

# Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con 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 •  
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta,  
Atmosfera, México

• Mario Siller-González •  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional,  
México

## Abstract

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (enero-febrero, 2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(1), 45-55.

Se evaluó la capacidad de un modelo experimental para simular el avance del agua en el bulbo de humedecimiento. La finalidad fue verificar su confiabilidad para su uso en el diseño y operación de los sistemas de riego por goteo. Como referencia se emplearon los modelos de Schwartzman y Zur, Amin y Ekhmaj, Kandelous, Liaghat y Abbasi, y para la evaluación se realizaron mediciones de campo. La comparación estadística se hizo con los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RECM); donde  $R^2$  indica la correlación que existe entre los resultados modelados y las mediciones realizadas en campo y RECM muestra la capacidad de los modelos para simular el avance del agua en el bulbo de humedecimiento. Estos estadísticos de comparación indicaron que el modelo experimental simula el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento con una confiabilidad de 91 y 96%, con un error estándar de estimación de 2.7 y 3%. El  $R^2$  y la RECM también mostraron que la mejor aproximación entre los datos modelados y los observados en campo respecto al avance del agua en el bulbo húmedo se obtuvo con el modelo experimental para un suelo franco arcilloso a descargas de emisor de 2 y 4 litros por hora.

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

## Resumen

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (January-February, 2016). Validation of a Model to Estimate the Wet Bulb Dimensions in Drip Irrigation. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(1), 45-55.

The ability of an experimental model to simulate the advance of water in the wet bulb was evaluated. The aim was to verify its reliability for use in the design and operations of drip irrigation systems. Models used as a reference included Schwartzman and Zur, Amin and Ekhmaj, Kandelous and Liaghat and Abbasi. Field measurements were taken for evaluation purposes. A statistical comparison was performed with coefficients of determination ( $R^2$ ) and the root mean square error (RMSE).  $R^2$  indicates the correlation between the modeled results and the field measurements, and the RMSE shows the capacity of the models to simulate the advance of water in the wet bulb. These statistical comparisons indicate that the experimental model simulates the lateral and vertical advance of water in the wet bulb with a reliability of 91 and 96%, with an estimated standard error of 2.7 and 3%, respectively. The  $R^2$  and the RMSE also showed that the experimental model that used clay loam soil with emitter flows of 2 and 4 liters per hour resulted in the modeled data and the field observations having the most similar values in terms of the advance of the wet bulb.

**Keywords:** Simulation, mathematical model, wetted soil volume, drip irrigation, wetting-pattern.

---

Recibido: 18/07/2012  
Aceptado: 11/09/2015

---

## Introducción

El patrón de distribución del agua en el suelo es una característica que influye de manera significativa en el diseño y operación de los sistemas de riego localizado, pues su extensión, profundidad y diámetro deben coincidir con el sistema radicular de la planta y espaciamiento entre emisores y líneas regantes. La distribución del agua bajo el emisor se puede obtener por tres medios: a) medición directa del volumen de suelo mojado en campo; b) uso de sensores para medir los cambios del contenido de agua en el suelo, y c) uso de modelos para simular el movimiento del agua en el suelo (Gil-Marín, 2001; Arbat, Barragán, Puig, Poch, & Ramírez-de-Cartagena, 2003; Ainechee, Baroomand-Nasab, & Behzad, 2009). En este contexto se han hecho varios estudios para determinar el patrón de humedecimiento del agua en el suelo, a través del uso de modelos empíricos, analíticos y numéricos, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards (Dasberg & Or, 1999; Cook, Fitch, Thorburn, Charlesworth, & Bristow, 2006; Kandelous & Simunek, 2010). No obstante que la mayoría de estos modelos incorporan variables como gasto del emisor, volumen de agua aplicada y propiedades hidráulicas del suelo para sus predicciones, muchos de ellos no están validados o probados en condiciones de campo (Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi, Mosavi, & Parvanak, 2011); además que no existen modelos que consideren las propiedades físicas e hidráulicas diferenciadas para los distintos estratos del perfil del suelo. Asimismo, la mayoría de los modelos analíticos y numéricos 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 (Ramírez-de-Cartagena & Sáinz-Sánchez, 1997). Por otro lado, los modelos empíricos se han desarrollado de forma típica a través de análisis de regresión de las observaciones o datos de campo (Ramírez-de-Cartagena & Sáinz-Sánchez, 1997; Kandelous & Simunek, 2010). En este sentido, Schwartzman

y Zur (1986) desarrollaron un modelo empírico derivado de observaciones experimentales y análisis dimensional para estimar el avance vertical y horizontal del frente de humedecimiento. Amin y Ekhmaj (2006) evaluaron el modelo de Schwartzman y Zur (1986) con datos experimentales e incluyeron el contenido de agua del suelo a saturación como un parámetro más de predicción. Posteriormente, Ainechee, Baroomand-Nasab y Behzad (2009), y Nafchi, Mosavi y Parvanak (2011) también analizaron este modelo en laboratorio con tres tipos de suelo y reportan que se alcanzan buenos ajustes entre los valores simulados y observados. Sin embargo, aún no se validan de manera plena estas ecuaciones en condiciones de campo y bajo diferentes características de suelo. Por lo anterior, el objetivo en este trabajo fue evaluar la capacidad de un modelo experimental propuesto para simular el avance del agua en el bulbo de humedecimiento. Para ello se realizó la comparación cuantitativa entre las mediciones realizadas en campo y los resultados obtenidos con el modelo experimental, y los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), y Kandelous, Liaghat y Abbasi (2008), con la finalidad de verificar la confiabilidad del modelo para su uso en el diseño y operación de los sistemas de riego por goteo.

## Materiales y métodos

### Modelos de comparación

#### Modelo experimental

Se derivaron las ecuaciones (1) y (2) que relacionan las variables explicativas respecto al avance del agua en los bulbos de humedecimiento. La relación no lineal obtenida entre estas variables se expresa como:

$$r = 0.14 V^{0.353} K_s^{-0.110} \theta_v^{-0.387} \quad (1)$$

$$Z = 7.906 V^{0.458} Q^{-0.152} \theta_v^{0.386} \theta_r^{0.349} L_i^{-0.421} \quad (2)$$

donde  $r$  = avance lateral (m);  $Z$  = avance vertical (m);  $Q$  = gasto del emisor ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $V$  = volumen

de agua aplicada ( $m^3$ );  $K_s$  = conductividad hidráulica saturada ( $m\ s^{-1}$ );  $\theta_v$  = contenido de humedad inicial del suelo ( $m^3\ m^{-3}$ );  $\theta_r$  = contenido de humedad residual del suelo ( $m^3\ m^{-3}$ );  $L_i$  = contenido de limo (%).

Estas ecuaciones están fundamentadas en un estudio de patrones de distribución del agua en el bulbo de humedecimiento de tres texturas de suelo, en una selección de variables con el método Stepwise y en las aproximaciones introducidas por Schwartzman y Zur (1986), y Amin y Ekhmaj (2006).

El estudio del patrón de distribución del agua en el bulbo de humedecimiento se realizó en tres texturas de suelo: franco limoso, franco arcilloso y franco arenoso, que se localizan en la región lagunera de Coahuila, México.

Se llevaron a cabo tres pruebas de humedecimiento en cada textura y se evaluó el patrón de humedecimiento de los bulbos que se forman bajo los emisores. Las pruebas consistieron en la aplicación de volúmenes diferenciados de agua en el suelo con un equipo de riego por goteo superficial. La primera prueba se hizo 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 efectuaron bajo el mismo procedimiento, usando emisores de caudal nominal de 4 y 8 lph.

Las variables de las ecuaciones (1) y (2) 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 los bulbos. Estas variables presentaron un coeficiente de correlación de 0.90 para ( $r$ ) y de 0.94 para ( $Z$ ).

#### Modelo de Schwartzman y Zur (1986)

Schwartzman y Zur (1986) desarrollaron un modelo empírico derivado de observaciones experimentales y análisis dimensional para estimar el patrón de humedecimiento del suelo a partir de un emisor superficial. Asumieron que la geometría de zona humedecida, la anchura y profundidad al final del riego dependen del tipo

de suelo, representado por la conductividad hidráulica a saturación, descarga del emisor y volumen total de agua aplicada. El modelo fue desarrollado con resultados obtenidos en un suelo limoso y un franco arenoso, con conductividad hidráulica saturada de  $2.49 \times 10^{-6}$  y  $2.49 \times 10^{-5}\ m\ s^{-1}$ , y con descargas de emisor de 4.3 y 20 lph. El modelo simplificado de Schwartzman y Zur (1986) para determinar la geometría del volumen mojado del suelo es:

$$w = 1.82(V)^{0.22} \left(\frac{K_s}{Q}\right)^{-0.17} \quad (3)$$

$$z = 2.54(V)^{0.63} \left(\frac{K_s}{Q}\right)^{0.45} \quad (4)$$

donde  $w$  y  $z$  son las dimensiones horizontal y vertical del bulbo de humedecimiento en el perfil del suelo (m);  $V$ , el volumen total de agua aplicada ( $m^3$ );  $K_s$ , la conductividad hidráulica a saturación ( $m\ s^{-1}$ ), y  $Q$  es el gasto de descarga del emisor ( $m^3\ s^{-1}$ ).

#### Modelo de Amin y Ekhmaj (2006)

Amin y Ekhmaj (2006) desarrollaron las ecuaciones (5) y (6) para estimar el avance horizontal y vertical del frente de humedecimiento en el suelo a través de un análisis de regresión no lineal. Los datos experimentales provienen de cuatro tipos de suelo donde se aplicó agua con emisores superficiales con gastos de descarga de 2 a 8 lph:

$$R = 0.2476 \Delta\theta^{-0.562} V^{0.268} Q^{-0.0028} K_s^{-0.034} \quad (5)$$

$$Z = 2.0336 \Delta\theta^{-0.383} V^{0.365} Q^{-0.101} K_s^{0.195} \quad (6)$$

donde  $R$  y  $Z$  son las dimensiones horizontal y vertical del patrón de humedecimiento (m);  $\Delta\theta$ , el contenido volumétrico promedio de agua detrás del frente de humedecimiento ( $\Delta\theta = \theta_s/2$ , donde  $\theta_s$  es el contenido de humedad a satu-

ración);  $V$ , el volumen total de agua aplicada ( $\text{m}^3$ );  $Q$ , el gasto de descarga del emisor ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), y  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $\text{m s}^{-1}$ ).

*Modelo de Kandelous Liaghat y Abbasi (2008)*

Mediante el método de análisis dimensional, Kandelous, Liaghat y Abbasi (2008) desarrollaron las ecuaciones (7) y (8) para estimar los avances horizontal y vertical del frente de humedecimiento en el suelo con un emisor subsuperficial. Estas ecuaciones se derivaron de datos experimentales obtenidos en un suelo arcilloso, con riego por goteo subsuperficial, con una descarga del emisor de 1 lph:

$$w = 4.244(V)^{0.526} \left( \frac{K_s}{Qz} \right)^{0.026} \quad (7)$$

$$Z = 0.66(V)^{0.333} \left( \frac{K_s}{Qz} \right)^{-0.167} \quad (8)$$

donde  $w$  y  $Z$  son las dimensiones horizontales y verticales del patrón de humedecimiento (m);  $V$ , el volumen de agua aplicado que se infiltra en el suelo ( $\text{m}^3$ );  $K_s$ , la conductividad hidráulica saturada ( $\text{m s}^{-1}$ );  $Q$ , el gasto descarga del emisor ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), y  $z$  es la profundidad de instalación del emisor (m).

#### *Análisis estadístico*

Se evaluaron las capacidades predictivas del modelo experimental y los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), Kandelous, Liaghat y Abbasi (2008) con respecto a las mediciones realizadas en campo. Se establecieron los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) para cada modelo acorde con la metodología reportada por Siyal y Skaggs (2009), Nafchi et al., (2011) y Kandelous, Simunek, Van Genuchten y Malek (2011), donde:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$\text{RECM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (10)$$

donde  $P_i$  son datos simulados;  $O_i$  datos observados en campo;  $\bar{O}$ , la media de los datos observados, y  $n$  es el número de datos.

#### *Pruebas de campo*

##### *Parámetros físicos e hidráulicos del suelo*

Con el método del hidrómetro de Bouyoucos se determinó la proporción de arena, limo y arcilla de los tres tipos de suelos donde se realizaron las pruebas de humedecimiento de los bulbos y la clasificación textural se hizo con el triángulo de texturas. También se determinó el contenido de humedad de los suelos con 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 cargas de 5 y 10 cm de acuerdo con el procedimiento descrito por Reynolds y Elrick (1985), y Reynolds et al. (2002). De manera paralela se modelaron los parámetros de la curva de retención de agua y conductividad hidráulica saturada de las tres texturas de suelo con el programa *Rosetta*, versión: 1.2 (Schaap, Leij, & Van Genuchten, 2001). Este programa usa las relaciones constitutivas de Van Genuchten (1980) y Mualem (1976) en sus estimaciones (Skaggs, Trout, Simunek, & Shouse, 2004; Kandelous & Simunek, 2010) (cuadro 2).

##### *Patrón de humedecimiento en el bulbo*

Se llevaron a cabo tres pruebas de humedecimiento en cada textura de suelo para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos

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

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

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)	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$K_s$ cm h <sup>-1</sup>	$\alpha$ cm <sup>-1</sup>	$n$	$L$
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

$\theta_r$  y  $\theta_s$  representan el contenido de agua a saturación y residual;  $k_s$ , la conductividad hidráulica saturada;  $\alpha$ , 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.

que se forman bajo los emisores. Las pruebas consistieron en la aplicación de volúmenes diferenciados de agua en el suelo con un equipo de riego por goteo superficial. El equipo de riego se construyó con un contenedor para agua, cabezal de riego y línea regante. La primera prueba se hizo con emisores de caudal nominal de 2 litros por hora (lph), con tiempo de aplicación del 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.

El patrón de humedecimiento, avance lateral y vertical del agua en el suelo se obtuvo por medición directa del frente de humedecimiento inmediatamente después de que finalizó el riego de acuerdo con el siguiente procedimiento:



- Finalizado el riego a los tiempos de aplicación antes señalado, se midió el área humedecida de suelo bajo cada emisor.
- Se excavó  $\frac{1}{4}$  de círculo del área de suelo humedecido hasta encontrar el frente de humedecimiento 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.

## Resultados

Los cuadros (3) y (4) muestran los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el error estándar de estimación de la capacidad predictiva de los modelos en relación con las mediciones hechas en campo para el avance del agua en los bulbos de humedecimiento. La figura 2 muestra la longitud de avance del agua en los bulbos con

los datos modelados y las mediciones en campo con respecto al volumen de agua aplicada ( $m^3 h^{-1}$ ) en cada textura de suelo.

## Discusión

Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) muestran que el modelo experimental propuesto simula el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento con una confiabilidad de 91 y 96%, con un error estándar de estimación de 2.7 y 3%. Es decir, que existe un margen de error del orden de 3 y 4 cm entre los datos modelados y las mediciones en campo para las tres texturas de suelo (cuadros 3 y 4). De acuerdo con estos índices, el modelo experimental genera las mejores predicciones para el avance del agua tanto lateral como vertical en un suelo franco arcilloso a descargas de emisor de 2 y 4 lph (cuadro 3). Y cuando se usa una descarga de emisor de 8 plh se observa que la mejor predicción se obtiene

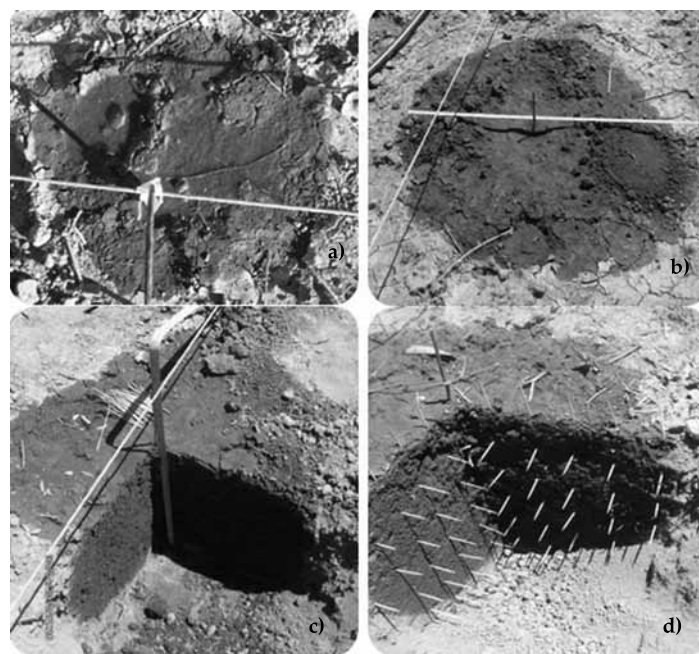


Figura 1. Forma y extensión del bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor: a) aplicación de agua por el emisor; b) superficie de suelo humedecido; c) perfil del suelo humedecido; d) extensión de suelo humedecido (cuadrícula en  $x, y, z$ , con separación de 5 cm) centrado en el punto fuente.

Cuadro 3. Coeficientes de determinación en relación con la longitud de avance del agua en el bulbo de humedecimiento en función de la descarga del emisor y textura del suelo.

Descarga emisor (lph)	Suelo	Modelo	Índices			
			R <sup>2</sup>		RECM (m)	
			Av. lateral	Av. vertical	Av. lateral	Av. vertical
2	Franco limoso	Modelo experimental	0.87	0.93	0.022	0.024
		Schwartzman & Zur (1986)	0.87	0.94	0.025	0.118
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.87	0.97	0.022	0.016
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.85	0.96	0.055	0.150
	Franco arcilloso	Modelo experimental	0.93	0.95	0.020	0.020
		Schwartzman & Zur (1986)	0.93	0.93	0.053	0.093
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.94	0.94	0.039	0.045
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.94	0.94	0.075	0.182
	Franco arenoso	Modelo experimental	0.90	0.91	0.039	0.041
		Schwartzman & Zur (1986)	0.89	0.80	0.112	0.258
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.82	0.87	0.044	0.046
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.72	0.94	0.118	0.233
4	Franco limoso	Modelo experimental	0.88	0.95	0.024	0.026
		Schwartzman & Zur (1986)	0.84	0.72	0.043	0.064
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.86	0.78	0.025	0.040
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.88	0.95	0.049	0.149
	Franco arcilloso	Modelo experimental	0.98	0.93	0.024	0.033
		Schwartzman & Zur (1986)	0.90	0.30	0.074	0.187
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.97	0.75	0.052	0.122
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.98	0.85	0.098	0.207
	Franco arenoso	Modelo experimental	0.79	0.99	0.031	0.039
		Schwartzman & Zur (1986)	0.92	0.97	0.125	0.055
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.94	0.99	0.032	0.056
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.92	0.93	0.098	0.221
8	Franco limoso	Modelo experimental	0.93	0.98	0.041	0.041
		Schwartzman & Zur (1986)	0.94	0.80	0.044	0.079
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.94	0.83	0.053	0.112
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.93	0.97	0.046	0.210
	Franco arenoso	Modelo experimental	0.93	0.99	0.029	0.059
		Schwartzman & Zur (1986)	0.90	0.98	0.078	0.178
		Amin & Ekhmaj (2006)	0.92	0.99	0.027	0.085
		Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.96	0.98	0.049	0.380

Cuadro 4. Coeficiente de determinación y error de estimación de los modelos para el avance del agua en el bulbo de humedecimiento.

Modelo	Coeficiente múltiple de determinación (R <sup>2</sup> )		Error estándar de estimación (%)	
	Av. lateral	Av. vertical	Av. lateral	Av. vertical
Modelo experimental	0.91	0.96	2.7	3.0
Amin & Ekhmaj (2006)	0.86	0.82	2.9	4.6
Kandelous <i>et al.</i> (2008)	0.85	0.66	2.8	4.3
Schwartzman & Zur (1986)	0.70	0.66	4.4	13.9

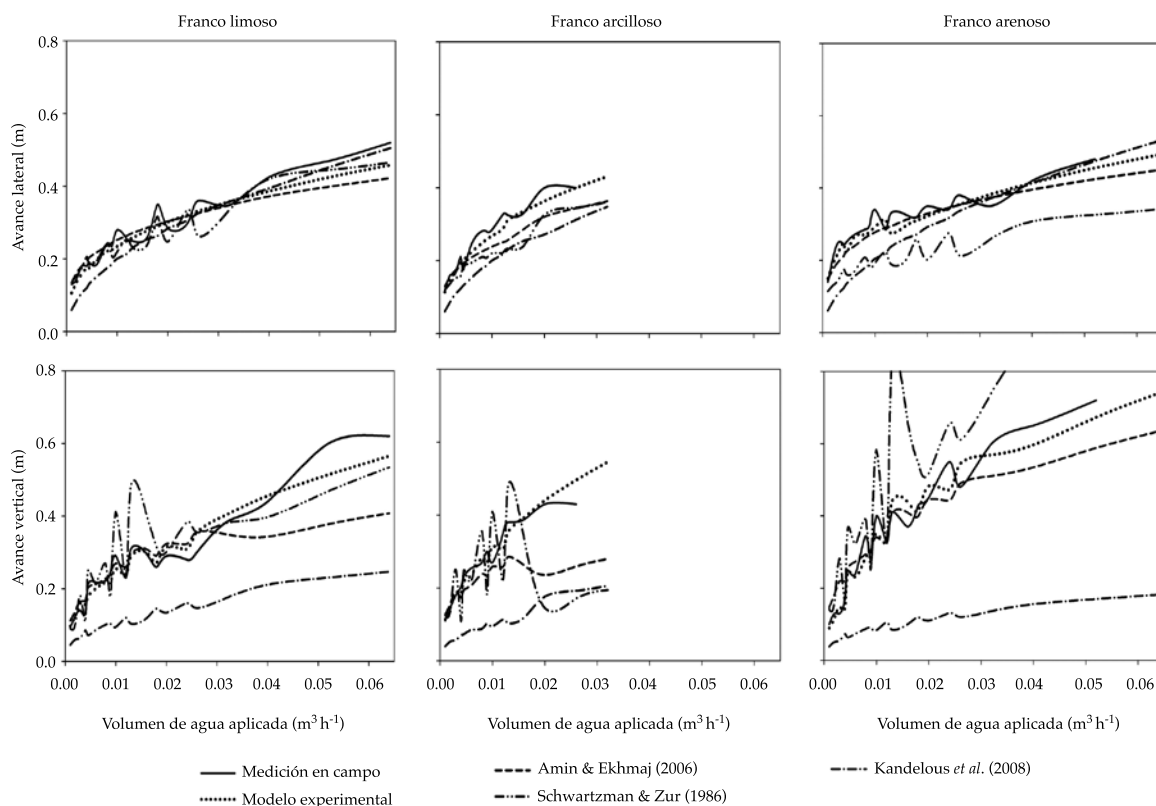


Figura 2. Simulación del avance del agua en el bulbo de humedecimiento en función del volumen aplicado.

en un suelo franco arenoso, seguido de un suelo franco arcilloso.

La bondad del modelo experimental para hacer mejores predicciones en el avance del agua en el bulbo de humedecimiento se debe a que incluye el contenido de humedad inicial y residual del suelo ( $\theta_v$  y  $\theta_r$ ), como lo proponen Kandelous y Simunek (2010), y Nafchi *et al.* (2011). También incorpora el contenido de limo ( $L_s$ ) como otra de las variables que influyen en el avance del agua en el bulbo húmedo, además de las propuestas en los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous *et al.* (2008). Estas propiedades físicas e hidráulicas del perfil de los suelos se consideraron de manera diferenciada en la simulación, en concordancia con lo que sugieren Ramírez-de-Cartagena y Sáinz-Sánchez (1997).

El  $R^2$  y la RECM también muestran que la mejor aproximación entre los datos modelados y observados en campo respecto al avance del agua en el bulbo húmedo se obtiene en un suelo franco arcilloso a descargas de emisor de 2 lph para los cuatro modelos en el orden que se observa en el cuadro 4. No obstante que los modelos de Amin y Ekhmaj (2006), Kandelous *et al.*, (2008) y Schwartzman y Zur (1986) fueron desarrollados en suelo limoso, arcilloso y franco arenoso, con descargas de emisor de 1, 2, 4.3, 8 y 20 lph, presentan buena aproximación para esta textura de suelo y la descarga de emisor señalado.

Se observa que los modelos generan la mejor aproximación para el avance lateral o radial del agua en el bulbo de humedecimiento en un suelo franco arcilloso con descargas de emisor



de 2 y 4 lph. En el caso del avance vertical, la mejor aproximación se obtiene en suelos franco arenoso, con descarga de emisor de 8 lph. Pero es necesario considerar de manera diferenciada las propiedades físicas e hidráulicas del perfil de los suelos, como lo señalan Ramírez-de-Cartagena y Sáinz, (1997), teniendo en cuenta el 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, como lo sugieren Amin y Ekhmaj, (2006), Kandelous y Simunek (2010), y Nafchi *et al.* (2011).

Una de las variables que más contribuye al movimiento del agua en los bulbos húmedos es el volumen de agua aplicada ( $V$ ), como se observa en la figura 2. En este sentido, el modelo experimental simula la extensión de avance del agua con un alto grado de aproximación. En cambio, los modelos de Amin y Ekhmaj (2006), Kandelous *et al.* (2008), y Schwartzman y Zur (1986) tienden a subestimar o sobrestimar los avances con respecto a las mediciones realizadas en campo, particularmente en el sentido vertical. La capacidad del modelo experimental para hacer una mejor aproximación del avance del agua en el bulbo de humedecimiento para cualquier volumen de agua aplicada respecto a los otros modelos se debe a que considera el contenido de humedad inicial y residual del suelo a estratos diferenciados, como se ha señalado.

En términos generales, se observa que el avance lateral o radial del agua en el bulbo de humedecimiento tiene una mejor aproximación con los cuatro modelos, en el orden que se observa en el cuadro 4. Debido a que las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos presentan cierta homogeneidad por horizontes, en sentido vertical estas características varían con la profundidad, además de que la filtración es en sentido vertical. Por eso cuando el emisor aplica el agua en el suelo, los bulbos aumentan su extensión hasta que su capacidad de absorber agua se iguala con la velocidad de aporte. Al inicio, la velocidad de avance en sentido vertical es más rápido, porque el suelo está seco. 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. Entonces el avance lateral o radial del agua en el bulbo aumenta. Sin embargo, si se sigue incrementando el tiempo de aplicación del agua, es decir el volumen de agua aplicada, el avance vertical se incrementa de nuevo.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo el modelo experimental propuesto es una opción viable para su uso en la modelación del avance del agua en el bulbo de humedecimiento en los sistemas de riego por goteo; en particular en el diseño y toma de decisiones de la separación entre los emisores y las líneas regantes, pues los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) muestran que el modelo simula el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, con una confiabilidad de 91 y 96%, con un error estándar de estimación de 2.7 y 3%.

El modelo se podrá utilizar también para determinar el volumen de agua a aplicar, es decir el tiempo de riego para las diferentes texturas de suelo en donde se emplean los sistemas de riego localizado en función de los gastos de descarga de los emisores.

No obstante que el modelo presenta buena aproximación en la modelación del avance del agua en el bulbo de humedecimiento para los suelos estudiados, en particular para un suelo franco arcilloso a descargas de emisor de 2 y 4 lph, sería pertinente realizar su plena validación en otras texturas de suelo, con descargas de emisor diferentes a los usados en este estudio.

## Referencias

- Ainechee, G., Baroomand-Nasab, S., & Behzad, M. (2009). Simulation of Soil Wetting Pattern under Point Source Trickle Irrigation. *Journal of Applied Sciences*, 9(6), 1170-1174.
- Amin, M. S. M., & Ekhmaj, A. I. M. (2006). *DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator*. 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept., Pwrc, Kuala Lumpur, Malaysia.

- Arbat, G., Barragán, J., Puig, J., Poch, R., & Ramírez-de-Cartagena, B. F. (2003). Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo Hydrus-2D y SIMDAS en riego localizado. En J. Álvarez-Benedí / P. Marinero. Estudios de la zona no saturada del suelo. *Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada de Suelo*, 6, 279-288.
- 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.
- Dasberg, S., & Or, D. (1999). *Drip irrigation* (162 pp). New York: Springer-Verlag.
- 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.
- 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.
- Kandelous, M. M., Simunek, J., Van Genuchten, M. Th., & Malek, K. (2011). Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75(2), 488-497.
- Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resour. Res.*, 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.
- 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.
- Siyal, A. A., & Skaggs, T. H. (2009). Measured and Simulated Soil Wetting Patterns under Porous Clay Pipe Sub-Surface Irrigation. *Agricultural Water Management*, 96, 893-904.
- 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.

## 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  
Teléfonos: +52 (662) 259 2100 y 259 2200  
fidencio.cruz@guayacan.uson.mx

Dr. Alejandro Zermeño-González

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro  
Calz. Antonio Narro 1923  
Buenavista, 25084, Saltillo, Coahuila, MÉXICO  
Teléfonos: +52 (844) 417 2474 y 411 0200  
azermeno@uaaan.mx

Dr. Vicente Álvarez-Reyna

Dr. Pedro Cano-Ríos

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna  
Periférico Raúl López Sánchez s/n  
Col. Valle Verde  
27059 Torreón, Coahuila, MÉXICO  
Teléfonos: +52 (871) 729 7613, 729 7614 y 729 7610  
Fax: +52 (871) 733 3490  
vicpaal@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  
Teléfonos: +52 (871) 159 0104, 05 0 07  
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, Col. El Bajío  
45019 Zapopan, Jalisco, MÉXICO  
Teléfono: +52 (33) 3777 3600  
mario\_siller@gdl.cinvestav.mx