



**Sexto**  
**Congreso Nacional de**  
**Riego, Drenaje y Biosistemas**  
COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora



**Artículo: COMEII-21041**

*Hermosillo, Son., del 9 al 11 de junio de 2021*

## **MODELO EXPERIMENTAL PARA ESTIMAR LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO DEL SUELO, BAJO UN EMISOR**

**Arquímedes Santiago-Lopez<sup>1</sup>, Fidencio Cruz-Bautista<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Postgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Km. 36.5, Montecillo, CP. 56230, Texcoco, México.

<sup>2</sup>Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora. Luis Encinas y Rosales, 83100, Hermosillo, México. fidencio.cruz@unison.mx (\*Autor de correspondencia).

### **Resumen**

La geometría del suelo mojado, volumen de mojado bajo del emisor, es fundamental en el diseño y manejo del riego localizado. De estos parámetros depende el número y colocación de los emisores para suministrar el agua necesaria a las plantas. A su vez trasciende en el costo y la eficiencia de un sistema de riego. Por lo cual el objetivo en esta investigación fue desarrollar un modelo experimental para describir el frente de humedecimiento en bulbos de humedad en dos texturas de suelo, arcilloso y franco arenoso, bajo un emisor. Se propone un modelo, derivado del avance horizontal y vertical del frente de humedecimiento y las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos referidos. Se usó el método Stepwise para seleccionar las variables consideradas en el modelo. Los resultados muestran que el avance lateral y vertical del agua en el bulbo húmedo está influenciado por el tiempo de riego, gasto del emisor, contenido de arena y arcilla en el suelo, con una confiabilidad de 93.7 y 96.4 % respectivamente. Por lo cual estas ecuaciones podrían usarse para estimar la geometría de humedecimiento de un suelo con estas características, bajo un sistema de riego por goteo. Lo que permitirá determinar el número de emisores necesarios para humedecer el volumen de suelo determinado y su espaciamiento correcto.

**Palabras clave:** riego localizado, geometría de humedecimiento, goteo, método Stepwise, modelo experimental.



## Introducción

El agua dulce es de vital importancia y se estima que los países en desarrollo aumentarán su demanda a más del 14% en los próximos nueve años. Esto, aunado a la gran cantidad de agua utilizada en la agricultura, que supera el 90% del agua dulce total del planeta. Donde, los cultivos continúan siendo el principal usuario del agua, con variaciones dependiendo de la tecnología de riego (Grafton, 2018). En este sentido, uno de los métodos más eficientes es el riego localizado, conformado por una red de tuberías y emisores que aplican el agua en pequeñas cantidades y en áreas específicas del suelo.

Muchos de los problemas que presentan en la gestión del riego se deben a un mal diseño y/o mal manejo del agua de riego. La baja eficiencia y el costo, en ocasiones, es más elevado por el desconocimiento de la geometría húmeda bajo un emisor, pues la mayoría de las veces no se considera el bulbo de humedad cuando se diseña un sistema de riego localizado. Normalmente se asume que el diámetro de mojado es igual al marco de plantación (Ainechee *et al.*, 2009), dado que se desconoce o no se tiene claridad de los patrones de mojado en las diferentes texturas de suelo.

Para realizar un diseño eficiente del riego bajo la metodología del riego localizado (goteo) es necesario conocer la forma y el volumen del suelo que se obtiene cuando los emisores aplican agua, pue de acuerdo con Gil-Marín, (2001); Cervantes *et al.*, (2012); Naglič *et al.*, (2014); Arragan y Chipana, (2015) y Cruz-Bautista *et al.*, (2015), depende primordialmente del tipo de cultivo, propiedades y características físicas del suelo, tiempo de riego y caudal del emisor.

Sin embargo, la forma y el volumen húmedo del suelo se puede conocer mediante la medición *in situ*, uso de tablas o estimarse mediante modelos de simulación (Gil-Marín, 2001; Cruz-Bautista *et al.*, 2015).

Por tal razón el objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo experimental para describir la geometría del bulbo húmedo del suelo, bajo un emisor. Lo que permitirá estimar el espaciamiento apropiado para ubicar los emisores y aplicar de forma adecuada el agua en la zona radicular de las plantas.

## Materiales y Métodos

Este estudio se realizó en suelo arcilloso y franco arenoso, localizados ambos en el campo experimental del Colegio de Postgraduados en Montecillo Texcoco, México.

Se instaló un cabezal de riego para realizar los ensayos de humedecimiento de suelo. La línea regante consistió de manguera de polietileno de 16 mm de diámetro, sobre la cual se instalaron tramos de tubín y emisores con gastos 2, 4 y 8 l/h, con una separación de 2 m entre cada emisor. Los emisores operaron con una presión de 0.17 kg/cm<sup>2</sup> Las pruebas se realizaron con un tiempo de operación del riego de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1,  $1\frac{1}{2}$ ,  $2\frac{3}{4}$ ,  $3\frac{1}{2}$ , 5 y  $7\frac{1}{2}$  horas, con tres repeticiones en cada tipo de suelo y con los gastos ya mencionados.



El tamaño de partículas del suelo se determinó con el método del hidrómetro de Bouyoucos y la clasificación textural (Tabla 1) se hizo con el triángulo de texturas (USDA). También se determinó materia orgánica con el método de Walkley y Black. Asimismo, se determinó el contenido de humedad de los suelos mediante el método gravimétrico, a las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm antes de cada prueba. También se determinó densidad aparente. Posteriormente con el programa ROSETTA versión (1.2) se determinó el contenido de humedad a saturación y residual y se estimó la conductividad hidráulica saturada (Tabla 2). Pues estos parámetros son difíciles de estimar o determinar en campo.

**Tabla 1.** Propiedades físicas, contenido de humedad y materia orgánica (M.O) y densidad aparente (D.A) del suelo donde se realizaron pruebas de humedecimiento de bulbo.

Textura del suelo	Profundidad (cm)	Arcilla Limo Arena			M. O.	D.A. (g/cm)	Humedad Inicial (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
		%					
Franco arenoso	0-20	13.5	20.3	66.2	0.30	1.16	0.13
	20-40	15.2	21.3	63.5	0.30	1.15	0.11
	40-60	19.0	20.0	61.0	0.28	1.30	0.14
Arcilloso	0-20	45.6	34.4	20.0	0.57	1.05	0.11
	20-40	45.4	34.6	20.0	0.57	0.99	0.22
	40-60	43.9	33.8	22.3	0.55	1.19	0.07

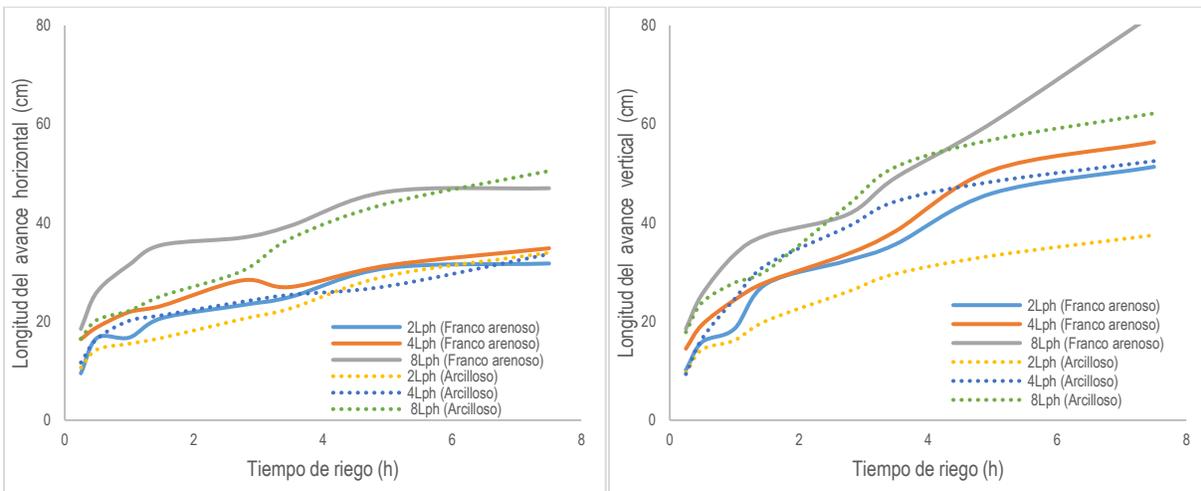
**Tabla 2.** Contenidos de agua a saturación ( $\Theta_s$ ) y residual ( $\theta_r$ ), conductividad hidráulica saturada ( $k_s$  y  $K_0$ ) del suelo y el parámetro **N** que influyen en la función de retención de agua, estimados con el programa de ROSETTA versión 1.2 (Schaap *et al.*, 2001).

Textura del suelo	Profundidad Cm	$\theta_r$	$\Theta_s$	N	$k_s$	$(K_0)$
Franco arenoso	0-20	0.040	0.481	1.388	9.401	2.991
	20-40	0.041	0.484	1.391	8.612	3.026
	40-60	0.045	0.441	1.392	5.386	3.026
Arcilloso	0-20	0.095	0.561	1.268	2.606	0.338
	20-40	0.094	0.574	1.272	3.171	0.363
	40-60	0.090	0.518	1.265	1.412	0.253

La geometría del humedecimiento del bulbo en el suelo en campo se obtuvo por medición directa del frente de humedecimiento (avance lateral y vertical). Finalizado el riego de 1/4, 1/2, 1, 1 1/2, 2 3/4, 3 1/2, 5 y 7 1/2 horas, inmediatamente se excavó 1/4 de círculo del área de suelo humedecido. Después se midió el frente de humedecimiento en las direcciones horizontal (X y Y) y vertical (Z) (Figura 1). El avance horizontal y vertical del agua en los suelos con respecto al tiempo de riego y al gasto del emisor se muestran en la figura 2.



**Figura 1.** Esquema de la obtención del avance horizontal y vertical del agua y la geometría del bulbo húmedo bajo un emisor, después de un tiempo de riego dado.



**Figura 2.** Avance horizontal y vertical del agua en los suelos con respecto al tiempo de riego, al gasto del emisor y propiedades físico-hidráulicas.

Con fundamento en las aproximaciones introducidas por Shwartzman y Zur (1986) y Malek y Peters (2011), y en el método Stepwise para selección de variables, se proponen las siguientes relaciones no lineal entre las variables explicativas respecto al avance horizontal y vertical del agua en los bulbos de humedecimiento:

$$R = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots \dots X_n^{\beta_n} \quad (1)$$

$$Z = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots \dots X_n^{\beta_n} \quad (2)$$



donde  $R$  es el avance lateral (cm);  $Z$  es el avance vertical (cm);  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son las todas las variables consideradas;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_n$  son los coeficientes de regresión para las variables consideradas.

En la selección de variables que influyen en la longitud de avance horizontal y vertical del bulbo húmedo del suelo, medidos en campo, se consideraron todos los parámetros físicos e hidráulicos como arcilla, limo, arena, MO,  $D_a$ ,  $\theta_i$  (humedad inicial),  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $N$ ,  $k_s$  y  $K_o$ , del suelo reportados en las tablas 1 y 2; además del tiempo de riego ( $T$ ) y gasto del emisor ( $Q$ ). Se linealizaron los datos referidos, mediante transformación logarítmica, para un mejor ajuste de acuerdo a lo recomendado por Amin y Ekhmaj (2006). Posteriormente se realizó la selección de variables significativas con el método Stepwise como lo sugiere Cruz-Bautista *et al.*, (2015), usando el software estadístico SAS 9.4.

## Resultados y Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, las ecuaciones que describen el avance del agua en el bulbo húmedo de suelo se expresan como:

$$R = 186.616 T^{0.293} Q^{0.329} C_i^{-0.116} \quad (3)$$

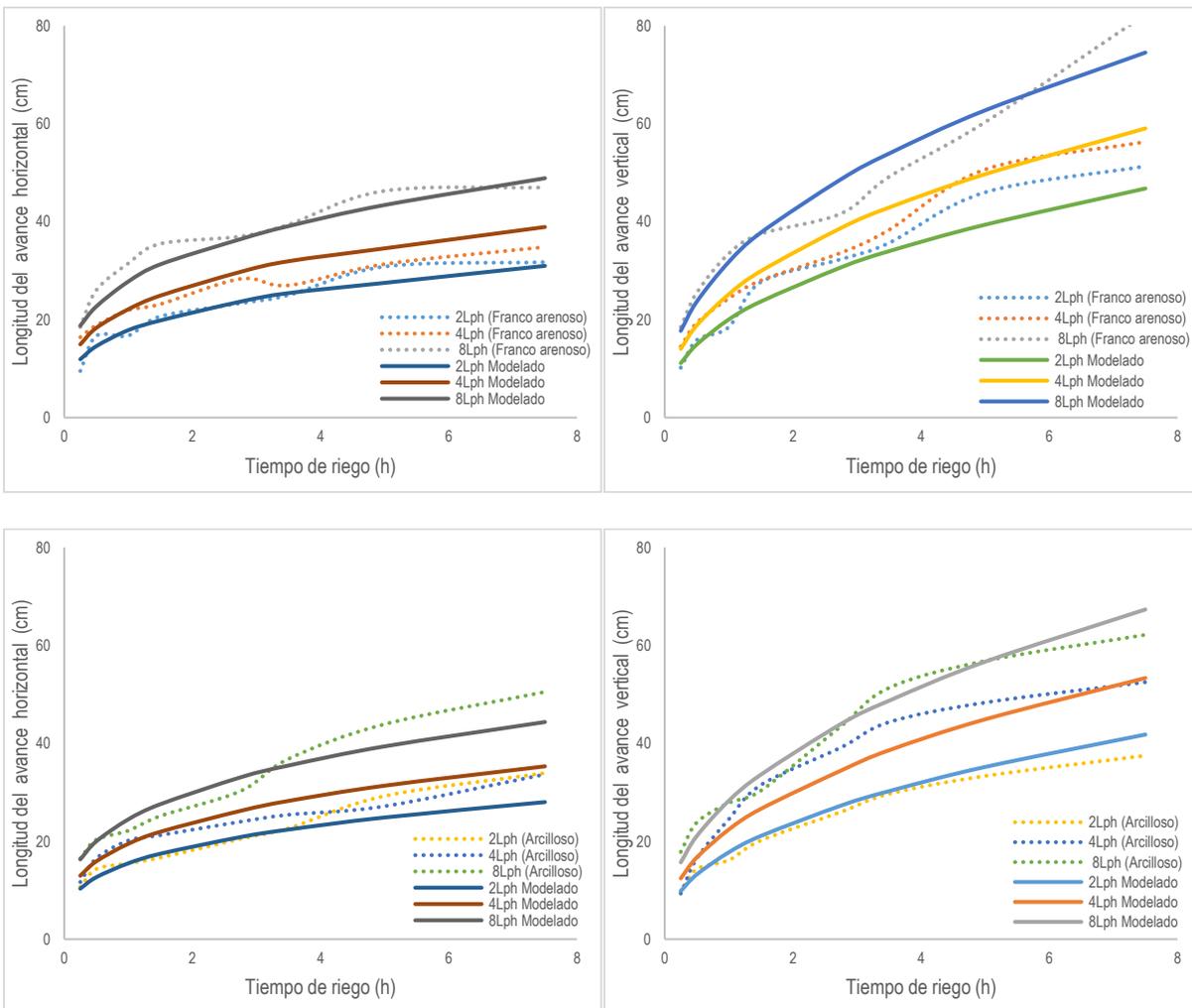
$$Z = 105.860 T^{0.425} Q^{0.336} S_i^{0.101} \quad (4)$$

donde  $R$  es el avance radial horizontal (cm);  $Z$  es el avance vertical (cm);  $T$  es el tiempo de riego (h);  $Q$  es el gasto del emisor (ml/h);  $C_i$  es el contenido de arcilla (%) y  $S_i$  es el contenido de arena (%).

Las ecuaciones 3 y 4 muestran el tiempo y el gasto del emisor son variables en común para el avance radial y vertical. Las variables que diferencian el movimiento radial y vertical son el contenido de arcilla y contenido de arena en los suelos, de acuerdo con el método de selección de variables Stepwise. Los coeficientes de significancia parciales (prueba  $t$ ) para cada variable y grado de confiabilidad de cada ecuación se muestran en la tabla 3. En la figura 3 se muestra el avance horizontal y vertical del agua en los suelos medido en campo y modelado con las ecuaciones 3 y 4.

**Tabla 3.** Coeficientes parciales, significancia y grado de confiabilidad para el avance horizontal (R) y avance vertical (Z) del agua en suelo Arcilloso y Franco-arenoso, tiempo de riego(T), gasto del emisor (Q), contenido de arcilla (Ci), y contenido de arena (Si) obtenidos con el método de selección de variables Stepwise.

Variabes dependiente	Variabes independiente	Prueba t (coeficientes parciales)	Pr > F	R <sup>2</sup> Adj.
R	T	22.976	<.0001	0.937
	Q	13.393		
	Ci	-4.381		
Z	T	32.931	<.0001	0.964
	Q	13.445		
	Si	4.023		



**Figura 3.** Avance horizontal y vertical del agua en los suelos medido en campo y modelado con las ecuaciones 3 y 4.



## Discusión

De acuerdo con los resultados expuestos, las ecuaciones 3 y 4 muestran que el movimiento horizontal y vertical del agua en el suelo está influenciado por el tiempo de riego ( $T$ ), gasto de emisor ( $Q$ ), contenido de Arcilla ( $C_i$ ) y contenido de arena ( $S_i$ ) expresado en %; con una confiabilidad de 93.7 y 96.4 % respectivamente (Tabla 3). El grado de confiabilidad se observa en la figura 3, donde se muestra el avance horizontal y vertical del agua en los suelos medido en campo y modelado con las ecuaciones 3 y 4. Las variables mostradas en las ecuaciones 3 y 4 son significativas para un total de 11 variables que se consideraron a ser explicativas para el avance lateral y vertical del agua en el bulbo (Tablas 1 y 2) además del tiempo de riego ( $T$ ) y gasto de emisor ( $Q$ ).

De acuerdo con lo anterior, el movimiento horizontal del agua se rige primordialmente por el tiempo de riego ( $T$ ) y contenido de Arcilla ( $C_i$ ). Mientras que el movimiento vertical es función del tiempo de riego ( $T$ ) y del contenido de arena ( $S_i$ ) del suelo, como lo muestran los coeficientes de significancia parciales de cada variable en la tabla 3. Estos resultados tienen cierta similitud con los modelos de Schwartzman y Zur (1986) y Malek y Peters (2011), donde muestran que tanto el movimiento horizontal como el vertical están influenciados por las mismas variables, cambiando únicamente los valores de los coeficientes para cada ecuación respectiva.

En este estudio el método Stepwise no consideró a la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), ni la densidad aparente ( $D_a$ ) y tampoco al contenido de humedad inicial como otras de las variables que pueden influir en el avance vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, como lo proponen Schwartzman y Zur (1986) y Malek y Peters (2011). La diferencia fundamental entre las ecuaciones propuestas y los modelos de Schwartzman y Zur (1986) y Malek y Peters (2011) estriba en los métodos usados para la obtención de las variables. En este estudio se usó el método de "Stepwise" para la selección de las variables. Schwartzman y Zur (1986) emplearon un análisis dimensional y Malek y Peters (2011) utilizaron un análisis de regresión usando datos de simulación del modelo analítico WetUp combinado con observaciones de campo.

El método "Stepwise" incluyen una serie de procedimientos para selección de variables, fundamentado en el criterio de significancia principalmente, mediante la inclusión o exclusión de las variables en el modelo de una manera secuencial. Por lo cual este método no incluyó la conductividad hidráulica, densidad aparente, ni el contenido de humedad en el modelo. En cambio, si incluyó el contenido de arena y arcilla del suelo, los cuales guardan una relación directa con la conductividad hidráulica de acuerdo con Peinado-Guevara *et. al.*, (2010). Entonces se puede inferir que la conductividad hidráulica está implícita en las ecuaciones propuestas.

Lo anterior permite concluir que la distribución del agua en estas texturas de suelo y la extensión del frente de humedecimiento (geometría), dependen primordialmente del volumen de agua aplicada, es decir tiempo de riego, y gasto del emisor como se aprecia en la figura 3. Desde luego que también intervienen otras variables, pero en menor medida, como la conductividad hidráulica, la densidad aparente y el contenido de



humedad del suelo como lo señalan Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), Malek y Peters (2011), Cruz-Bautista *et. al.*, (2015). En la figura 2 y 3 se aprecia que diámetro de mojado para el caso de los emisores de 2 y 4 Lph es de 60 a 70 cm en ambas texturas de suelo para un tiempo de riego de entre 5 a 8 horas. Por otro lado, la profundidad que alcanza los frentes de humedecimiento es del orden de 45 a 55 cm. Sin embargo, cuando se incrementa el gasto del emisor a 8 Lph la profundidad que se alcanza es de alrededor de 60 a 80 cm para el mismo tiempo de riego. El diámetro de mojado incrementa poco. Por lo tanto, un incremento en horas de riego o gasto de emisor incrementa poco el diámetro de mojado, pero al mismo tiempo produce pérdidas de agua por percolación. Lo cual es importante tomar en cuenta para el diseño y operación del riego por goteo. Pues este método de riego está orientado a satisfacer las necesidades de agua para la planta y no a la recarga del suelo.

## Conclusiones

El modelo obtenido en este estudio describe del movimiento horizontal y vertical del agua en suelo Arcilloso y Franco-arenoso bajo riego por goteo superficial, con una confiabilidad del 93.7 y 96.4% respectivamente. La extensión del volumen de suelo húmedo (bulbo de humedad) es función del tiempo de riego, gasto del emisor, contenido de arcilla y de arena en el suelo. De acuerdo con los parámetros estadísticos del modelo, éste puede usarse como una opción viable para el diseño de las líneas regantes de un sistema de riego por goteo.

## Referencias bibliográficas

- Ainechee, G., Baroomand-Nasab, S., and 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., and Ekhmaj, A.I.M. (2006). DIPAC-Drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th international micro irrigation congress. 10-16 Sept. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Arragan, T. F. B. y Chipana, R. R. (2015). Modelación matemática del bulbo húmedo bajo riego por goteo superficial en suelos del altiplano boliviano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. 2 (1), 7-118. ISSN: 2518-6868.
- Cervantes, A. M., Hernández, D. C. y Rondón, P. (2012). Determinación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo en el riego subsuperficial para el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, RNPS-0111,
- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M. y Siller-González, M. (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.



- 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.
- Malek, K. and Peters, R. (2011). Wetting Pattern Models for Drip Irrigation: New Empirical Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 137, 530-536.
- Naglič, B., Kechavarzi, C., Coulon, F., and Pintar, M. (2014). Numerical investigation of the influence of texture, Surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrigation Science*, 32 (6), 421–436. DOI: 10.1007 / s00271-014-0439-z
- Peinado-Guevara, H. J., Ruíz, C. R., Rodríguez, O. D., Barrientos, J., Jiménez, S. I., Torres, M. L. y Shevvin, V. (2010). Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos. *Ra Ximhai*, 6, 469-478.
- Prado, H. J. V., Gonzales R. M. I., Mota L. A., Carrillo, G. M., Vásquez, P. M. A., Lugo, V. H. y Valentín G. P. (2017). Modelo empírico del patrón de humedad en un suelo orgánico de México con riego por goteo superficial. V. Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de octubre. A Coruña.
- Schaap, M. G., Leij, F.J. and 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. and Zur, B. (1986). Emitter Spacing and Geometry Of Wetted Soil Volume. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 112(3), 242-253.