertical.

Por otra parte, el agua que aplican los emisores en el suelo se distribuye por lo general formando bulbos de humedecimiento de forma elipsoidal truncadas. Estos bulbos aumentan su extensión hasta que la capacidad del suelo de absorber agua, que es función de r y Z , se iguala con la velocidad de aporte de agua por el emisor. Al inicio, cuando el suelo está seco, la velocidad de penetración es más rápida, pero si se sigue aportando agua y a medida que los espacios porosos se llenan y las arcillas se expanden, llega un momento en que esta velocidad de penetración se estabiliza. En tal caso, si la velocidad de aporte de agua excede a la infiltrabilidad del suelo, el avance lateral o radial del agua en el bulbo aumenta. En la figura 2 se observan bulbos de formas elípticas, con elongaciones horizontales cuando se aplican volúmenes de agua o caudales bajos, incluso en el suelo franco arenoso. Pero si se incrementa el tiempo de aplicación del agua, es decir, el volumen de agua aplicada (V), el avance vertical se hace más pronunciado. Entonces los bulbos se elongan de manera vertical en las tres texturas de suelo, lo cual coincide con lo señalado por Cote, Bristow, Charlesworth, Cook y Thorburn (2003); Lazarovitch, Warrick, Furman y Simunek (2007), y Hao, Marui, Haraguchi, y Nakano (2007). Es decir, que conforme el tiempo de

aplicación del agua aumenta, el avance lateral se estabiliza y el vertical aumenta (Li, Zhang, & Li, 2003). Este incremento en el avance vertical se puede observar también en el cuadro 3, donde a un mismo volumen de agua aplicada para cada suelo, la variación en el avance lateral en el bulbo es alrededor de 1% y en el avance vertical varía de 4 a 17%. En este proceso de penetración y redistribución del agua en el suelo se obtiene un bulbo húmedo a partir de distintas combinaciones entre el avance lateral y vertical del agua. Por ello es importante señalar que el conocimiento de la forma y extensión de los bulbos de humedecimiento que se obtienen bajo un emisor permitirá determinar el número de emisores necesarios para mojar un determinado volumen de suelo.

Conclusiones

Las ecuaciones desarrolladas en este trabajo describen la distribución lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de suelos de textura franco-arenoso, franco-arcilloso o franco-limoso, con una confiabilidad de 90 y 94%, respectivamente.

La extensión del bulbo de humedecimiento que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en cualquiera de estos suelos depende, por orden de importancia, del volumen de agua aplicada, caudal del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo en el suelo.

Cuando se aplican volúmenes pequeños de agua, se obtienen bulbos de humedecimiento

con formas elípticas de elongación horizontal; pero si se incrementa el tiempo de aplicación del agua o el caudal del emisor, la elipse se elonga de manera vertical.

El conocimiento de la forma y extensiones del bulbo húmedo que se obtiene bajo un emisor permitirá determinar el número de emisores necesarios para mojar un determinado volumen de suelo.

Referencias

- Amin, M. S. M., & Ekhmaj, A. I. M. (2006). *DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator*. 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Cook, F. J., Fitch, P., Thorburn, P., Charlesworth, P. B., & Bristow, K. L. (2006). Modelling Trickle Irrigation: Comparison of Analytical and Numerical Models for Estimation of Wetting Front Position with Time. *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1353-1359.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of Soil Wetting and Solute Transport In Subsurface Trickle Irrigation. *Irrig. Sci.*, 22, 143-156.
- Dasberg, S., & Or, D. (1999). *Drip Irrigation* (162 pp.). New York: Springer-Verlag.
- Elmaloglou, S., & Diamantopoulos, E. (2009). Simulation of Soil Water Dynamics under Subsurface Drip Irrigation from Line Sources. *Agricultural Water Management*, 96, 1587-1595.
- Gil-Marín, J. A. (2001). Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. *Revista UDO Agrícola*, 1(1), 42-47.
- Hao, A., Marui, A., Haraguchi, T., & Nakano, Y. (2007). Estimation of Wet Bulb Formation in Various Soil during Drip Irrigation. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 52(1), 187-193.
- Kandelous, M. M. K., & Simunek, J. (2010). Comparison of Numerical, Analytical, and Empirical Models to Estimate Wetting Patterns for Surface and Subsurface Drip Irrigation. *Irrig. Sci.*, 28, 435-444.
- Kandelous, M. M., Liaghat, A., & Abbasi, F. (2008). Estimation of Soil Moisture Pattern in Subsurface Drip Irrigation Using Dimensional Analysis Method. *J. Agri. Sci.*, 39(2), 371-378.
- Lazarovitch, N., Warrick, A. W., Furman, A., & Simunek, J. (2007). Subsurface Water Distribution from Drip Irrigation Described by Moment Analyses. *Vadose Zone Journal*, 7(6), 116-123.
- Li, J., Zhang, J., & Li, R. (2003). Water and Nitrogen Distribution as Affected by Fertigation of Ammonium Nitrate from a Point Source. *Irrig. Sci.*, 22, 19-30.
- Maia, C. E., Luiz, S., Francimar, A. L., & Dantas, J. (2010). Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Revista Ciência Agronômica*, 41(1), 149-158.
- Mmolawa, K., & Or, D. (2000). Root Zone Solute Dynamics under Drip Irrigation: A Review. *Plant and Soil*, 222, 163-190.
- Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Nafchi, R. F., Mosavi, F., & Parvanak, K. (2011). Experimental Study of Shape and Volume of Wetted Soil in Trickle Irrigation Method. *African Journal of Agricultural Research*, 6(2), 458-466.
- Ramírez De Cartagena, B. F., & Sáinz-Sánchez, M. A. (1997). Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo. *Ingeniería del Agua*, 4(1), 57-70.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1985). Measurement of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship Using The "Guelph Permeameter". *Proc. National Water Well Association Conference on Characterization and Monitoring of the Vadose (Unsaturated) Zone*, Denver, Co., USA.
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E., Youngs, E. G., Amoozegar, A., Booltink, H. W. G., & Bouma, J. (2002). Saturated and Field-Saturated Water Flow Parameters (pp. 797-878). In *Methods of Soil Analysis*. Part 4-Physical Methods. Madison, USA: Soil Science Society of America.
- Ruiz-Canales, A., Plana, V., Ruiz-Sánchez, M. C., Franco, J. A., & Abrisqueta, J. M. (2005). Modelo de distribución temporal y espacial del balance de agua en el suelo para riego localizado en parcela. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 7, 263-268.
- Schaap, M. G., Leij, F.J., & Van Genuchten, M. Th. (2001). Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Schwartzman, M., & Zur, B. (1986). Emitter Spacing and Geometry Of Wetted Soil Volume. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 112(3), 242-253.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 304-310.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Am. J.*, 44, 892-898.
- Zur, B. (1996). Wetted Soil Volume as a Design Objective in Trickle Irrigation. *Irrig. Sci.*, 16, 101-105.

Dirección institucional de los autores

Dr. Fidencio Cruz-Bautista

Universidad de Sonora
Departamento de Agricultura y Ganadería
Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro
83000 Hermosillo, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (662) 2592 100 y 2592 200
fidencio.cruz@guayacan.uson.mx

Dr. Alejandro Zermeño-González

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Calz.
antonio Narro 1923, Buenavista
25084 Saltillo, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (884) 4172 474 y 4110 200
azermeno@uaaan.mx

Dr. Vicente Álvarez-Reyna
Dr. Pedro Cano-Ríos

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad
Laguna, Periférico Raúl López Sánchez s/n
Colonia Valle Verde, 27059 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7297 613, 7297 614 y 7297 610

vicpall@hotmail.com
canorp49@hotmail.com

M.C. Miguel Rivera-González

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en
Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera (CENID
RASPA-INIFAP)
Km. 6.5 margen derecha canal Sacramento
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 1590 104, 1590 105 y 1590 107
rivera.miguel@inifap.gob.mx

Dr. Mario Ángel Siller González Pico

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN)
Unidad Guadalajara
Av. Científica 1145. Colonia El Bajío
45019 Zapopan, Jalisco, MÉXICO
Teléfono: +52 (33) 3777 3600
mario_siller@gdl.cinvestav.mx