

**MODELO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL AVANCE DEL BULBO
DE HUMEDECIMIENTO EN EL SUELO CON RIEGO POR GOTEO**

FIDENCIO CRUZ BAUTISTA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

UNIDAD LAGUNA

Subdirección de Postgrado

Asesor y director de tesis: Ph.D. Vicente de Paul Alvarez Reyna

Torreón Coahuila, México.

Agosto de 2011

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Subdirección de Postgrado

MODELO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL AVANCE DEL BULBO DE
HUMEDECIMIENTO EN EL SUELO CON RIEGO POR GOTEO

TESIS

FIDENCIO CRUZ BAUTISTA

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito
parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal


Ph.D. Vicente de Paúl Álvarez Reyna

Asesor


Ph.D. Arturo Palomo Gil

Asesor


Ph.D. Pedro Cano Ríos

Asesor


Ph.D. Alejandro Zermeño González

Asesor


Ph.D. Mario A. Siller González Pico

Dr. Fernando Ruíz Zárate


Dr. Pedro Robles Trillo

Subdirector de Postgrado

Jefe de Departamento de Postgrado, U.L.

Torreón Coahuila, México. Agosto de 2011

AGRADECIMIENTOS

La realización de ésta tesis doctoral es la culminación de una formación académica, y en forma paralela mi formación humana. Ha sido difícil plasmar en este documento el desarrollo de la investigación, pero es más complicado intentar expresar mi agradecimiento a cada una de las personas e instituciones que en buena medida han contribuido a conseguirlo, a lo largo de estos tres años y medio.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Doctorado. De la misma forma, expreso mi agradecimiento al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Coahuila (COECyT), por el apoyo económico otorgado para la terminación de la Tesis.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (Alma Mater) y en especial al departamento de Postgrado Unidad Laguna, a todo su personal académico de excelencia por su influencia en mi formación profesional, y al personal administrativo por todas las facilidades otorgadas durante mi permanencia.

Al Ph.D. Vicente de Paul Alvarez Reyna, director de tesis, que ha sido parte fundamental para el desarrollo y sobretodo ha sabido dirigir, no solo la investigación, sino además a mí. Y junto a éste proceso de formación ha sido un excelente maestro y un mejor amigo.

Al Ph.D. Alejandro Zermeño González, por sus valiosas y siempre acertadas sugerencias, que contribuyeron a mejorar el trabajo de investigación, por todo el apoyo académico y por su amistad.

A los Ph.D. Arturo Palomo Gil, Pedro Cano Ríos y Mario A. Siller González Pico, por sus valiosas y siempre acertadas sugerencias y aportaciones para mejorar el trabajo de investigación y por su amistad siempre sincera.

"Con mis maestros he aprendido mucho; con mis colegas, más; con mis alumnos todavía más."

Proverbio Hindú

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico con amor, respeto y gratitud:

A mis hermanos

A mi esposa, Ana María

A mis hijos: Uriel Alejandro y Daniel Alberto

1.6. Determinación de las funciones hidráulicas del suelo	18
1.6.1. Métodos directos	18
1.6.2. Métodos indirectos	20
CAPÍTULO 2. ARTÍCULOS	21
2.1. MODELO PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DEL BULBO DE HUMEDECIMIENTO DEL SUELO CON RIEGO POR GOTEO	22
2.2. VALIDACIÓN DE UN MODELO PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DEL BULBO DE HUMEDECIMIENTO DEL SUELO CON RIEGO POR GOTEO	32
CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES	46
3.1 Discusión general	46
3.2 Conclusiones	48
CAPÍTULO 4. BIBLIOGRAFÍA	50
CAPÍTULO 5. ANEXOS	56

COMPENDIO

MODELO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL AVANCE DEL BULBO DE HUMEDECIMIENTO DEL SUELO CON RIEGO POR GOTEO

POR

FIDENCIO CRUZ BAUTISTA

DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

El propósito en esta tesis fue el desarrollo de un modelo experimental para la predicción de la distribución del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo. La finalidad de este modelo experimental es proporcionar un soporte en el diseño agronómico de los sistemas de riego por goteo. Debido a que existen pocos estudios sobre la combinación adecuada de la separación entre emisores, número de emisores por planta, volumen de agua aplicada y tiempo de riego para diversas condiciones de clima, suelo y planta. Consecuentemente la mayor parte del diseño agronómico y manejo de los sistemas de riego localizado, es empírico, simplista y con escasos criterios técnicos. Por lo cual resulta relevante el estudio y conocimiento de la distribución del agua bajo los emisores en los sistemas de riego localizado. Debido que la característica más importante para el diseño y operación de este tipo sistemas de riego, es la forma y el volumen de suelo mojado que se obtiene cuando los emisores aplican el agua. Por ello los objetivos particulares en esta tesis fueron: a) Desarrollar ecuaciones (modelo experimental) para predecir el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor, b) validar la confiabilidad del modelo experimental para predecir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor. Para lograr los objetivos planteados, se realizó el estudio en campo de los patrones de humedecimiento del bulbo húmedo en tres texturas de suelo, con riego por goteo superficial. Del estudio

de estos patrones de humedecimiento se deriva el modelo experimental, fundamentado en las aproximaciones introducidas por Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y en una selección de variables con el método Stepwise. Donde el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento se explica por la relación entre el volumen de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo. Para evaluar el desempeño del modelo experimental, se calcularon los índices coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RECM) entre los resultados obtenidos con este modelo, los obtenidos con los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous *et al.*, (2008), y mediciones en campo. Estos estadísticos de comparación muestran que el modelo experimental predice el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de los suelos estudiados con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente. También los estadísticos de comparación indican que la mejor aproximación en la predicción de la distribución del agua se obtiene con este modelo cuando se usan gastos de descarga de emisor de 1.11×10^{-6} y $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para cualquiera de los suelos estudiados. La capacidad del modelo experimental para hacer una mejor predicción del avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento en el suelo, respecto a los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous *et al.*, (2008), se debe a que considera variables relacionadas con el contenido de agua en el suelo (Kandelous y Simunek, 2010). Además, que incluye al contenido de limo del suelo como una variable más de predicción; puesto que el contenido de limo en el suelo está directamente relacionado con el contenido de humedad. El grado de confiabilidad que presenta este modelo experimental es suficiente para usarlo con fines de diseño agronómico en los sistemas de riego por goteo. Con lo cual se espera que este tipo de sistemas de riego puedan alcanzar una mayor eficiencia en la aplicación del agua, especialmente en las regiones en que el agua escasea o es de baja calidad, como es el caso de la Comarca Lagunera de los estados de Coahuila y Durango.

Palabras claves: Modelo matemático, volumen de suelo mojado, riego por goteo, patrón de humedecimiento, simulación.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL MODEL TO PREDICT THE WATER MOVEMENT IN THE WETTING BULB OF THE SOIL UNDER TRICKLE IRRIGATION

BY

FIDENCIO CRUZ BAUTISTA

DOCTOR'S DEGREE IN AGRARIAN SCIENCE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

The purpose of this thesis was to develop an experimental model to predict the water distribution in the wetting bulb of the soil. The main goal of this experimental model is to provide a support in the agronomic design of the trickle irrigation systems. The reason to develop this model is that very few studies on the appropriate combination of the separation between emitters, number of emitters by plant, volume of water applied and irrigation time under various climate, soil and crop conditions exist. Consequently the main factor in the agronomic design and handling of the localized irrigation systems, are empiric, simplistic and with limited technical criteria. Thus it is relevant to study and know the water distribution beneath the emitters in the localized irrigation systems. Because the main feature for the design and management of these irrigation systems are the shape and the volume of the wetted soil when the emitters apply the water. Therefore the particular objectives in this thesis were: a) to obtain equations (experimental model) to predict the lateral and vertical water distribution in the wetting bulb of the soil beneath an emitter, b) to validate the experimental model to predict the water advance in the wetted bulb of the soil. To achieve these objectives, field studies of the wetting patterns of three textures of soils with superficial trickle irrigation, were done. From the study of the wetting patterns, the experimental model was developed, based on the approximations introduced by Shwartzman and Zur (1986), Amin and Ekhmaj (2006) and in a variables

selection with the Stepwise method. Were the lateral and vertical advances of the water in the wetted bulb of the soil are explain by the relationship between the volume of water applied, emitter discharger, saturated hydraulic conductivity, initial and residual soil moisture contents, and the percentage of silt content of the soil. To evaluate the performance of the experimental model, the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE) performance indicators were calculated, between the results from the experimental model, results from Schwartzman and Zur (1986), Amin and Ekhmaj (2006) and Kandelous *et al.*, (2008) models and the wetted soil bulbs dimension at field. These performance indicators showed that the experimental model predicts the lateral and vertical water advances in the wetted bulb of the studied soils with a reliability of 91 and 96 % respectively. Also this indicators shown that the best approximation in the predictions of the water distribution are achieve when it use emitter discharges from 1.11×10^{-6} and $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in any of the studied soils. The proficiency of this experimental model to make a better prediction of the lateral and vertical water advances in the wetted bulb of the soil in relation to the Schwartzman and Zur (1986), Amin and Ekhmaj (2006) and Kandelous *et al.*, (2008) models, it is should it consider variables related with the water contents of the soil (Kandelous and Simunek, 2010). Furthermore, the experimental model includes the percentage of silt content in the soil such as one more predict variable; since the soil silt content is directly related with the water contents of the soil. This model presents an acceptability accuracy to use it in the agronomic design for the trickle irrigation systems. Thus it is expected to improve the efficiency of this irrigation systems in the water applied especially in the regions of low availability or is of poor-quality, such as is the case of the Comarca Lagunera in the Coahuila and Durango States.

Key words: Mathematical model, wetted soil volume, drip irrigation, wetting-pattern, simulation.

INTRODUCCIÓN

El término de riego localizado se refiere al riego que aplica el agua solo en determinadas partes de la superficie del suelo. Esta es una característica distintiva básica de este tipo de riego frente a la mayor parte de los riegos por superficie o por aspersión. Esta diferencia es fundamental para entender el movimiento de agua en el suelo, ya que en los riegos por superficie o por aspersión puede asumirse que el flujo es unidimensional, sin embargo, en el riego localizado resulta ser tridimensional. La alta frecuencia con que se aplican los riegos es otra característica distintiva. Por lo cual, los sistemas de riego localizado son los que permiten alcanzar una mayor eficiencia en el uso del agua, especialmente en las regiones en donde el agua escasea o es de baja calidad como es la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango. Sin embargo, la tecnología del riego por sí misma no garantiza esta eficiencia, debido a que se necesita un diseño y manejo adecuado, acorde con las características del suelo y cultivos. Por otro lado, existen pocos estudios sobre la combinación adecuada de separación entre emisores, caudal del emisor y frecuencia de riego para diversas condiciones de clima, suelo y planta. Consecuentemente la mayor parte del desarrollo, en términos de diseño agronómico y manejo de los sistemas de riego localizado, es empírico, simplista y con escasos criterios técnicos (Ramírez de Cartagena, 2004). Por lo anterior, el conocimiento de la dinámica de la distribución del agua bajo los emisores en estos sistemas de riego debe ser un prerequisite para su diseño y operación. De esta manera el ó 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 la planta (Ruiz-Canales, 2005; Amin y Ekhmaj, 2006; Elmaloglou y Diamantopoulos, 2009). Debido que la característica más importante en el diseño de este tipo de sistemas de riego, es la forma y el volumen de suelo mojado que se obtiene 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 de coincidir con la profundidad del sistema radicular de la planta y con el espaciamiento entre emisores y líneas regantes (Zur, 1996; Maia *et al.*, 2010). Sin embargo, el volumen de suelo mojado y su extensión es primordialmente función de la textura y estructura del suelo, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial, así como del gasto del emisor y volumen total de agua aplicada (Kandelous y Simunek, 2010; Nafchi

et al., 2011). Por otra parte, la información de la distribución del agua bajo el emisor se puede obtener únicamente 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 que permitan simular el movimiento del agua en el suelo (Gil-Marín, 2001; Arbat *et al.*, 2003; Ainechee, 2009). Por lo cual se han desarrollado varios modelos empíricos, analíticos y numéricos, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards, para predecir o simular los patrones de humedecimiento del suelo con riego por goteo (Dasberg y Or, 1999; Cook *et al.*, 2006; Kandelous y Simunek, 2010a). 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 (Kandelous y Simunek, 2010a; Nafchi *et al.*, 2011), muchos de ellos no están validados ó probados en condiciones de campo. Además, no existen modelos que consideren los distintos horizontes del perfil del suelo con propiedades físicas e hidráulicas diferenciadas. Asimismo, la mayoría de los modelos analíticos y numéricos no se presentan en forma directamente aplicable al diseño y manejo de los sistemas de riego localizado, aparte de basarse en soluciones para las cuales existen fuertes restricciones (Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997). Por su parte, los modelos empíricos se han desarrollado, típicamente, a través del uso de análisis de regresión de observaciones o datos de campo (Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997; Kandelous y Simunek, 2010a). 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 para un emisor superficial tipo fuente. Amin y Ekhmaj (2006) verificaron este modelo con datos experimentales e incluyeron el contenido de agua del suelo a saturación como un parámetro más de predicción. Posteriormente, Ainechee *et al.*, (2009) y Nafchi *et al.*, (2011) también verificaron este modelo en tres texturas de suelo, en condiciones de laboratorio y reportan que se consiguen buenos ajustes entre los valores simulados y los observados. Sin embargo, aun no se validan plenamente estas ecuaciones en condiciones de campo y bajo diferentes texturas de suelo. Además que hay pocos estudios que muestran la dinámica de la distribución de agua en el suelo con riego por goteo en condiciones de campo.

OBJETIVOS

Objetivo general: desarrollar y validar un modelo experimental para la predicción del movimiento de agua en el bulbo de humedecimiento del suelo; como una herramienta de ayuda para el diseño y manejo de los sistemas de riego por goteo.

Objetivos particulares: a) Desarrollar ecuaciones (modelo experimental) para predecir el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor, b) validar la confiabilidad del modelo experimental para predecir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Definición del riego localizado

El término de riego localizado se refiere al riego que aplica el agua únicamente en determinadas partes de la superficie del suelo, generalmente lo más cerca de las raíces de las plantas. Característica distintiva básica de este tipo de riego frente a la mayor parte de los riegos por superficie o por aspersion. Esta diferencia resulta fundamental para entender el movimiento del agua en el suelo, que mientras en otros tipos de riego puede asumirse que es unidimensional, en el riego localizado resulta ser tridimensional. La alta frecuencia con que se aplican los riegos es otra característica distintiva. Por lo cual, los sistemas de riego localizado son los que permiten alcanzar una mayor eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, la tecnología del riego por sí misma no garantiza esta eficiencia, debido a que se necesita un diseño y manejo adecuado, acorde con las características del suelo y cultivos. En función de la forma en que el emisor aplica el agua, algunos autores distinguen subclases de riego dentro del riego localizado: riego por goteo, riego por difusores o micro aspersores y riego por cintas de exudación (Pizarro, 1987; Rodrigo-López *et al.*, 1992).

1.2. Importancia de los sistemas de riego localizado

Los sistemas de riego localizado ofrecen numerosas ventajas en pro de un uso racional del agua, especialmente en las regiones en que el agua escasea o es de baja calidad (Phene, 1995; Oster y Wichelns, 2003), como es el caso en la Comarca Lagunera de los estados de Coahuila y Durango. Su versatilidad de uso en los cultivos permite tener mayor aplicación con respecto a otros sistemas de riego. Lo que diferencia al riego localizado es que solamente se moja una fracción de suelo, se utilizan pequeños caudales a baja presión, el agua se aplica con alta frecuencia, por lo tanto son menores las pérdidas y con ello se obtiene un ahorro considerable de agua.

1.3. Diseño y manejo del riego localizado

La fase inicial en el diseño de un sistema de riego localizado, es el diseño agronómico, en esta etapa deben calcularse las necesidades de agua y determinar la frecuencia, tiempo de riego, número de emisores por planta y caudal de los emisores. Esta fase resulta crítica, pues los errores que se cometen no pueden corregirse en la fase del diseño hidráulico y puede poner en peligro el objetivo de conseguir una gestión adecuada del agua de riego (Pizarro, 1987). Autores como Keller y Karmelli (1974), Bresler (1978), Bucks, Nakayama y Warrick (1980) y Zur (1996) han planteado metodologías de cálculo que permiten fijar algunas de las variables que intervienen en el diseño agronómico.

Una vez diseñado el sistema, se deben seguir una serie de pautas que permitan la adecuada gestión del agua de riego. Uno de los criterios que más se emplea en la programación del riego se basa en datos meteorológicos. En muchas regiones los datos de evapotranspiración (ET) obtenidos en las estaciones meteorológicas representan una herramienta básica para la programación del riego. Sin embargo, en los sistemas de riego localizado la evaporación de agua del suelo no es igual en toda la superficie y por ello los métodos de predicción de las necesidades de agua utilizados en otros tipos de riego no pueden aplicarse directamente. Por lo cual, la programación del riego localizado se debe realizar en base a la restitución del agua evaporada - transpirada en el bulbo húmedo a partir de medidas directas del contenido de agua en el suelo.

1.4. Principios básicos del movimiento del agua en el suelo

El agua en el suelo presenta tres procesos importantes, la infiltración de agua superficial para convertirse en humedad del suelo, el flujo subsuperficial o flujo no saturado a través del suelo, y el flujo saturado a través de los estratos de suelo o roca. El movimiento del agua en el suelo ocurre en el caso saturado y en el no saturado. En el estado saturado el agua tiene un movimiento preferencialmente horizontal y una pequeña componente de flujo vertical. Mientras que en el caso no saturado el agua se dirige hacia la zona freática (zona saturada); es decir, en dirección vertical aunque es posible tener componentes laterales. En general se reconocen tres formas de movimiento del agua en el suelo:

- 1) Movimiento del agua líquida en suelos no saturados.

- 2) Movimiento del agua líquida en suelos saturados.
- 3) Movimiento del agua en la fase de vapor.

1.4.1. Ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento del agua en el suelo

Darcy (1856) formuló matemáticamente el flujo del agua en el suelo. El volumen de agua que fluye por unidad de tiempo en una columna de suelo saturado es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica y al área transversal de la columna e inversamente proporcional a la longitud de la columna,

$$Q = -K_{sat} A \frac{\Delta H}{L} \quad (1.1)$$

siendo: Q , caudal de agua que fluye ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); K_{sat} , conductividad hidráulica a saturación (m s^{-1}); A , área transversal de la columna (m^2); ΔH , diferencia de presión hidráulica (m); L , longitud de la columna (m).

La ley de Darcy se obtuvo experimentalmente, para condiciones de suelo saturado y uni-dimensional. Slichter (1899) generalizó esta ley en una ecuación tridimensional,

$$q = -K_{sat} \nabla \psi_h \quad (1.2)$$

donde: $\nabla \psi_h$, es el gradiente de potencial (o gradiente hidráulico) en un espacio tridimensional.

La generalización de Slichter describe condiciones de flujo permanente (estacionario), es decir invariables en el tiempo. Para describir las condiciones de flujo transitorio, variable en el tiempo, debe incluirse el factor tiempo. Para obtener la ecuación general de flujo en estas condiciones se introduce la ecuación de continuidad,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q - \ell \quad (1.3)$$

donde: θ , contenido de agua del suelo (adimensional); t , tiempo (s); ∇ , vector operador diferencial, representando el gradiente tri-dimensional de la densidad de flujo q (s^{-1}) y ℓ la taza con la que se está perdiendo humedad en el medio.

Richards (1931) extendió a condiciones de flujo no saturado la generalización de Slichter, originalmente concebida para flujo saturado. Para ello, trató a la conductividad hidráulica (K) como función del potencial matricial ψ_m . Por consiguiente,

$$q = -K(\psi_m)\nabla\psi_h \quad (1.4)$$

la K puede también tratarse como función del contenido de agua del suelo (θ), estando menos afectada por histéresis esta relación que la de $K(\psi_m)$ (Hillel, 1980), por lo que también,

$$q = -K(\theta)\nabla\psi_h \quad (1.5)$$

Por consiguiente, se obtiene la ecuación general de flujo de agua en el suelo, que depende del contenido de humedad (θ) y del potencial de elevación (h).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla[K\nabla\psi_h] - \ell \quad (1.6)$$

Esta es la ecuación de Richards, la cual es una ecuación diferencial de derivadas parciales, parabólica y no lineal.

1.5. Distribución del agua en el suelo bajo riego localizado

La gran mayoría de los trabajos que abordan el problema del movimiento de agua en el suelo parcialmente saturado se fundamentan en el modelo macroscópico establecido por Richards (1931), ecuación (1.6). Esta ecuación puede aplicarse para calcular la distribución de agua en el suelo en riego localizado, sin embargo resulta difícil de resolver por intervenir en ella dos variables dependientes: el potencial de presión (h) y el contenido volumétrico de agua (θ); por ser una ecuación diferencial parcial de segundo orden y por ser no lineal (Warrick, 2003).

1.5.1. Ecuaciones del flujo de agua en el suelo con riego localizado

Los sistemas de riego localizado, en contraste con otros sistemas, se caracterizan por aplicar pequeñas dosis de agua de forma muy frecuente en una superficie inferior a la total del campo en la zona no saturada del suelo. La infiltración de agua en estas condiciones resulta ser tridimensional, a diferencia de lo que

ocurre en el caso de un riego por inundación o por aspersión; además, se tiene la extracción de agua por las plantas. De esta forma la ecuación (1.6), en condiciones de régimen variable y no saturado, para un sistema con cultivo adopta la expresión (Ramírez de Cartagena, 1994),

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [K \nabla \psi_h] - S \quad (1.7)$$

donde, $\partial \theta / \partial t$, representa la variación del contenido de agua volumétrico respecto al tiempo; ∇ , vector operador diferencial; K , conductividad hidráulica; ψ_h , potencial hidráulico; S , extracción de agua por la planta en la zona radicular.

En condiciones de suelo no saturado, no expansible y suponiendo nulo el potencial de presión, el potencial hidráulico será la suma del potencial gravitacional y potencial matricial, por lo que desarrollando la ecuación (1.7) resulta,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [K(\theta) \nabla (\psi_m + \psi_z)] - S \quad (1.8)$$

$$\text{y considerando el suelo isotrópico,} \quad K_x(\theta) = K_y(\theta) = K_z(\theta) = K(\theta) \quad (1.9)$$

se obtiene,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial (\psi_m + \psi_z)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\theta) \frac{\partial (\psi_m + \psi_z)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial (\psi_m + \psi_z)}{\partial z} \right) - S \quad (1.10)$$

puesto que $\nabla \psi_z$ vale 0 para flujo horizontal (2 direcciones) y -1 para flujo vertical,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [K(\theta) \nabla \psi_m] - \left(\frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \right) - S \quad (1.11)$$

es decir,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \right) - S \quad (1.12)$$

En aquellos casos que el gradiente gravitacional pueda despreciarse frente al gradiente matricial, resultará,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [K(\theta) \nabla (\psi_m)] - S \quad (1.13)$$

1.5.2. Flujo plano y cilíndrico del agua en el suelo bajo riego localizado

La forma y volumen de suelo mojado, profundidad y diámetro que se alcanza bajo un emisor varían ampliamente con las propiedades físicas e hidráulicas del mismo (textura, estructura, conductividad hidráulica); así como del gasto del emisor, volumen de agua aplicada y frecuencia de riego (Iusheng *et al.*, 2004; Kandelous y Simunek, 2010b; Nafchi *et al.*, 2011). El agua que aplican los emisores en los sistemas de riego localizado se distribuye en la superficie del suelo formando algún tipo de simetría hasta que la velocidad de infiltración del suelo se iguala con el flujo de agua que aporta el emisor. Este fenómeno de infiltración y redistribución de agua en el suelo puede considerarse como dos tipos de flujo, plano y flujo cilíndrico.

a) **Flujo plano:** Se presenta cuando los emisores están muy juntos o se trate de un tubo poroso y se forme una banda de ancho continuo bajo los emisores. El frente húmedo producido por un emisor alcanza el frente húmedo de los emisores cercanos. En este caso puede asumirse que la superficie húmeda tiene forma de banda infinita de anchura variable con el tiempo. El problema puede ser analizado bajo un esquema de coordenadas cartesianas x y z ; entonces, la ecuación del flujo en este caso es,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right) \quad (1.14)$$

b) **Flujo cilíndrico ó con simetría axial:** Se presenta en el caso de un emisor aislado o bien en el caso de que los emisores estén suficientemente separados para que no haya interacción entre ellos. En este caso el problema puede analizarse como flujo 2-dimensional (flujo cilíndrico), con coordenadas cilíndricas r (radial) y z (vertical). Si además se considera el suelo estable, isotrópico y homogéneo, sin extracción de agua por la raíz, el contenido de agua (θ) es función de la profundidad (z), el tiempo (t) y la distancia radial a la vertical del emisor (r), siendo $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$. Según Bresler (1977) la ecuación de flujo adopta la forma,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial r} \right) + \frac{K(\theta)}{r} \frac{\partial \psi_m}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right) \quad (1.15)$$

En algunas ocasiones a los modelos que asumen este tipo de flujo se les llama tridimensionales, asumiendo la simetría axial. Según Warrick (2003) podría argumentarse que se trata tanto de flujo tridimensional como bidimensional. En el flujo cilíndrico el agua se distribuye de forma simétrica alrededor del eje vertical (z), con lo que el contenido de agua en el suelo es función de las coordenadas R y z (Figura 1.1).

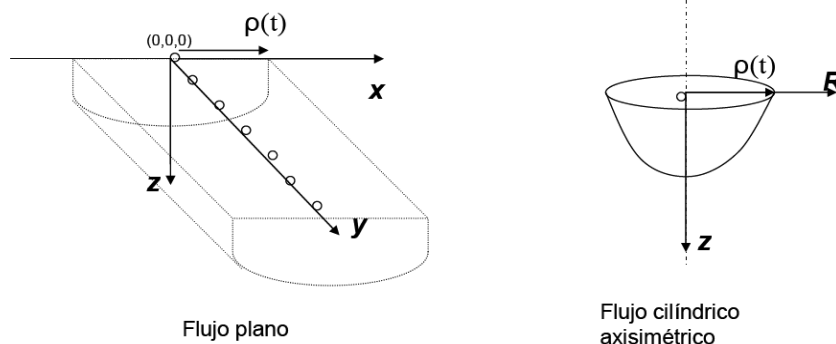


Figura 1-1: Esquema de la distribución de agua en el suelo para los casos de flujo plano y flujo cilíndrico.

1.5.3. Solución a la ecuación general de flujo de agua con riego localizado

Existen varios modelos matemáticos basados en la resolución de ecuación de Richards mediante métodos analíticos o numéricos y que permiten la simulación del movimiento de agua en el suelo en condiciones de riego localizado. Entre las *soluciones analíticas*: Philip (1971), Raats (1971), Warrick (1974), Revol *et al.*, (1997), Coelho y Or (1996), entre otras; y entre las soluciones numéricas: Brandt *et al.*, (1971), Van der Ploeg y Benecke (1974), Armstrong y Wilson (1983), Taghavi *et al.*, (1984), Ghali (1986), Ramírez de Cartagena (1994), Simunek *et al.*, (1999), Annandale *et al.*, (2003),...

En todos estos modelos la resolución de la ecuación de Richards se consigue imponiendo determinadas condiciones de contorno al dominio de flujo definido. Estas condiciones pueden resultar más o menos adecuadas para simular distintas particularidades que se dan en los sistemas de riego localizado: goteros aislados, banda continua de emisión, entrada puntual de agua en el suelo, entrada por un disco húmedo,...

Por otro lado, las soluciones exactas ó *soluciones numéricas* para la ecuación general de flujo se complican por su no linealidad debido a que los parámetros $K(\theta)$, $C(\theta)$, $S(\theta)$ dependen de la solución $\theta(z,t)$. En cualquier caso esta solución supone adoptar condiciones iniciales y fronteras muy específicas, que dificultan su generalización. Entre las ventajas de las soluciones numéricas está poder eliminar este inconveniente. Las soluciones numéricas se basan en dividir la región del suelo en un número finito de figuras representadas por una serie de puntos nodales donde puede obtenerse la solución. Existen principalmente dos técnicas de resolución numérica, las diferencias finitas y los elementos finitos.

1.5.3.1. Soluciones analíticas vs numéricas

Diversos autores han realizado comparaciones entre las soluciones analíticas y las soluciones numéricas. Las principales ventajas que presentan las soluciones analíticas frente a las numéricas son: (a) requieren menos parámetros de entrada para ser aplicadas; (b) proporcionan una idea clara y directa de cómo influyen los parámetros en la solución. Sin embargo para poder resolver analíticamente la ecuación de Richards es preciso adoptar hipótesis que pueden resultar restrictivas. En este sentido la mayor parte de las soluciones adoptan la hipótesis de régimen estacionario para poder linealizar la ecuación de Richards (Wooding, 1968; Philip, 1968 y Raats, 1971). Según observaciones experimentales realizadas por Boulier (1985), Ghali y Svehlik (1988) la hipótesis de régimen estacionario se cumple en raras ocasiones. Sólo cuando los riegos son muy frecuentes, tres o más veces al día, el contenido y potencial de agua en el suelo cerca de los emisores permanece prácticamente constante y por tanto se alcanza la hipótesis de régimen estacionario (Rawlins, 1973; Jury y Earl, 1977). Según Coelho y Or (1997) para la mayoría de las frecuencias de riego, incluso con una frecuencia de riego diaria, la condición de régimen estacionario no se cumple. Estos mismos autores señalan que, según cual vaya a ser la aplicación de las soluciones analíticas, deben distinguirse dos situaciones: (a) para diseñar el sistema de riego y (b) para manejar el riego.

1.5.4. Distribución del agua en el suelo en la zona saturada bajo los emisores

El agua procedente de los emisores se distribuye en la superficie del suelo formando un charco que aumenta su extensión hasta que la velocidad de infiltración del suelo se iguala con el flujo de agua que aporta el emisor. Después de un cierto tiempo de iniciado el riego, la extensión del área mojada bajo los emisores alcanza un valor máximo (Wooding, 1968). La forma y dimensiones de la zona encharcada vienen condicionadas por la disposición y caudal de los emisores, y por la capacidad de infiltración del suelo. Gupta *et al.*, (1995) indican que el poder predecir la extensión de suelo mojado bajo los emisores es una de las claves para el diseño y gestión eficiente de los sistemas de riego localizado. Revol (1996) destaca que el charco formado en la superficie es el factor más importante que explica la extensión horizontal que alcanza el volumen de suelo mojado bajo los emisores, ya que si sólo se considera el movimiento de agua debido a los gradientes de potencial, su extensión sería menor. Moncef *et al.*, (2002) relacionan la extensión del suelo humedecido en superficie con la profundidad máxima del volumen de suelo mojado, estableciendo una solución analítica a la ecuación de Richards que permite inferir la profundidad máxima humedecida a partir de la extensión humedecida en superficie.

1.5.4.1. Solución de la ecuación general de flujo de agua basada en hipótesis de que la zona húmeda presenta formas geométricas

Se han desarrollado otra serie de teorías para la resolución de la ecuación general de flujo basadas en la hipótesis de que el bulbo o zona húmeda presenta la forma de determinadas figuras geométricas. Fok *et al.*, (1982) desarrollaron ecuaciones físicas para la infiltración bi-dimensional a partir de un emisor puntual, asumiendo que el bulbo húmedo presenta la forma de una semi-elipse, y que los componentes vertical y horizontal del flujo pueden describirse mediante ecuaciones de infiltración uni dimensional. El trabajo se fundamenta en que la infiltración vertical se debe a los gradientes de potencial matricial y gravitatorio. Philip (1985) desarrolla soluciones exactas para el caso de absorción tri-dimensional en régimen permanente y cavidades (bulbos) esferoidales. Como casos particulares trata los de aguja, esfera y disco. Clothier *et al.*, (1985) contrastan las soluciones tri-dimensionales en régimen permanente y variable, con experiencias de

campo y de laboratorio. El flujo se supone distribuido en una cavidad semi-esférica. Este tratamiento se consiguió fijando adecuadamente las condiciones iniciales y frontera.

1.5.5. Ecuaciones de aplicación directa

Roth (1983) desarrolló un procedimiento muy simple para predecir el volumen de suelo húmedo y el movimiento lateral y vertical del agua a partir de un emisor, con la finalidad de aplicarlo al diseño y manejo en el riego localizado. El procedimiento que describe se fundamenta en estimaciones del contenido de agua del suelo y del volumen de agua aplicada en campo. No se requiere conocer la función de conductividad hidráulica, ni intervienen modelos matemáticos. Se razonan varias consideraciones que se adoptan como hipótesis, entre las cuales, las más importantes son:

- a) El contenido de agua en la zona húmeda se aproxima a capacidad de campo.
- b) El volumen de suelo húmedo puede calcularse por diferencia entre los contenidos de agua a capacidad de campo e inicial, y la cantidad de agua aplicada.
- c) La forma del volumen húmedo tiende a ser hemisférica, sin embargo, debido al gradiente gravitacional resulta ser elipsoidal.

A través de ensayos de campo se observó que las pérdidas por evaporación del charco superficial fueron inferiores al 5 % del total del agua aplicada. Asimismo, el volumen de agua aplicada y el volumen de suelo húmedo están altamente correlacionados ($R=0.995$) mediante la ecuación,

$$y = aX^b \quad (1.16)$$

donde: y , volumen de suelo húmedo (L); X , volumen total de agua en el suelo (agua aplicada más contenido de agua inicial) (L); a, b , constantes determinadas a partir de la regresión con datos de campo.

De manera similar, existe una relación del tipo de la ecuación (1.16) entre el volumen de suelo húmedo y el máximo movimiento lateral del agua con $R=0.985$. A partir de estos valores se desarrolló el modelo simplificado, para predecir el volumen de suelo húmedo y el movimiento lateral y vertical. Para ello debe conocerse el volumen de agua a aplicar y los contenidos de agua a capacidad de campo e inicial para el

suelo bajo estudio. Donde el volumen de suelo húmedo es igual al agua aplicada dividida por la diferencia entre los contenidos volumétricos de humedad a capacidad de campo e inicial. Asumiendo un volumen húmedo hemisférico, el movimiento lateral (ML) puede conocerse a partir de la ecuación,

$$ML = cVS^{1/3} \quad (1.17)$$

donde: VS, volumen de suelo húmedo (L); c, constante de valor $c = 0.93 - 0.15R$, donde R es la relación entre el movimiento vertical y lateral. Para la mayoría de suelos, R está entre 0.5 y 2.5.

El movimiento vertical (MV) puede determinarse por la ecuación,

$$MV = \left(\frac{3VS}{2\pi ML} \right)^{1/2} \quad (1.18)$$

También 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 la zona humedecida, la anchura y la 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 se desarrolló a partir de resultados experimentales obtenidos en dos suelos (Gilat Loam y Sinaí Sand), con conductividades hidráulicas saturadas de 2.49×10^{-6} y $2.49 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, y con descargas de emisor de 1.19×10^{-6} y $5.69 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El modelo simplificado de Schwartzman y Zur para determinar la geometría del volumen mojado del suelo es:

$$w = 1.82(V)^{0.22} \left(\frac{K_s}{Q} \right)^{-0.17} \quad (1.19)$$

$$z = 2.54(V)^{0.63} \left(\frac{K_s}{Q} \right)^{0.45} \quad (1.20)$$

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

De manera similar, Amin y Ekhmaj (2006) desarrollaron las siguientes ecuaciones para estimar los avances horizontal y vertical del frente de humedecimiento, a través de un análisis de regresión no lineal. Los datos experimentales provienen de cuatro tipos de suelo, con emisor superficial y gastos de descarga de 5.83×10^{-7} a $2.166 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$$R = 0.2476 \Delta\theta^{-0.562} V^{0.268} Q^{-0.0028} K_s^{-0.034} \quad (1.21)$$

$$Z = 2.0336 \Delta\theta^{-0.383} V^{0.365} Q^{-0.101} K_s^{0.195} \quad (1.22)$$

donde R y Z son las dimensiones horizontal y vertical del patrón de humedecimiento, respectivamente (m), $\Delta\theta$ es el contenido volumétrico promedio de agua detrás del frente de humedecimiento ($\Delta\theta = \theta_s/2$; donde θ_s es el contenido de humedad a saturación), V es el volumen total de agua aplicada (m^3), Q es el gasto de descarga del emisor ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) y K_s es la conductividad hidráulica saturada del suelo (m s^{-1}).

Kandelous *et al.*, (2008) desarrollaron las siguientes ecuaciones para estimar los avances horizontal (w), vertical hacia arriba del emisor (Z_+) y vertical hacia abajo del emisor (Z_-) del frente de humedecimiento, a partir de un emisor subsuperficial usando un método análisis dimensional similar a Singh *et al.*, (2006):

$$w = 4.244 (V)^{0.526} \left(\frac{K_s}{Q z} \right)^{0.026} \quad (1.23)$$

$$Z_+ = 0.72 (V)^{0.344} \left(\frac{K_s}{Q z} \right)^{-0.156} \quad (1.24)$$

$$Z_- = 0.66 (V)^{0.333} \left(\frac{K_s}{Q z} \right)^{-0.167} \quad (1.25)$$

donde; w , Z_+ y Z_- son las dimensiones del frente de humedecimiento (m), V es el volumen de agua aplicada que se infiltra en el suelo (m^3), Q es el gasto descarga del emisor ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), K_s es la conductividad hidráulica saturada (m s^{-1}) y z es la profundidad de instalación de emisor (m). Estas ecuaciones se derivaron de datos experimentales obtenidos de un suelo arcilloso, con riego por goteo subsuperficial a una descarga del emisor de $2.79 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

1.5.6. Limitaciones de los métodos de solución de la ecuación general de flujo del agua en el suelo

Los métodos de resolución de las ecuaciones de flujo tienen limitaciones inherentes a cada método. Los modelos basados en soluciones analíticas suponen recurrir a la linealización de las ecuaciones de flujo de agua del suelo. Para conseguir la linealización se requieren hipótesis restrictivas como la relación exponencial entre el contenido de agua del suelo, la conductividad hidráulica y el potencial matricial del suelo. Por consiguiente, no es posible considerar el efecto histéresis entre el contenido de agua del suelo y el potencial matricial. Además deben adoptarse condiciones de contorno muy limitantes, como la no existencia de flujo de agua en el charco superficial. Conseguir la linealización mediante la eliminación de la variable tiempo, supone tener que adoptar condiciones de régimen permanente, condiciones que raramente ocurren en el campo. Además, la solución analítica para régimen variable y flujo multidimensional, sólo existe si se imponen ciertas hipótesis adicionales ($(\partial K / \partial \theta) = \text{constante}$) que linealicen la ecuación de flujo multidimensional y en régimen variable.

Por otra parte, los modelos basados en soluciones numéricas, en general; es decir sin entrar en el método de resolución, tienen la ventaja de no tener que linealizar la ecuación de flujo, lo que supone la facilidad de adoptar cualquier función para las propiedades hidráulicas del suelo (conductividad, curva característica de humedad). Los modelos numéricos, sin embargo, requieren más tiempo de procesamiento de datos y tienen más error que los modelos analíticos.

Por otro lado, para algunos modelos multidimensionales y en particular cuando se considera el flujo de humedad y calor acoplados, no existen soluciones analíticas. Los modelos basados en soluciones analíticas, son inadecuados por tanto para describir geometrías de flujo complejas como las que ocurren en el medio físico de un riego localizado. Sin embargo los modelos numéricos, permiten variar las condiciones en que opera el modelo con relativa facilidad. Consecuentemente, proporcionan un grado de flexibilidad en el tratamiento complejo y algunos de estos modelos consiguen la simulación de geometrías de flujo complejas.

A pesar de que no es cierto para todos los modelos, la mayoría de ellos no consideran la absorción de agua por la raíz ni la evaporación superficial. Es general eliminar el efecto multidimensional y no incluir la evaporación ni la extracción de agua por la raíz. Únicamente el modelo de Ghali (1986) tiene carácter multi-dimensional y contempla los flujos de agua y calor acoplados, además del término extracción de agua por la raíz y la evaporación superficial. Sin embargo, este modelo no considera distintos horizontes de suelo.

1.5.7. Diagnóstico general de los modelos existentes para la solución del flujo del agua en el suelo

Es común a todos los modelos existentes presentar alguno de estos problemas (Ramírez de Cartagena, 1994; Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997):

1. La mayoría de estos modelos no están validados. En el mejor de los casos sus soluciones se comparan con modelos ya existentes. Son muy escasos los modelos que están probados en condiciones de campo.
2. No existen modelos que consideren simultáneamente y en condiciones de flujo multi-dimensional la extracción de agua del suelo y los distintos horizontes del perfil del suelo con propiedades hidráulicas diferenciadas.
3. Es difícil contrastar soluciones entre distintos modelos puesto que no necesariamente los analíticos y numéricos dan resultados similares, debido a que los analíticos normalmente consideran muchas asunciones simplificadoras que no representan en su totalidad la realidad observada.
4. No se presentan en forma directamente aplicable al diseño y manejo de sistemas de riego localizado, o con un soporte complementario que los haga aplicables. Los modelos que tienen un carácter más aplicativo, aparte de basarse en soluciones para las cuales existen fuertes restricciones, se presentan de una forma excesivamente complicada para su uso generalizado.

Por su parte, los modelos de aplicación directa son interesantes puesto que no suponen una excesiva complejidad matemática y la precisión de los resultados que ofrecen son buenos para los propósitos de diseño del riego localizado. Por lo cual, este tipo de modelos empíricos o semi-empíricos son más

convenientes de usar para el diseño y operación de estos sistemas de riego, que los modelos analíticos o numéricos (Amin y Ekhmaj, 2006; Nafchi *et al.*, 2011).

1.6. Determinación de las funciones hidráulicas del suelo

Para la implementación de la mayoría de los modelos anteriormente expuestos es necesario conocer las relaciones entre el contenido de agua del suelo, el potencial matricial y la conductividad hidráulica. Para la determinación de estas funciones existen métodos directos y métodos indirectos.

1.6.1. Métodos directos

Los métodos directos requieren la realización de experiencias de campo. Klute (1986) presenta una extensa relación de los métodos *in situ* o a partir de muestras de suelo en laboratorio que se han desarrollado durante los últimos años.

La función $\psi_m(\theta)$, denominada curva característica de humedad del suelo o curva de retención de agua, puede obtenerse a partir de medidas simultáneas de contenido de agua en el suelo y potencial matricial mediante tensiómetros. Sin embargo, las lecturas de potencial matricial tienen su límite a unos - 80 KPa. Para valores de potencial más bajos las lecturas deben hacerse en las placas de presión utilizándose muestras de suelo disturbadas. Los valores obtenidos *in situ* o en laboratorio representan únicamente la rama de desorción de la función $\psi_m(\theta)$, pero no la de adsorción, puesto que normalmente se obtiene a partir del secado del suelo. Las medidas directas para la determinación de la conductividad hidráulica $K(\theta)$, son aún más complejas que la obtención de la función $\psi_m(\theta)$. Los métodos de campo permiten medir esta conductividad hidráulica de un suelo en forma directa, mediante la excavación de pozos superficiales, en los cuales se efectúan pruebas de agotamiento y recuperación, el uso de pruebas de infiltración, o a través de medidas de velocidad. En algunos casos es posible obtener la medición de la conductividad hidráulica del suelo, mientras que en otros se obtiene la tasa de infiltración básica, la que se relaciona directamente con la conductividad hidráulica. Además, la conductividad hidráulica puede medirse en la zona saturada y

en la zona no saturada. Para la medida la conductividad hidráulica saturada *in situ* en zona insaturada de se puede utilizar el permeámetro Guelph (Reynolds et al., 2002; Gabriels et al., 2006). Este método se sustenta en los análisis efectuados por Richards, que ha encontrado una solución efectiva de cálculo de la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), considerando el flujo tridimensional del agua en el suelo, a partir de un hoyo en donde se mantiene una carga hidráulica (h) constante (Reynolds et al., 2002). Mientras el agua fluye a través del suelo, la columna de agua en los reservorios del permeámetro desciende, manteniendo estable la altura de h . Esta velocidad de descenso es registrada por medio de una escala graduada a 0.1 cm, en intervalos constantes de tiempo, permitiendo las lecturas correctas aún a muy bajos caudales. Cuando las velocidades de descenso se estabilizan obteniendo valores iguales o con diferencias menores al 5% se termina la medición. Con el valor de velocidad de descenso estable obtenido se procede al cálculo de la K_{fs} (Reynolds et al., 2002; Cerana et al., 2005).

La conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) puede calcularse resolviendo la ecuación de Richards:

$$K_{fs} = \frac{CAq}{2\pi h^2 + C\pi a^2 + \left(2\pi \frac{h}{\alpha^*}\right)} \quad (1.26)$$

donde: C = factor de forma adimensional obtenido de h/a ; A = área de la sección transversal del reservorio del permeámetro (m^2); q = estado estable de la caída del nivel de agua en el reservorio del permeámetro ($m \text{ s}^{-1}$); h = profundidad de agua en el pozo (controlada por la altura del tubo de aire) (m); a = radio del pozo (m); α^* = parámetro de textura/estructura (m^{-1}).

Aunque la implementación de los métodos directos es difícil y de larga duración. Además, las propiedades hidráulicas del suelo son histeréticas, y por otra parte, la variabilidad del suelo suele ser tan alta que se requieren cantidades considerables de datos. Por todas estas causas su utilidad práctica queda algo restringida.

1.6.2. Métodos indirectos

Para eliminar las dificultades que presentan las medidas directas de las funciones hidráulicas del suelo, se han desarrollado métodos indirectos que predicen las propiedades hidráulicas del suelo a partir de datos más fácilmente medibles. Gupta y Larson (1979), presentan una ecuación obtenida a partir de regresiones lineales múltiples, para estimar la función $\psi_m(\theta)$ a partir de la textura USDA, materia orgánica y densidad aparente del suelo. También Pineda y Vilorio (1997) presentan dos ecuaciones para estimar la humedad retenida a -33 y -1500 KPa, a partir de un análisis de correlación y regresión de una muestra constituida por 490 horizontes de suelos Aluviales.

Por otro lado, para el cálculo de la función $K(\theta)$, se han propuesto diversos métodos basados en la relación entre la conductividad y la distribución de los poros por tamaños y en el cálculo de la velocidad del agua mediante la ecuación de Poiseuille. Kabat *et al.*, (1988) analizan diversas técnicas de estimación de parámetros por optimización para la predicción de las funciones $\psi_m(\theta)$ y $K(\theta)$, así como la utilización de la medición por escala en la variación espacial de las propiedades hidráulicas del suelo. Recientemente, se ha usado el análisis de red neural para establecer las funciones de pedotransferencia (Pachepsky *et al.*, 1996; Schaap y Bouten, 1996; Pachepsky *et al.*, 1999). Para facilitar el uso práctico de estas funciones de pedotransferencia, Schaap (2001) desarrolló el programa de computo ROSETTA para estimar parámetros hidráulicos, como una función de la succión y textura del suelo.

CAPÍTULO 2: ARTÍCULOS

MODELO PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DEL BULBO DE HUMEDECIMIENTO DEL SUELO CON RIEGO POR GOTEO

MODEL TO ESTIMATE THE WETTING BULB DIMENSION OF THE SOIL IN TRICKLE IRRIGATION

Cruz Bautista Fidencio^{1*}, Álvarez Reyna Vicente¹, Zermeño González Alejandro², Pedro Cano Ríos¹, Rivera González Miguel³, Siller González Pico Mario⁴

^{1,1} *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, Periférico y Carretera a Santa Fe, Torreón Coahuila, México C.P. 27000.*

² *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México C.P. 25315.* ³ *Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera. Gómez Palacio Durango, México C.P. 35140.* ⁴ *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional – Unidad Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México, 45015.* *Email: fcruz1975@yahoo.com.mx

RESUMEN

Es prerequisite conocer la dinámica de la distribución del agua bajo los emisores en los sistemas de riego por goteo para su diseño y operación. Debido a que la característica más importante en el diseño de estos sistemas de riego es la forma y el volumen de suelo mojado que se obtiene cuando los emisores aplican el agua. Por lo cual el objetivo de este estudio fue desarrollar ecuaciones para predecir el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor. Para determinar los coeficientes de las ecuaciones se usó información obtenida de los patrones de humedecimiento y características físicas e hidráulicas de tres texturas de suelo. En el análisis de la información se utilizó un procedimiento de regresión no lineal. De acuerdo con los resultados obtenidos, las ecuaciones desarrolladas predicen el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de los suelos estudiados con una confiabilidad del 90 y 94 % respectivamente. El avance lateral y vertical del agua en el bulbo se explica por la relación entre el volumen de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo. Por lo cual, las ecuaciones obtenidas en este estudio se pueden utilizar para determinar con buena exactitud el espaciamiento entre las laterales y emisores, así como el número de emisores necesarios para humedecer un determinado volumen de suelo, en un sistema de riego localizado.

Palabras claves: Modelo matemático, volumen de suelo mojado, riego por goteo, patrón de humedecimiento

ABSTRACT

To know the water distributions beneath the emitters in trickle irrigation systems is a prerequisite for its design and manage. One of the main features in the design of this irrigation systems; it is the shape and the volume of the wetted soil when emitters apply the water. Therefore the objective of this study was to obtain equations to predict the lateral and vertical water distribution in the wetting bulb of the soil beneath the emitter. To determine the coefficients of these equations, information obtained from the wetted pattern and the physical and hydraulic characteristics of three textures of soil were used. A nonlinear regression procedure was used to analyze this information. The results of this study showed that the deduced equations predict the lateral and vertical water distribution in the wetted bulb of the tested soils with a reliability of 90 and 94 % respectively. The lateral and vertical water advance in the bulb are explain by the relationship between the volume of water applied, emitter discharge, saturated hydraulic conductivity, initial and residual water contents in the soil, and the soil silt contents. Thus these equations can be used to determine the spacing between laterals and emitters, as well as the number of emitters necessary to wet a given volume of soil in a trickle irrigation system.

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

1. INTRODUCCIÓN

Conocer la distribución del agua bajo los emisores en los sistemas de riego por goteo es un prerrequisito para su diseño y operación. Debido a que la característica más importante en el diseño de este tipo sistemas de riego es la forma y el volumen de suelo mojado que se obtiene 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 de coincidir con la profundidad del sistema radicular de la planta y con el espaciamiento entre emisores y líneas regantes (Zur, 1996; Maia et al., 2010). Pero el volumen de suelo mojado y su extensión es función de la textura y estructura del suelo, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial, así como del gasto del emisor y volumen total de agua aplicada (Kandelous y Simunek, 2010; Nafchi et al., 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 y Or, 2000; Ruiz-Canales, 2005; Kandelous y Simunek, 2010). Por lo que si se conoce la distribución del agua dentro del volumen de suelo mojado, el ó 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, 2005; Amin y Ekhmaj, 2006; Elmaloglou y 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 lo anterior, este estudio tuvo como objetivo desarrollar ecuaciones para predecir el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor, en tres texturas de suelo en campo con riego por goteo superficial.

1.1 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. Por lo cual se han desarrollado varios modelos empíricos, analíticos y numéricos, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards, para predecir los patrones de humedecimiento del suelo con riego por goteo (Cook et al., 2006; Kandelous y Simunek, 2010). En este sentido se han realizado varios estudios por determinar la distribución y el patrón de humedecimiento del agua en el suelo, a través del uso de sofisticados modelos analíticos y numéricos (Dasberg y Or, 1999). 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 (Kandelous y Simunek, 2010; Nafchi et al., 2011); 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 (Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997). Por su parte, los modelos empíricos se han desarrollado, típicamente, a través del uso de análisis de regresión de las observaciones o datos de campo (Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997; Kandelous y Simunek, 2010). Por lo cual, estos modelos empíricos o semi-empíricos son más convenientes de usar para el diseño y operación de estos sistemas de riego, que los modelos analíticos y numéricos (Amin y Ekhmaj, 2006; Nafchi et al., 2011).

Con fundamento en lo antes mencionado y en una selección de variables con el método Stepwise; además, congruente con las aproximaciones introducidas por Shwartzman y Zur (1986) y Amin y Ekhmaj (2006), la relación no lineal entre las variables explicativas respecto al avance del agua en los bulbos de humedecimiento 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); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$, y β_5 son los coeficientes de regresión; V = volumen de agua aplicada (L³); Q = gasto 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 (%).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en tres texturas de suelo localizados en la región lagunera de Coahuila, México. El primero fue franco limoso, ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. El segundo un franco arcilloso, localizado en el Instituto Tecnológico de Torreón y el tercero un franco arenoso, situado en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, ubicado en Matamoros Coahuila.

Para las pruebas en campo, se diseñó e instaló un sistema de riego por goteo superficial. El sistema de riego se integró con un depósito 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 microtubo de polietileno de 5/8 mm de diámetro y emisores. Los microtubos se colocaron sobre la línea regante a una separación de 1.5 m. El emisor se instaló al final de cada microtubo.

Se realizaron tres pruebas en cada suelo para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos. Las pruebas consistieron en la aplicación de tres volúmenes diferenciados de agua en el suelo con el sistema de riego mencionado. La primera prueba se realizó con emisores de gastos nominales de 5.55X10⁻⁷ m³ s⁻¹ a 0.5, 1.0, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 6.5 y 8.0 horas de riego. Las otras dos pruebas se realizaron con emisores de gastos nominales de 1.11X10⁻⁶ y 2.22X10⁻⁶ m³ s⁻¹ respectivamente a igual tiempo de riego que la primera prueba.

2.1. Variables medidas

2.1.1 Parámetros físicos e hidráulicos del suelo

Se determinó la proporción de partículas constitutivas, de cada uno de los suelos estudiados, con el método del hidrómetro de Bouyoucos, y la clasificación textural se realizó con el triángulo de texturas. También se determinó el contenido de humedad en cada suelo con el método gravimétrico, antes de cada prueba, a la profundidad señalada en el Cuadro 1. La determinación *in situ* de la conductividad hidráulica saturada del suelo se realizó con el permeámetro de Guelph. Se utilizaron dos cargas hidráulicas, de 5 y 10 cm, de acuerdo al procedimiento descrito por Reynolds y Elrick (1985; 2002). Además se modelaron los parámetros de la curva de retención de agua y conductividad hidráulica saturada de los suelos estudiados (Cuadro 2), a partir de funciones de edafotransferencia utilizando el programa informático ROSETTA versión: 1.2, desarrollado por Schaap et al., (2001). El cual utiliza las relaciones constitutivas de Van Genuchten-Mualem (1980) en sus estimaciones (Skaggs et al., 2004; Kandelous y Simunek, 2010):

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

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

donde:

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

donde; θ_s y θ_r son los contenidos de agua a saturación y residual; k_s es la conductividad hidráulica saturada; α , n y L son parámetros que influyen en la forma de la función de retención de agua.

2.1.2 Patrón de humedecimiento en el bulbo

El patrón de la distribución del agua bajo los emisores se obtuvo por medición directa del frente de humedecimiento (avance lateral y vertical) en el suelo en campo de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Finalizado el tiempo de riego de cada emisor, se midió el área de humedecimiento superficial del suelo bajo el 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).
- Se midió el frente de humedecimiento en las direcciones horizontal y vertical.

Cuadro 1; Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos en los que se realizaron las pruebas.

Clase Textural	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Humedad Inicial (cm ³ cm ⁻³)	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Conductividad Hidráulica Saturada (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	

Cuadro 2; Parámetros hidráulicos de los suelos obtenidos a partir de funciones de edafotransferencia con el programa informático ROSETTA (Schaap et al., 2001).

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

θ_s y θ_r son el contenido de agua a saturación y residual; k_s es la conductividad hidráulica saturada; α , n y L son parámetros que influyen en la forma de la función de retención de agua.

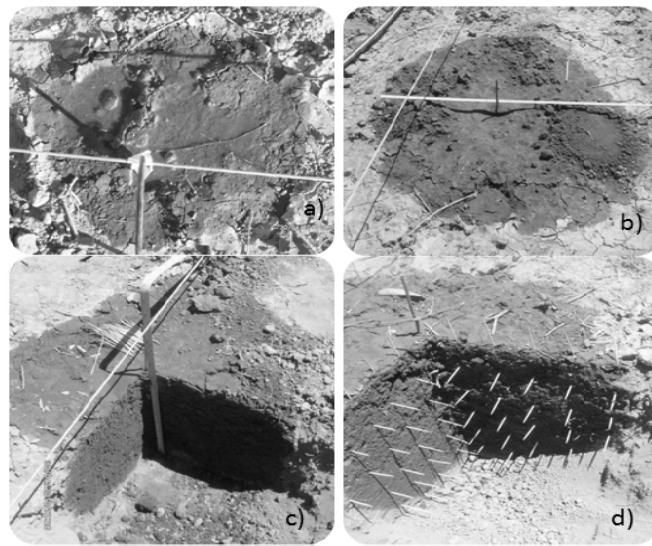


Figura 1; Bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor. a) Aplicación de agua por el emisor, b) superficie de suelo humedecido, c) perfil del suelo humedecido, d) extensión de suelo humedecido (cuadrícula en x, y, z, centrado en el punto fuente).

2.2 Análisis de datos

Para determinar los coeficientes de las ecuaciones 1 y 2, se usó la información de la distribución (avance lateral y vertical) del agua bajo los emisores en el suelo en campo y datos de las características físicas e hidráulicas de los suelos estudiados, reportados en el Cuadros 1 y 2. Como estas variables presentan una relación no lineal respecto a las variables dependientes, se han hecho intrínsecamente lineales, a través de una transformación logarítmica, para facilitar el procedimiento de análisis y estimación de los coeficientes para cada una de ellas (Amin y Ekhmaj, 2006). Por lo cual, en el análisis de la información se utilizó un procedimiento de regresión lineal múltiple.

3. RESULTADOS

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

Las ecuaciones 6 y 7 relacionan a las variables que influyen en el avance del agua en el bulbo de humedecimiento 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); Q = gasto del emisor ($m^3 s^{-1}$); K_s = conductividad hidráulica saturada ($m s^{-1}$); θ_v = contenido de humedad inicial del suelo ($m^3 m^{-3}$); θ_r = contenido de humedad residual del suelo ($m^3 m^{-3}$); L_i = contenido de limo (%).

El avance lateral (r) es función del volumen de agua aplicada, conductividad hidráulica saturada y contenido de humedad inicial del suelo. Los coeficientes de significancia parciales (prueba t) para cada variable son 24.85, -3.93 y -7.45 respectivamente, con coeficiente de determinación múltiple de 0.906 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, gasto del emisor, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo. Los coeficientes de significancia parciales para cada variable son 20.06, -4.55, 4.10, 3.92 y -8.31 respectivamente, con coeficiente de determinación múltiple de 0.939 y una $P (F > 194.74) \leq 0.01$.

3.2 Forma y extensiones de los bulbos de humedecimiento bajo un emisor

Se reporta solamente el lado derecho del frente de humedecimiento de los bulbos obtenido en campo, debido a que se asume que el avance del frente es simétrico en el suelo (Figura 2). Además, la proporción de variación en el avance lateral y vertical del agua en los bulbos de humedecimiento entre los suelos y volúmenes de agua aplicados, se pueden apreciar en el Cuadro 3.

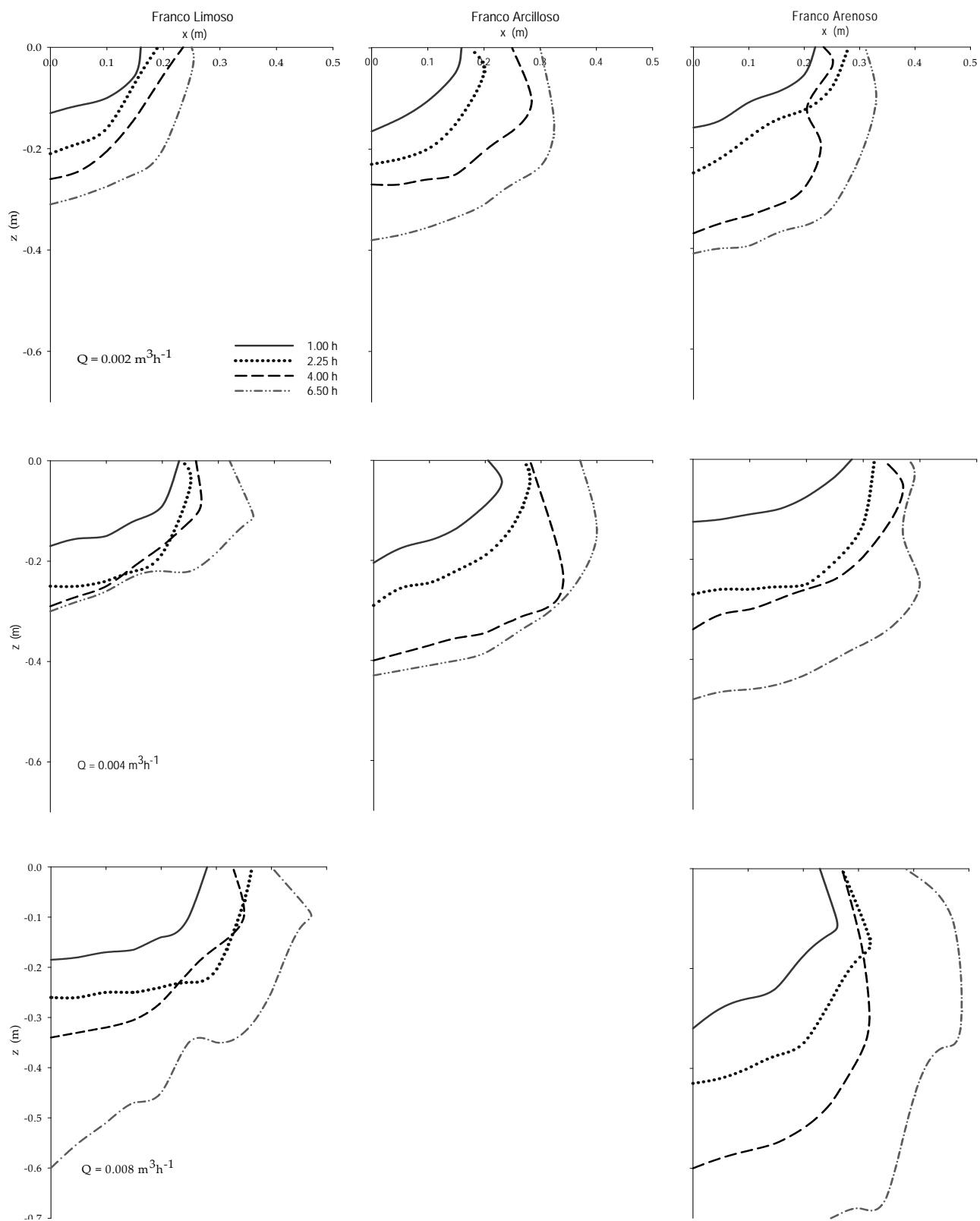


Figura 2; Frente de humedecimiento en los perfiles de los suelos estudiados, después 1.0, 2.25, 4.0 y 6.5 horas de riego.

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

Q (m ³ h ⁻¹)	Franco		Franco		Franco	
	Limoso – Arcilloso		Limoso - Arenoso		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		

4. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, las ecuaciones 6 y 7 predicen la distribución del agua en el bulbo de humedecimiento de los suelos estudiados con una confiabilidad del 90 y 94 % respectivamente. El avance lateral (r) y vertical (Z) del agua en el bulbo se explica por la relación entre el volumen de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo. Por otro lado, se nota 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) de 24.85 y 20.06 respectivamente. De manera similar, 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) y Gil-Marín (2001). Entonces la extensión del bulbo de humedecimiento que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en cualquiera de estos suelos estudiados depende, por orden de importancia, del volumen de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo en el suelo (Amin y Ekhmaj, 2006; Nafchi et al., 2011).

Por otra parte, el agua que aplican los emisores en el suelo se distribuye formando, en términos generales, figuras elipsoidales truncadas que aumentan su extensión hasta que la velocidad de infiltración del suelo se iguala con el flujo de agua que aporta el emisor (Zur, 1996). En la Figura 2, se observa que a volúmenes pequeños de agua aplicada, se obtienen formas elípticas con elongaciones horizontales, incluso en el suelo franco arenoso. Pero a medida que aumenta el gasto del emisor ó el tiempo de aplicación del agua, el avance vertical se hace más pronunciado; es decir, la elipse se elonga de manera vertical en las tres texturas de suelo (Cote et al., 2003; Lazarovitch et al., 2007; Hao et al., 2007). Este incremento en el avance vertical se puede constatar con la información reportada en el Cuadro 3, donde a un mismo volumen de agua aplicada para cada suelo, la variación en el avance lateral del agua oscila alrededor del 1 % y en el avance vertical va del 4 al 17 %. Es decir que conforme el tiempo de aplicación del agua aumenta, el avance lateral se estabiliza y la vertical aumenta (Li et al., 2003). En este fenómeno

de infiltración y redistribución del agua en el suelo, se obtiene un volumen de mojado a partir de distintas combinaciones entre el avance lateral y vertical del agua. Por eso es importante señalar que 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.

5. CONCLUSIONES

Las ecuaciones desarrolladas en este trabajo, predicen la distribución lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de los suelos estudiados, con una confiabilidad del 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, gasto 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 elongaciones horizontales, pero a medida que aumenta el tiempo de aplicación del agua ó el gasto 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.

6. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- AINECHEE, G., S. BAROORMAND-NASAB and M. BEHZAD. Simulation of soil wetting pattern under point source trickle irrigation. *Journal of Applied Sciences*. 2009, 9(6): 1170-1174
- AMIN, M.S.M., and A.I.M. EKHMAJ. DIPAC-Drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th international micro irrigation congress, 10–16 Sept, 2006. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ARBAT, G., J. BARRAGÁN, J.PUIG, R. POCH y F. RAMÍREZ DE CARTAGENA. Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo Hydrus-2D y SIMDAS en riego localizado. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. 2003, 6: 279-288
- COOK, F.J., P. FITCH, P. THORBURN, P.B. CHARLESWORTH and K.L. BRISTOW. Modelling Trickle Irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental Modelling & Software*. 2006, 21(9): 1353-1359.
- COTE, C.M., K.L. BRISTOW, P.B. CHARLESWORTH, F.J. COOK and P.J. THORBURN. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci*. 2003, 22: 143–156.
- DASBERG, S, and D. OR. Drip irrigation. Springer-Verlag. New York, 1999. 162 pp.
- ELMALOGLU, S. and DIAMANTOPOULOS E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural Water Management*. 2009, 96: 1587–1595.
- GIL-MARÍN, J. A. Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. *Revista UDO Agrícola*. 2001, 1(1): 42-47
- HAO, A., MARUI A., HARAGUCHI T and NAKANO Y. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ*. 2007, 52(1): 187–193
- KANDELOUS, M. M. K. and J. SIMUNEK. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig Sci*. 2010, 28: 435–444.
- KANDELOUS, M. M., A. LIAGHAT and F. ABBASI. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. *J Agri Sci*. 2008, 39(2): 371–378

- KANDELOUS, M. M., J. SIMUNEK., M. TH. VAN GENUCHTEN and K. MALEK. Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2011, 75(2): 488–497
- LAZAROVITCH, N., A. W. WARRICK, A. FURMAN, and J. SIMUNEK. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone Journal*. 2007, 6: 116–123
- LI, J., J. ZHANG and R. LI. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. *Irrig Sci.* 2003, 22: 19–30
- MAIA, C. E., S. LUIZ A. L., J. FRANCISMAR y J. DANTAS. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Revista Ciência Agronômica*. 2010, 41(1): 149-158.
- MMOLAWA, K. and OR D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review *Plant and Soil*. 2000, 222: 163-190.
- NAFCHI, R. F., F. MOSAVI and K. PARVANAK. Experimental study of shape and volume of wetted soil in trickle irrigation method. *African Journal of Agricultural Research*. 2011, 6(2): 458-466
- RAMÍREZ DE CARTAGENA, B. F y M. A. SÁINZ-SÁNCHEZ. Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo. *Ingeniería del Agua*. 1997, 4(1): 57-70
- REYNOLDS, W. D. and D. E. ELRICK. 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*, 1985. Denver, Co.
- REYNOLDS, W. D., D.E. ELRICK, E.G. YOUNGS, A. AMOOZEGAR, H.W.G. BOOLTINK and J. BOUMA. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, USA. 2002, : 797-878.
- RUIZ-CANALES, A., V. PLANA, M.C. RUIZ-SÁNCHEZ, J.A. FRANCO y J. M. ABRISQUETA. 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*. 2005, 7: 263 -268
- SCHAAP, M.G., F.J. LEIJ and M. TH. VAN GENUCHTEN. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*. 2001, 251: 163-176
- SCHWARTZMAN, M. and ZUR B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J Irrig Drain Eng*. 1986, 112(3): 242–253
- SINGH, D. K., T.B.S. RAJPUTB, D.K. SINGHB, H.S. SIKARWARC, R.N. SAHOOD and T. AHMAD. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management*. 2006, 83(1-2): 130-134
- SIYAL, A.A. and T.H. SKAGGS. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 2009, 96: 893–904
- SKAGGS, T. H., T. J. TROUT, J. SIMUNEK and P. J. SHOUSE. Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2004, 130(4):304-310
- ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrig Sci.* 1996, 16: 101-105

CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1; Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos en los que se realizaron las pruebas.

Cuadro 2; Parámetros hidráulicos de los suelos obtenidos a partir de funciones de edafotransferencia con el programa informático ROSETTA (Schaap et al., 2001).

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

Figura 1; 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, centrado en el punto fuente).

Figura 2; Frente de humedecimiento en los perfiles de los suelos estudiados, después 1.0, 2.25, 4.0 y 6.5 horas de riego.

VALIDACIÓN DE UN MODELO PARA ESTIMAR LA EXTENSIÓN DEL BULBO DE HUMEDECIMIENTO DEL SUELO CON RIEGO POR GOTEO

VALIDATION OF A MODEL TO ESTIMATE THE WETTING BULB DIMENSION OF THE SOIL IN TRICKLE IRRIGATION

Cruz Bautista Fidencio^{1*}, Álvarez Reyna Vicente¹, Zermeño González Alejandro², Pedro Cano Ríos¹, Rivera González Miguel³ y Siller González Pico Mario⁴

^{1,1} *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, Periférico y Carretera a Santa Fe, Torreón Coahuila, México C.P. 27000.*

²*Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México C.P. 25315.* ³*Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera. Gómez Palacio Durango, México C.P. 35140.* ⁴ *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional – Unidad Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México, 45015. *Email: fcruz1975@yahoo.com.mx*

RESUMEN

Para incrementar la eficiencia de los sistemas de riego localizado en la aplicación del agua, es prerequisite conocer la dinámica de la distribución del agua bajo los emisores, pues esta característica influye de manera significativa en su diseño y operación. Por lo cual se han desarrollado varios modelos empíricos, analíticos y numéricos, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards, para predecir los patrones de humedecimiento del suelo con riego por goteo. Pero es necesario validar muchos de estos modelos en condiciones de campo. Por lo anterior, el objetivo en este estudio fue validar un Modelo experimental para predecir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor. Se realizó una comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos con el Modelo, y los obtenidos con los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), Kandelous et al., (2008) y mediciones en campo. Para evaluar el desempeño del Modelo experimental, se evaluaron los índices coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RECM). Estos estadísticos de comparación muestran que el Modelo experimental predice el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente. También los estadísticos de comparación indican que la mejor aproximación en la predicción se obtiene cuando se usan gastos de descarga de emisor de 1.11×10^{-6} y $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Palabras claves: Modelo matemático, simulación, volumen de suelo mojado, riego por goteo, patrón de humedecimiento

ABSTRACT

To increase the trickle irrigation systems efficiency in the water supply is a prerequisite to know the dynamics of the water distribution beneath the emitters, because this feature has significant influence in its design and manage. For this reason, several empirical, analytical and numerical models have been developed, from experimental observation and by solve the Richards equation, to predict the wetting patterns of the soil under trickle irrigation. However it is necessary to validate many of these models under field conditions. Therefore the objective in this study was to validate an experimental model to predict the water advance in the wetted bulb of the soil beneath an emitter. A quantitative comparison between the results from the experimental model, Schwartzman and Zur (1986), Amin and Ekhmaj (2006), Kandelous et al., (2008) and the wetted soil bulbs dimension at field were done. To evaluate the performance of the experimental Model, the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE) performance indicators were calculate. This performance indicators showed that the experimental Model

can be predicts the lateral and vertical water advance in the wetted bulb of the soil with a reliability of 91 and 96 % respectively. Moreover, this indicators shown that the best approximation in the predictions are achieve when it use emitter discharges from 1.11×10^{-6} and $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Key words: Mathematical model, simulation, wetted soil volume, drip irrigation, wetting-pattern.

1. INTRODUCCION

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 localizados. Sin embargo la distribución del agua bajo el emisor se puede obtener únicamente 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 que permitan simular el movimiento del agua en el suelo (Gil-Marín, 2001; Arbat et al., 2003; Ainechee, 2009). Por lo cual se han hecho varios intentos por determinar el patrón de humedecimiento del agua en el suelo, a través del uso de diversos modelos empíricos, analíticos y numéricos, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards (Dasberg y Or, 1999; Cook et al., 2006; Kandelous y 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 (Kandelous y Simunek, 2010; Nafchi et al., 2011); muchos de ellos no están validados ó probados en condiciones de campo. Además no existen modelos que consideren los distintos horizontes del perfil del suelo con propiedades físicas e hidráulicas diferenciadas. 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 y Sáinz, 1997). Por su parte, los modelos empíricos se han desarrollado, típicamente, a través del uso de análisis de regresión de las observaciones o datos de campo (Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997; Kandelous y 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 para un emisor superficial tipo fuente. Amin y Ekhmaj (2006) verificaron este modelo con datos experimentales e incluyeron el contenido de agua del suelo a saturación como un parámetro más de predicción. Posteriormente, Ainechee et al., (2009) y Nafchi et al., (2011) también verificaron este modelo en tres tipos de suelo, en condiciones de laboratorio y reportan que se consiguen buenos ajustes entre los valores simulados y los observados. Sin embargo, aun no se validan plenamente estas ecuaciones en condiciones de campo y bajo diferentes texturas de suelo.

Por lo anterior, el objetivo en este trabajo fue evaluar la validez de un Modelo experimental para predecir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento. Para lograr esto, se realizó una comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos con el Modelo experimental, mediciones en campo y los obtenidos con los modelos de Schwartzman y Zur (1986); Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous et al., 2008; respecto al movimiento del agua en los bulbos de humedecimiento. Esto con la finalidad de verificar la confiabilidad del Modelo experimental para su uso en el diseño y operación de los sistemas de riego por goteo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El patrón de la distribución del agua en el bulbo de humedecimiento se obtuvo de tres suelos, localizados en la Región Lagunera de Coahuila, México. El primero fue franco limoso, ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. El segundo un franco arcilloso, localizado en el Instituto Tecnológico de Torreón y el tercero un franco arenoso, situado en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, ubicado en Matamoros Coahuila. Se realizaron tres pruebas en cada suelo para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos. Las pruebas consistieron en la aplicación de tres volúmenes diferenciados de agua en el suelo con un sistema de riego por goteo. La primera prueba se realizó con emisores de gastos nominales de $5.55 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a 0.5, 1.0, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 6.5 y 8.0 horas de riego. Las otras dos pruebas se realizaron con emisores de gastos nominales de 1.11×10^{-6} y $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente a igual tiempo de riego que la primera prueba. El sistema de riego se integró con un depósito para agua, cabezal de riego y línea regante. La línea regante se integró por manguera de polietileno de 12.7 mm de diámetro, tramos de microtubo de polietileno de $\frac{5}{8}$ mm de diámetro y emisores de gastos nominales antes mencionados. Los microtubos se colocaron sobre la línea regante a una separación de 1.5 m. El emisor se instaló al final de cada microtubo.

2.1 Patrón de humedecimiento en el bulbo

La dinámica de humedecimiento del agua bajo los emisores se obtuvo por medición directa del avance lateral y vertical del frente húmedo en los bulbos de acuerdo al siguiente procedimiento:

- d) Finalizado el tiempo de riego de cada emisor, se midió el área de humedecimiento superficial del suelo bajo el emisor.
- e) 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).
- f) Se midió el frente de humedecimiento en las direcciones horizontal y vertical.

2.2 Parámetros físicos e hidráulicos del suelo

Se determinó la proporción de partículas constitutivas de cada uno de los suelos estudiados, con el método del hidrómetro de Bouyoucos, y la clasificación textural se realizó con el triángulo de texturas. Además, se determinó el contenido de humedad (antes de cada prueba) en cada suelo con el método gravimétrico, a la profundidad señalada en el Cuadro 1. La determinación *in situ* de la conductividad hidráulica saturada de campo para cada suelo se realizó con el permeámetro de Guelph. Se utilizaron dos cargas hidráulicas, de 0.05 y 0.10 m, de acuerdo al procedimiento descrito por Reynolds y Elrick (1985; 2002). Además se modelaron los parámetros de la curva de retención de agua y conductividad hidráulica saturada de los suelos estudiados (Cuadro 2), a partir de funciones de edafotransferencia utilizando el programa informático ROSETTA (Schaap et al., 2001). El cual utiliza las relaciones constitutivas de Van Genuchten-Mualem (1980) en sus estimaciones (Skaggs et al., 2004; Kandelous y Simunek, 2010):

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

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

donde:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - 1/n \quad (3)$$

donde; θ_s y θ_r son los contenidos de agua a saturación y residual; k_s es la conductividad hidráulica saturada; α , n y L son parámetros que influyen en la forma de la función de retención de agua.

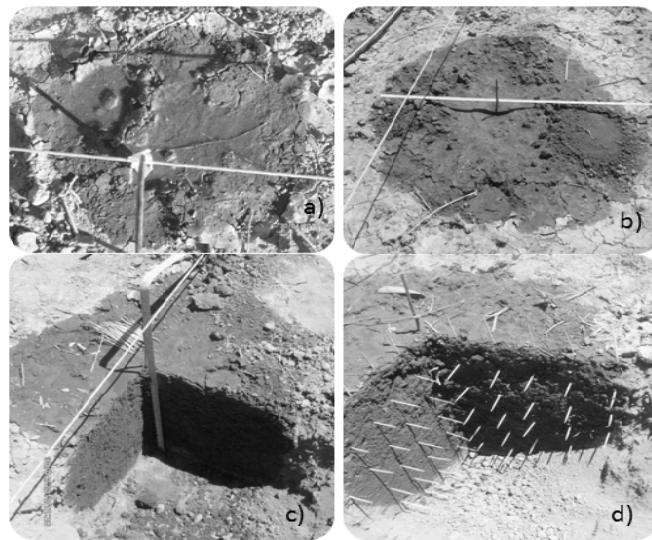


Figura 1; Bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor. a) Aplicación de agua por el emisor, b) superficie de suelo humedecido, c) perfil del suelo humedecido, d) extensión de suelo humedecido (cuadrícula en x, y, z, centrado en el punto fuente).

Cuadro 1; Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos en los que se realizaron las pruebas para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos.

Clase Textural	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Humedad Inicial (cm ³ cm ⁻³)	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Conductividad Hidráulica Saturada (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	

Cuadro 2; Parámetros hidráulicos de los suelos obtenidos a partir de funciones de edafotransferencia con el programa informático ROSETTA (Schaap et al., 2001).

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

θ_s y θ_r son el contenido de agua a saturación y residual; k_s es la conductividad hidráulica saturada; α , n y L son parámetros que influyen en la forma de la función de retención de agua.

2.3 Modelos de comparación

Modelo experimental

Fundamentado en las aproximaciones introducidas por Schwartzman y Zur (1986) y Amin y Ekhmaj (2006), las ecuaciones 4 y 5 se derivaron del estudio de los patrones de distribución del agua en el bulbo de humedecimiento (Figura 1), medidos en tres suelos, en campo (Cuadro 1) y en una selección de variables con el método Stepwise. Por consiguiente la relación no lineal entre las variables explicativas respecto al avance del agua en los bulbos de humedecimiento se expresa como:

$$r = 0.14 V^{0.353} K_s^{-0.110} \theta_v^{-0.387} \quad (4)$$

$$Z = 7.906 V^{0.458} Q^{-0.152} \theta_v^{0.386} \theta_r^{0.349} L_i^{-0.421} \quad (5)$$

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

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 la 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 se desarrolló a partir de resultados experimentales obtenidos en dos suelos, con conductividades hidráulicas saturadas de 2.49×10^{-6} y $2.49 \times 10^{-5} m s^{-1}$, y con descargas de emisor de 1.19×10^{-6} y $5.69 \times 10^{-6} m^3 s^{-1}$. El modelo simplificado de Schwartzman y Zur para determinar la geometría del volumen mojado del suelo es:

$$w = 1.82 (V)^{0.22} \left(\frac{K_s}{Q} \right)^{-0.17} \quad (6)$$

$$z = 2.54 (V)^{0.63} \left(\frac{K_s}{Q} \right)^{0.45} \quad (7)$$

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

Modelo de Amin y Ekhmaj (2006)

Amin y Ekhmaj (2006) desarrollaron las siguientes ecuaciones para estimar los avances horizontal y vertical del frente de humedecimiento, a través de un análisis de regresión no lineal. Los datos experimentales provienen de cuatro tipos de suelo, con emisor superficial y gastos de descarga de 5.83×10^{-7} a $2.166 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$$R = 0.2476 \Delta\theta^{-0.562} V^{0.268} Q^{-0.0028} K_s^{-0.034} \quad (8)$$

$$Z = 2.0336 \Delta\theta^{-0.383} V^{0.365} Q^{-0.101} K_s^{0.195} \quad (9)$$

donde R y Z son las dimensiones horizontal y vertical del patrón de humedecimiento, respectivamente (m), $\Delta\theta$ es el contenido volumétrico promedio de agua detrás del frente de humedecimiento ($\Delta\theta = \theta_s/2$; donde θ_s es el contenido de humedad a saturación), V es el volumen total de agua aplicada (m^3), Q es el gasto de descarga del emisor ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) y K_s es la conductividad hidráulica saturada del suelo (m s^{-1}).

Modelo de Kandelous et al., (2008)

Kandelous et al., (2008) desarrollaron las ecuaciones 10 y 11 para estimar los avances horizontal y vertical del frente de humedecimiento a partir de un emisor subsuperficial usando un método de análisis dimensional.

$$w = 4.244 (V)^{0.526} \left(\frac{K_s}{Q z} \right)^{0.026} \quad (10)$$

$$Z = 0.66 (V)^{0.333} \left(\frac{K_s}{Q z} \right)^{-0.167} \quad (11)$$

donde w y Z son las dimensiones horizontales y verticales del patrón de humedecimiento (m), V es el volumen de agua aplicado que se infiltra en el suelo (m^3), Q es el gasto de descarga del emisor ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), K_s es la conductividad hidráulica saturada (m s^{-1}) y z es la profundidad de instalación del emisor (m). Estas ecuaciones se derivaron de datos experimentales obtenidos de un suelo arcilloso, con riego por goteo subsuperficial a una descarga del emisor de $2.79 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

2.4 Análisis estadístico

Para evaluar el desempeño del Modelo experimental, se realizó una comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos con el Modelo, mediciones en campo y los obtenidos con los modelos de Schwartzman y Zur (1986); Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous et al., (2008); respecto al avance lateral y vertical del agua en los bulbos de humedecimiento. Se evaluaron los índices coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RECM), acorde con la metodología reportada por Siyal y Skaggs (2009), Nafchi et al., (2011) y Kandelous et al., (2011); donde:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

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

3. RESULTADOS

En los Cuadros 3 y 4 se muestra la comparación entre los resultados modelados y los medidos en campo, para el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento. También, la comparación de estos resultados respecto al avance del agua en el bulbo de humedecimiento y volumen de agua aplicada, para cada suelo, se observa en la Figura 2.

Cuadro 3; Comparación de resultados modelados y mediciones en campo, respecto al avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, en función de la textura del suelo y gasto de emisor.

Modelo	Textura de Suelo	Q (m ³ s ⁻¹)	R ²		R E C M (m)		
			Av. Lateral	Av. Vertical	Av. Lateral	Av. Vertical	
Modelo Experimental	Franco Limoso	5.56X10 ⁻⁷	0.87	0.93	0.022	0.024	
		1.11X10 ⁻⁶	0.88	0.95	0.024	0.026	
		2.22X10 ⁻⁶	0.93	0.98	0.041	0.041	
	Franco Arcilloso	5.56X10 ⁻⁷	0.93	0.95	0.020	0.020	
		1.11X10 ⁻⁶	0.98	0.93	0.024	0.033	
		Franco Arenoso	5.56X10 ⁻⁷	0.90	0.91	0.039	0.041
	Schwartzman y Zur (1986)	Franco Limoso	5.56X10 ⁻⁷	0.87	0.94	0.025	0.118
			1.11X10 ⁻⁶	0.84	0.72	0.043	0.064
			2.22X10 ⁻⁶	0.94	0.80	0.044	0.079
Franco Arcilloso		5.56X10 ⁻⁷	0.93	0.93	0.053	0.093	
		1.11X10 ⁻⁶	0.90	0.30	0.074	0.187	
		Franco Arenoso	5.56X10 ⁻⁷	0.89	0.80	0.112	0.258
Amin y Ekhmaj (2006)		Franco Limoso	5.56X10 ⁻⁷	0.87	0.97	0.022	0.016
			1.11X10 ⁻⁶	0.86	0.78	0.025	0.040
			2.22X10 ⁻⁶	0.94	0.83	0.053	0.112
	Franco Arcilloso	5.56X10 ⁻⁷	0.94	0.94	0.039	0.045	
		1.11X10 ⁻⁶	0.97	0.75	0.052	0.122	
		Franco Arenoso	5.56X10 ⁻⁷	0.82	0.87	0.044	0.046
	Kandelous et al., (2008)	Franco Limoso	5.56X10 ⁻⁷	0.85	0.96	0.055	0.150
			1.11X10 ⁻⁶	0.88	0.95	0.049	0.149
			2.22X10 ⁻⁶	0.93	0.97	0.046	0.210
Franco Arcilloso		5.56X10 ⁻⁷	0.94	0.94	0.075	0.182	
		1.11X10 ⁻⁶	0.98	0.85	0.098	0.207	
		Franco Arenoso	5.56X10 ⁻⁷	0.72	0.94	0.118	0.233
			1.11X10 ⁻⁶	0.92	0.93	0.098	0.221
			2.22X10 ⁻⁶	0.96	0.98	0.049	0.380

Cuadro 4: Coeficiente de determinación y error de estimación de resultados modelados y medidos en campo, respecto al avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento.

Modelo	Coeficiente múltiple de determinación (R^2)		Error estándar de estimación (%)	
	Av. Lateral	Av. Vertical	Av. Lateral	Av. Vertical
Modelo Experimental	0.91	0.96	2.7	3.0
Schwartzman y Zur (1986)	0.70	0.66	4.4	13.9
Amin y Ekhmaj (2006)	0.86	0.82	2.9	4.6
Kandelous et al., (2008)	0.85	0.66	2.8	4.3

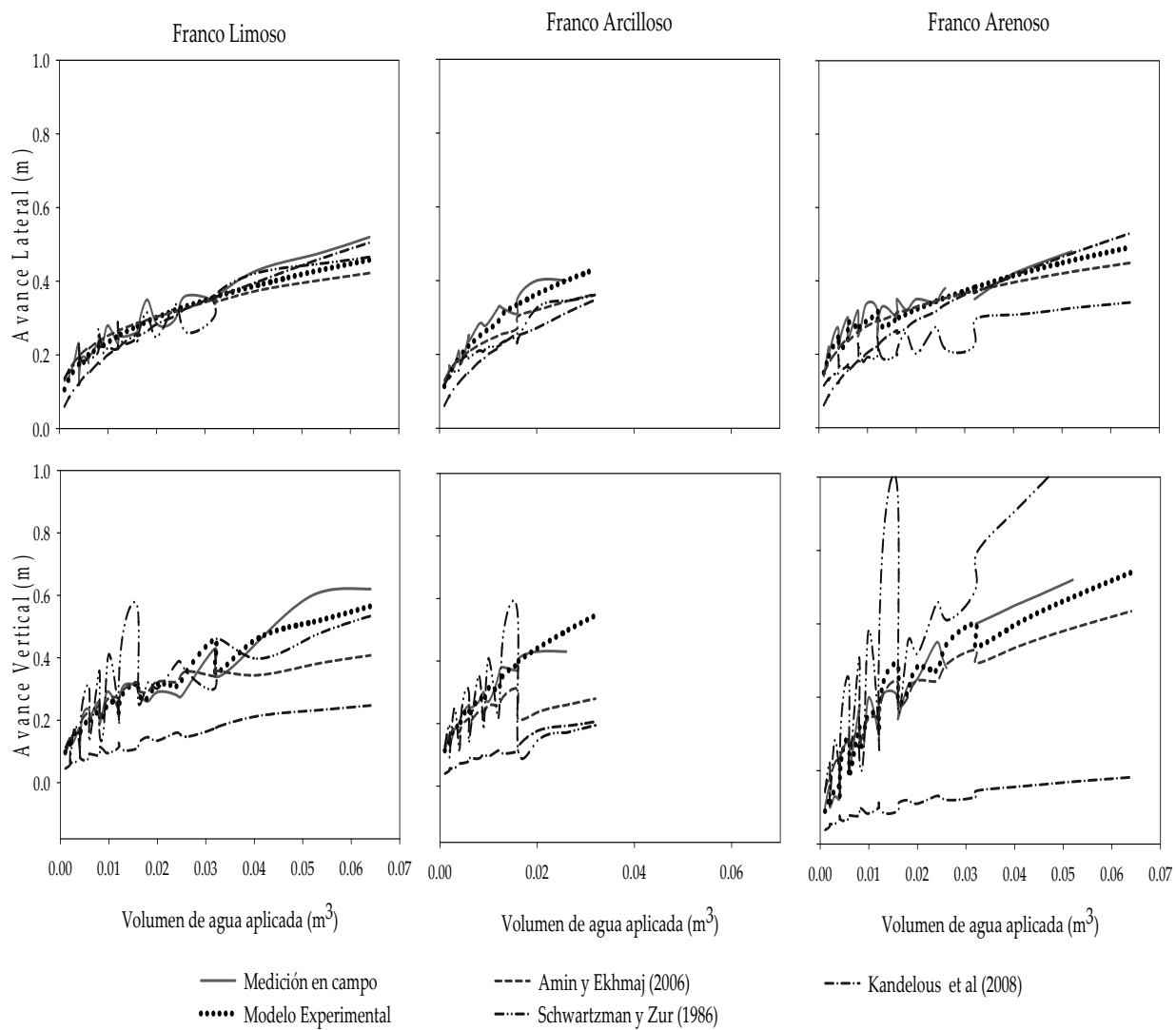


Figura 2: Mediciones realizadas en campo y resultados modelados, respecto al avance del agua en el bulbo de humedecimiento, en función del volumen de agua aplicada.

4. DISCUSIÓN

En este trabajo se evaluó la eficacia de un Modelo experimental para predecir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento. Para lo cual, se realizó una comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos con el Modelo experimental, y los obtenidos con los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), Kandelous et al., (2008) y mediciones en campo. Para esto, se evaluaron los índices coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RECM). Estos estadísticos de comparación muestran que la mejor aproximación se obtiene con el Modelo experimental, ya que predice el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente. (Cuadro 3 y 4). Lo cual se contrasta con la relación entre el volumen de agua aplicada y el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento que se observa en la Figura 2.

Por otro lado, la R^2 indica que el mejor ajuste entre los datos observados en campo y modelados, respecto al avance lateral del agua en el bulbo húmedo se obtiene en el suelo franco arcilloso y para el avance vertical el mejor ajuste se obtiene en los suelos franco limoso y arenoso. Pero la raíz del error cuadrático medio (RECM) indica que los menores errores de estimación se obtienen en los suelos franco limoso y arcilloso, tanto para el avance lateral como el vertical. No obstante, cabe señalar que los índices de comparación no necesariamente deben de coincidir en declarar la mejor aproximación para un tipo de suelo o gasto de descarga de emisor específico. Puesto que la R^2 deriva de la correlación lineal entre los resultados y la RECM indica la capacidad del modelo para predecir el comportamiento de la variable dependiente. Sin embargo estos índices de comparación indican que la mejor aproximación en la predicción se obtiene cuando se usan gastos de descarga de emisor de 1.11×10^{-6} y $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para cualquiera de los tres suelos estudiados. Pues para el gasto de descarga de emisor de $5.55 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se tiene menor ajuste tanto de la R^2 como de la RECM (Cuadro 3).

Respecto a la relación entre el volumen de agua aplicada y el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento que se observa en la Figura 2, el Modelo experimental predice estos avances con un alto grado de aproximación respecto a las mediciones realizadas en campo. En cambio, los modelos de Schwartzman y Zur (1986); Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous et al., (2008), tienden a subestimar o sobrestimar estos avances del agua en el bulbo de humedecimiento. La capacidad del Modelo experimental para hacer una mejor predicción del avance del agua en el bulbo de humedecimiento, para cualquier volumen de agua aplicada, respecto a los otros tres modelos se debe a que considera variables relacionadas con el contenido de agua en el suelo (Kandelous y Simunek, 2010). Además, que incluye al contenido de limo del suelo como una variable más de predicción. De lo anterior se puede señalar que, para obtener mejores predicciones del patrón de distribución del agua en los bulbos de humedecimiento en los suelos, es necesario considerar también variables relacionadas con el contenido de agua y limo en el suelo. Además, de considerar las propiedades físicas e hidráulicas diferenciadas de los distintos horizontes del perfil del suelo (Ramírez de Cartagena y Sáinz, 1997).

Por lo anterior, se concluye que el Modelo experimental desarrollado en este estudio se puede utilizar para predecir ó modelar el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, para estas texturas de suelo, con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente (Cuadro 4). Además se demuestra que, la forma y dimensión del bulbo de humedecimiento, que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en el suelo, depende del volumen total de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual, y contenido de limo en el suelo (Amin y Ekhmaj, 2006; Kandelous y Simunek, 2010; Nafchi et al., 2011).

5. CONCLUSIONES

El Modelo experimental presentado en este documento se puede utilizar para predecir ó modelar el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente, para las texturas de suelo estudiados. La mejor aproximación en la predicción del movimiento del agua en el bulbo de humedecimiento se obtiene cuando se usan gastos de descarga de emisor de 1.11×10^{-6} y $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Por otro lado, la capacidad de este modelo para hacer una mejor predicción del movimiento del agua en el bulbo de humedecimiento para cualquier volumen de agua aplicada respecto a los modelos de Schwartzman y Zur (1986); Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous et al., (2008), se debe a que considera variables relacionadas con el contenido de humedad inicial y residual, y contenido de limo en el suelo. Por lo tanto, para obtener buenas predicciones del patrón de distribución del agua en los bulbos de humedecimiento en los suelos, es necesario considerar variables relacionadas con el contenido de agua y propiedades físicas e hidráulicas diferenciadas de los distintos horizontes del perfil del suelo.

6. BIBLIOGRAFÍA CITADA.

- AINECHEE, G., S. BAROORMAND-NASAB and M. BEHZAD. Simulation of soil wetting pattern under point source trickle irrigation. *Journal of Applied Sciences*. 2009, 9(6): 1170-1174
- AMIN, M.S.M., and A.I.M. EKHMAJ. DIPAC-Drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th international micro irrigation congress, 10–16 Sept, 2006. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ARBAT, G., J. BARRAGÁN, J.PUIG, R. POCH y F. RAMÍREZ DE CARTAGENA. Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo Hydrus-2D y SIMDAS en riego localizado. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. 2003, 6: 279-288
- COOK, F.J., P. FITCH, P. THORBURN, P.B. CHARLESWORTH and K.L. BRISTOW. Modelling Trickle Irrigation: Comparison of Analytical and Numerical Models For Estimation of Wetting Front Position with Time. *Environmental Modelling & Software*. 2006, 21(9): 1353-1359.
- DASBERG, S, and D. OR. Drip irrigation. Springer-Verlag. New York, 1999. 162 pp.
- GIL-MARÍN, J. A. Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. *Revista UDO Agrícola*. 2001, 1(1): 42-47
- KANDELOUS, M. M., J. SIMUNEK., M. TH. VAN GENUCHTEN and K. MALEK. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2011, 75(2):488–497
- KANDELOUS, M. M. K. and J. SIMUNEK. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig Sci.* 2010, 28: 435–444.
- KANDELOUS, M. M., A. LIAGHAT and F. ABBASI. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. *J Agri Sci.* 2008, 39(2): 371–378
- NAFCHI, R. F., F. MOSAVI and K. PARVANAK. Experimental study of shape and volume of wetted soil in trickle irrigation method. *African Journal of Agricultural Research*. 2011, 6(2): 458-466
- RAMÍREZ DE CARTAGENA, B. F y M. A. SÁINZ-SÁNCHEZ. Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo. *Ingeniería del Agua*. 1997, 4(1): 57-70
- REYNOLDS, W. D. and D. E. ELRICK. 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*, 1985. Denver, Co.
- REYNOLDS, W. D., D.E. ELRICK, E.G. YOUNGS, A. AMOOZEGAR, H.W.G. BOOLTINK and J. BOUMA. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, USA. 2002, : 797-878

- SCHAAP, M.G., F.J. LEIJ and M. TH. VAN GENUCHTEN. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*. 2001, 251: 163-176
- SCHWARTZMAN, M. and ZUR B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J Irrig Drain Eng*. 1986, 112(3): 242-253
- SIYAL, A.A. and T.H. SKAGGS. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 2009, 96: 893-904
- SKAGGS, T. H., T. J. TROUT, J. SIMUNEK and P. J. SHOUSE. Comparison of HYDRUS-2D Simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2004, 130(4):304-310

CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1; Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos en los que se realizaron las pruebas para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos.

Cuadro 2; Parámetros hidráulicos de los suelos obtenidos a partir de funciones de edafotransferencia con el programa informático ROSETTA (Schaap et al., 2001).

Cuadro 3; Comparación de resultados modelados y mediciones en campo, respecto al avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, en función de la textura del suelo y gasto de emisor.

Cuadro 4; Coeficiente de determinación y error de estimación de resultados modelados y medidos en campo, respecto al avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento.

Figura 1; 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, centrado en el punto fuente).

Figura 2; Mediciones realizadas en campo y resultados modelados, respecto al avance del agua en el bulbo de humedecimiento, en función del volumen de agua aplicada.

CAPÍTULO3: DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

3.1. Discusión general

El propósito en esta tesis fue el desarrollo de un modelo experimental para la predicción de la distribución del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo. La principal finalidad del modelo experimental es proporcionar un soporte en la proyección del diseño agronómico de los sistemas de riego por goteo superficial. Las variables que deben determinarse en esta etapa del diseño son el intervalo entre riegos, el número de emisores por planta, las necesidades totales de agua de riego, el volumen de emisión y el tiempo de riego. Para la determinar estas variables es necesario conocer cuál es la profundidad y el área mojada por un emisor para unas determinadas condiciones de riego (caudal y volumen de emisión). Cuando se utiliza el proceso de diseño clásico, la realización de pruebas de campo permite conocer para un determinado caudal y varios volúmenes de emisión la profundidad y distancia mojadas para cada caso. Por lo cual, la utilidad del modelo experimental que se presenta en este documento es que permite sustituir por una parte la realización de estas pruebas de campo y por otra agilizar el cálculo de los resultados finales.

Fundamentado en las aproximaciones introducidas por Shwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006); este Modelo experimental se deriva del estudio de los patrones de distribución del agua en el bulbo de humedecimiento, observados en tres texturas de suelo en campo y en una selección de variables con el método Stepwise. El avance lateral (r) y vertical (Z) del agua en el bulbo se explica por la relación entre el volumen de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo. De acuerdo con los estadísticos de comparación (coeficiente de determinación y raíz del error cuadrático medio), entre los resultados obtenidos con este modelo, los obtenidos con los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous *et al.*, (2008), y mediciones en campo; el modelo experimental predice el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de los suelos estudiados con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente. También los estadísticos de comparación (R^2 y RECM) indican que la mejor aproximación

en la predicción de la distribución del agua se obtiene con este modelo cuando se usan gastos de descarga de emisor de 1.11×10^{-6} y $2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para cualquiera de los suelos estudiados. La capacidad del Modelo experimental para hacer una mejor predicción del avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, respecto a los modelos de Schwartzman y Zur (1986); Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous et al., (2008), se debe a que considera variables relacionadas con el contenido de agua en el suelo (Kandelous y Simunek, 2010). Además, que incluye al contenido de limo del suelo como una variable más de predicción.

De manera paralela, se ha detectado 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. De la misma manera, V presenta coeficientes de correlación relativamente altos respecto a las variables dependientes r y Z (Anexo A). Estos resultados están acorde con información reportada por Roth (1983); Schwartzman y Zur (1986), y Gil-Marín (2001). Entonces se puede señalar que, la dimensión del bulbo de humedecimiento que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en cualquiera de estos suelos estudiados depende, por orden de importancia, del volumen de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo en el suelo (Amin y Ekhmaj, 2006; Nafchi et al., 2011).

Por otra parte, el agua que aplican los emisores en el suelo se distribuye formando, en términos generales, figuras elipsoidales truncadas que aumentan su extensión hasta que la velocidad de infiltración del suelo se iguala con el flujo de agua que aporta el emisor (Zur, 1996). Cuando se aplican volúmenes pequeños de agua, se obtienen formas elípticas con elongaciones horizontales, incluso en un suelo franco arenoso. Pero a medida que aumenta el gasto del emisor ó tiempo de aplicación del agua, el avance vertical se hace más pronunciado; es decir el avance lateral se estabiliza y la vertical aumenta, por lo cual la elipse se elonga de manera vertical (Cote et al., 2003; Lazarovitch et al., 2007; Hao et al., 2007). En este fenómeno de infiltración y redistribución del agua en el suelo, se obtiene un volumen de mojado a partir de distintas combinaciones entre el avance lateral y vertical del frente de humedecimiento. El volumen de suelo mojado

es la variable más importante tanto en el diseño como en el manejo posterior del riego, siendo trascendente mantener un volumen de suelo mojado óptimo. Puesto que el volumen de suelo mojado óptimo debe suponer que el avance vertical y lateral se ajuste a la profundidad de raíces. Si existe un exceso, significará que se está perdiendo el agua aplicada, excepto en el caso de necesidad de lavado. Si hay un déficit, podrá producir un stress y por tanto se afectan las condiciones de rendimientos óptimos. Por lo cual, es importante indicar que 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 y además lograr una aplicación eficiente de agua en estos sistemas de riego.

3.2. Conclusiones

El Modelo experimental propuesto en este documento se puede utilizar para predecir ó modelar el movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento con una confiabilidad del 91 y 96 % respectivamente, para las texturas de suelo estudiadas con horizontes diferenciados, sin cultivo. La mejor aproximación en la predicción del movimiento del agua en el bulbo de humedecimiento se obtiene con este modelo cuando se usan gastos de descarga de emisor de 1.11×10^{-6} y 2.22×10^{-6} $m^3 s^{-1}$. El grado de confiabilidad que presenta este modelo es suficiente para usarlo con fines de diseño agronómico en los sistemas de riego por goteo. Con base en estos resultados y de acuerdo con los señalamientos de Amin y Ekhmaj (2006), Singh et al., (2006) y Nafchi et al., (2011), se verifica que este tipo de modelos semi-empíricos son más convenientes de usar para el diseño y operación de estos sistemas de riego, puesto que derivan de las observaciones experimentales en condiciones de campo.

Por otro lado, la capacidad de este modelo para hacer una mejor predicción del movimiento lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento para cualquier volumen de agua aplicada, respecto a los modelos de Schwartzman y Zur (1986); Amin y Ekhmaj (2006) y Kandelous et al., (2008), se debe a que considera variables relacionadas con el contenido de humedad inicial y residual, y contenido de limo en el suelo. Entonces se pone de manifiesto que la forma y extensión del bulbo de humedecimiento que se

obtiene cuando los emisores aplican el agua en el suelo, depende del volumen total de agua aplicada, gasto del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual, y contenido de limo en el suelo (Amin y Ekhmaj, [2006](#); Kandelous y Simunek, [2010](#); Nafchi et al., [2011](#)). Además, que se deben considerar las propiedades físicas e hidráulicas diferenciadas de los distintos horizontes del perfil del suelo (Ramírez de Cartagena y Sáinz, [1997](#)).

CAPÍTULO 4: BIBLIOGRAFÍA

- AINECHEE, G., S. BAROOMAND-NASAB and M. BEHZAD. 2009. Simulation of soil wetting pattern under point source trickle irrigation. *Journal of Applied Sciences*, 9(6): 1170-1174
- AMIN, M.S.M., and A.I.M. EKHMAJ. 2006. DIPAC-Drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th international micro irrigation congress. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ANNANDALE, J. G., N. Z. JOVANOVIC, G. S. CAMPBELL, N.VDU SAUTOYV and N. BENADÉ. 2003. A two dimensional water balance model for micro-irrigated hedgerow tree crops. *Irrigation Science*, 22: 157- 170.
- ARBAT, G., J. BARRAGÁN, J.PUIG, R. POCH y F. RAMÍREZ DE CARTAGENA. 2003. Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo Hydrus-2D y SIMDAS en riego localizado. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 6: 279-288
- ARMSTRONG, C.F. and T.V. WILSON. 1983. Computer model for moisture distribution in stratified soils under a trickle source. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 26: 1704-1709.
- BOULIER, J. F. 1985. Modélisation stochastique de l'infiltration en milieux poreux non uniformes. Application à une parcelle micro-irriguée. Thèse Université de Grenoble.
- BRANDT, A., E. BRESLER, N. DINER, J. BEN-ASHER, J. HELLER and D. GOLDBERG. 1971. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35: 675-682.
- BRESLER, E. 1977. Trickle-drip irrigation: Principles and application to soil water management. *Advances in Agronomy*, 29: 343-393.
- BRESLER, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*, 1 (3): 3-17.
- BUCKS, D. A., F. S. NAKAYAMA and A. W. WARRICK. 1980. Principles, practices and potentialities of trickle (drip) irrigation. *Advances in Irrigation*, 1: 219-298.

- CERANA J.A., P.G. FONTANINI, O. DUARTE, S. RIVAROLA, E. DÍAZ y R. BENAVIDEZ. 2005. Permeabilidad saturada en Vertisoles. Uso del Permeámetro Guelph. Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI. UNESCO (París). 71:17-22.
- CLOTHIER B., D. SCOTTER and E. HARPER. 1985. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers: 497- 501.
- COELHO, F. E. and, D. OR. 1996. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 39 (6): 2007- 2016.
- COELHO, F. E. and, D. OR. 1997. Applicability of Analytical Solutions for Flow from Point Sources to Drip Irrigation Management. Soil Science Society of America Journal, 61:1331-1341.
- COOK, F.J., P. FITCH, P. THORBURN, P.B. CHARLESWORTH and K.L. BRISTOW. 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., K.L. BRISTOW, P.B. CHARLESWORTH, F.J. COOK and P.J. THORBURN. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. Irrig. Sci, 22: 143–156.
- DARCY, H. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.
- DASBERG, S, and D. OR. 1999. Drip irrigation. Springer-Verlag. New York. 162 pp.
- ELMALOGLU, S. and DIAMANTOPOULOS E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. Agricultural Water Management, 96: 1587–1595.
- FOK, YU-SI., S. CHUNG, and C.C.K. LIU. 1982. Two-dimensional exponential infiltration equations. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108 (4): 231-245.
- GABRIELS, D., D. L. LOBO y M. M. PULIDO. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. VENESUELOS, 14: 1315-0359.
- GHALI, S.G. 1986. Mathematical modeling of soil moisture dynamics in trickle irrigated fields. Thesis, University of Southampton (UK).

- GHALI, G. S. and, Z. J. SVEHLIK. 1988. Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle irrigated fields. *Agricultural Water Management*, 13: 127-143.
- 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
- GUPTA, S.C. and W.E. LARSON. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research*, 15 (6): 1633-1635.
- GUPTA, R., P. RUDRA, and W. DICKINSON. 1995. Modeling of saturated regime as affected by emitter application rates. *Proceedings of the 5 th. International Microirrigation Congress*, 628-632.
- HAO, A., MARUI A., HARAGUCHI T and NAKANO Y. 2007. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 52(1): 187-193
- HILLEL, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press. 413 pp.
- IUSHENG, L., J. ZHANG and M. RAO. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agric. Water Manage*, 67: 89-104
- JURY, W.A. and K.D. EARL. 1977. Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: I. Analysis of bare soil experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 41: 852-856.
- KABAT, P., HACK-TEN and M.J.D. BROEKE. 1988. Input data for agrohydrological simulation models: some parameter estimation techniques. Report 19.
- KANDELOUS, M. M., A. LIAGHAT and F. ABBASI. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. *J Agri Sci.*, 39(2): 371–378
- KANDELOUS, M. M. K. and J. SIMUNEK. 2010a. 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. K. and J. SIMUNEK. 2010b. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 97: 1070–1076.

- KELLER, J. and J. D. KARMELI. 1974. Trickle Irrigation Design. Rainbird Sprinkler Corporation. Glendora, California, USA.
- KLUTE, A. 1986. Methods of soil analysis. Vol. I. Physical and mineralogical methods. ASA-SSSA, USA.
- LAZAROVITCH, N., A. W. WARRICK, A. FURMAN, and J. SIMUNEK. 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone Journal*, 6: 116-123
- MAIA, C. E., S. LUIZ A. L., J. FRANCISMAR y J. DANTAS. 2010. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Revista Ciência Agronômica*, 41(1): 149-158.
- MONCEF, H., D. HEDI, B. JELLOUL and M. MOHAMED. 2002. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrigation and Drainage*, 51: 347-360.
- NAFCHI, R. F., F. MOSAVI and K. PARVANAK. 2011. Experimental study of shape and volume of wetted soil in trickle irrigation method. *African Journal of Agricultural Research*, 6(2): 458-466
- OSTER, J. D. and D. WICHELNS. 2003. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. *Irrigation Science*, 22: 107-120.
- PACHEPSKY, YA. A., D.TIMLIN and G. VARALLYAY. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 727-733.
- PACHEPSKY, YA. A., D.TIMLIN, and L.R. AHUJA. 1999. Estimate saturated hydraulic conductivity using water retention data and neural networks. *Soil Sci.* 164: 552-560.
- PHENE, C.J. 1995. Research Trends in microirrigation. *Microirrigation for a changing world: Conserving resources/preserving the environment. Proceedings of the fifth microirrigation congress*, 6-24.
- PHILIP, J.R. 1968. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. *Water Resources Research*, 4: 1039-1047.
- PHILIP, J.R. 1971. General theorem on steady infiltration from surface sources, with application to point and line sources. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35: 867-871.
- PHILIP, J.R. 1985. Steady absorption from spheroidal cavities. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 828-830.

- PINEDA, C. y J. VILORIA. 1997. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de Valencia. *VENESUELOS*, 5 (1 y 2): 39-44.
- PIZARRO, F. 1987. Riegos localizados de alta frecuencia. Mundi Prensa. Madrid. 461 p.
- RAATS, P.A.C. 1971. Steady infiltration from point sources, cavities, and basins. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35: 689-694.
- RAMIREZ DE CARTAGENA, F. 1994. Simulación numérica de la dinámica del agua en el suelo. Aplicación al diseño de sistemas de riego LAF. Tesis Doctoral, Universitat de Lleida. Lleida.
- RAMÍREZ DE CARTAGENA, B. F y M. A. SÁINZ-SÁNCHEZ. 1997. Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo. *Ingeniería del Agua*, 4(1): 57-70
- RAWLINS, S. L. 1973. Principles of managing high frequency irrigation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 37: 626-629.
- REVOL, P., B. E.CLOTHIER, P. KOSUTH and G.VACHAUD. 1996. The free-water pond under a trickle source: a field test of existing theories. *Irrigation Science*, 16(4): 169-175.
- REVOL, P., B. E.CLOTHIER, J. C. MAILHOL, G. VACHAUD and M. VAUCLIN. 1997. Infiltration from a surface point source and drip irrigation. 2. An approximate time-dependent solution for a wet-front position. *Water Resources Research*, 33: 1869-1874.
- REYNOLDS, W. D., D.E. ELRICK, E.G. YOUNGS, A. AMOOZEGAR, H.W.G. BOOLTINK and J. BOUMA. 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, USA. : 797-878.
- RICHARDS, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.
- RODRIGO-LÓPEZ, J., J. M. HERNÁNDEZ-ABREU, A. PÉREZ-REGALADO y J. F. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ. 1992. Riego Localizado. Mundi-Prensa. Madrid. 403 p.
- ROTH, R.L. 1983. Moisture movement from a point source. Thesis, University of Arizona, USA.
- RUIZ-CANALES, A., V. PLANA, M.C. RUIZ-SÁNCHEZ, J.A. FRANCO y J. M. ABRISQUETA. 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

- SHAAP, M.G. and W. BOUTEN. 1996. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks. *Water Resour. Res.*, 32: 3033-2040.
- SCHAAP, M.G., F.J. LEIJ and M. TH. VAN GENUCHTEN. 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
- SIMUNEK, J., M. SEJNA, and M. T. VAN GENUCHTEN. 1999. HYDRUS-2D, software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and solute transport in variably-saturated media. U.S. Salinity Laboratory. Riverside, California.
- SINGH, D. K., T.B.S. RAJPUTB, D.K. SINGHB, H.S. SIKARWARC, R.N. SAHOOD and T. AHMAD. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management*, 83(1-2): 130-134
- SLICHTER, C.S. 1899. *U.S. Geol. Sur. Ann. Rep.* 19 (2): 295-384.
- TAGHAVI, S. A., M. A. MARIÑO and D. E. ROLSTON. 1984. Infiltration from trickle irrigation source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 110(4): 331-341.
- VAN DER PLOEG, R.R. and P. BENECKE. 1974. Unsteady, unsaturated, n-dimensional moisture flow in soil: A computer simulation program. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38: 881-885.
- WARRICK, A.W. 1974. Solution to the one-dimensional linear moisture flow equation with water extraction. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38: 573-576.
- WARRICK, A. W. 2003. *Soil Water Dynamics*. Oxford University Press. New York.
- WOODING, R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, 4: 1259-1273.
- ZUR, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrig Sci.*, 16: 101-105

CAPÍTULO 5: ANEXOS.

Anexo A; Correlación entre las variables consideradas a ser explicativas de la variable dependiente; y respecto a la variable dependiente r y Z.

	V	K_s	Q	θ_v	θ_r	ρ	A	L_i	A_r	r	Z
V	1	-0.146	0.519	0.388	-0.083	0.163	-0.072	0.023	-0.158	0.905	0.911
K_s	-0.146	1	-0.027	-0.713	-0.816	0.604	-0.877	-0.779	0.840	-0.053	0.002
Q	0.519	-0.027	1	0.157	-0.149	0.184	-0.137	-0.038	-0.025	0.416	0.348
θ_v	0.388	-0.713	0.157	1	0.645	-0.686	0.679	0.827	-0.882	0.116	0.225
θ_r	-0.083	-0.816	-0.149	0.645	1	-0.879	0.988	0.809	-0.804	-0.198	-0.173
ρ	0.163	0.604	0.184	-0.686	-0.879	1	-0.874	-0.902	0.843	0.360	0.312
A	-0.072	-0.877	-0.137	0.679	0.988	-0.874	1	0.856	-0.854	-0.193	-0.191
L_i	0.023	-0.779	-0.038	0.827	0.809	-0.902	0.856	1	-0.984	-0.190	-0.206
A_r	-0.158	0.840	-0.025	-0.882	-0.804	0.843	-0.854	-0.984	1	0.055	0.064
r	0.905	-0.053	0.416	0.116	-0.198	0.360	-0.193	-0.190	0.055	1	
Z	0.911	0.002	0.348	0.225	-0.173	0.312	-0.191	-0.206	0.064		1

donde ; V = volumen de agua aplicada; Q = gasto del emisor; K_s = conductividad hidráulica saturada; θ_v y θ_r = contenido de humedad inicial y residual del suelo; ρ = densidad aparente; A = contenido de arcilla; L_i = contenido de limo; A_r = contenido de arena; r y Z = avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento.

Anexo B; Análisis de varianza de la de variables seleccionadas para el avance lateral del humedecimiento en el bulbo.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob(F)	Coficiente de Determinación (R ²)
Modelo	3	1.323	0.441	209.268	0.000	0.906
Error	65	0.137	0.002			
Total	68	1.460				

Variable	Valor	Error estándar	Valor - t	Prob(t)
V	0.353	0.014	24.847	0.00E+00
K _s	- 0.110	0.028	- 3.932	2.10E-04
θ _v	- 0.387	0.052	- 7.492	0.00E+00

Anexo C; Análisis de varianza de la de variables seleccionadas para el avance vertical del humedecimiento en el bulbo.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob(F)	Coficiente de Determinación (R ²)
Modelo	5	3.013	0.603	194.741	0.000	0.939
Error	63	0.195	0.003			
Total	68	3.208				

Variable	Valor	Error estándar	Valor - t	Prob(t)
V	0.458	0.023	20.058	0.00E+00
Q	- 0.152	0.033	- 4.547	3.00E-05
θ_v	0.386	0.094	4.096	1.20E-04
θ_r	0.349	0.089	3.916	2.20E-04
L_i	- 0.421	0.051	- 8.312	0.00E+00

Anexo D; Recepción de artículos científicos, producto de la investigación Doctoral.

Revista: *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México*, está registrada en diversos índices y resúmenes (abstracts) nacionales e internacionales, entre ellos el *Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*, así como en *Thomson Reuters Science Citation Index® (ISI)* y *Expanded Thomson Reuters Research Alert® (ISI)*.

Asunto: RE: Envío Contribuciones.
De: Helena Rivas López (hrivas@tlaloc.imta.mx)
Para: fcruz1975@yahoo.com.mx;
Fecha: vie, 12 ago 2011 11:37:54

Estimado doctor Cruz:

Muchas gracias por sus contribuciones y le ofrezco una disculpa por no responder antes (problemas del servidor y correo electrónico).

El proceso de revisión está en marcha y en cuanto tengamos noticias nos comunicaremos con usted.

Saludos cordiales y feliz fin de semana

Helena Rivas López

Coordinadora editorial

Tecnología y Ciencias del Agua

De: Fidencio Cruz Bautista [mailto:fcruz1975@yahoo.com.mx]

Enviado el: Lunes, 18 de Julio de 2011 09:41 p.m.

Para: hrivas@tlaloc.imta.mx

Asunto: Envío Contribuciones.

Lic. Helena Rivas López,

Coordinadora editorial de la Revista ***Tecnología y Ciencias del Agua***.

Por este conducto envió a Usted dos documentos de contribución originales, derivados de un proyecto de investigación doctoral. Los cuales cumplen con las normativas especificadas en la "Guía para Colaboradores". Dichos documentos se anexan en formato Word.

Sin otro particular y en espera de su acuse de recibido de estos documentos, le envié un cordial saludo.

Atentamente:

Fidencio Cruz Bautista

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna.
Periférico y Carretera a Santa Fe, Torreón, Coahuila. C. P. 27000
Teléfono 01 (871) 7297676