

COMPARACIÓN ENTRE UN MODELO HIDRODINÁMICO COMPLETO Y UN MODELO HIDROLÓGICO EN RIEGO POR MELGAS

COMPARISON BETWEEN A HYDRODYNAMIC FULL MODEL AND A HYDROLOGIC MODEL IN BORDER IRRIGATION

Vladimir Castanedo^{1*}, Heber Saucedo¹, Carlos Fuentes²

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso. 62550. Jiutepec, Morelos. ²Universidad Autónoma de Querétaro. Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n. 76010. Santiago de Querétaro, Querétaro, México

RESUMEN

La práctica del riego por gravedad hace necesario disponer de un criterio para el diseño de riego por gravedad, para conseguir un manejo más eficiente del agua en la producción agrícola. Por tanto, se presenta una comparación entre el modelo hidrodinámico completo y el modelo hidrológico en riego por melgas. Para reducir las variaciones, originadas por diferencias en la lámina infiltrada, obtenidas con las ecuaciones de Green-Ampt y de Richards utilizadas en los modelos hidrológico e hidrodinámico completo, se realizó el ajuste del parámetro de succión en el frente de humedecimiento de la ecuación de Green-Ampt; con ello se reproduce el cambio de la lámina infiltrada obtenida con la ecuación de Richards. La comparación se efectuó a partir del análisis de los perfiles de flujo superficial y subsuperficial, que se presentan en el riego, y de la distribución final de la lámina infiltrada. Se encontraron diferencias entre los elementos analizados, atribuibles al empleo de una ecuación de cantidad de movimiento general en el modelo hidrodinámico completo. Las diferencias en los perfiles de flujo influyen en la distribución final de la lámina infiltrada y, por tanto, en el gasto óptimo de riego. Así, al analizar su comportamiento para los suelos de triángulo de texturas en los que es conveniente la aplicación del riego por melgas, se observó que la diferencia entre los gastos óptimos de riego, proporcionados por el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico completo, crece con el incremento del contenido de arcilla en el suelo.

Palabras clave: modelo hidrodinámico completo, modelo hidrológico, riego por melgas.

ABSTRACT

The practice of surface irrigation makes it necessary to have a criterion for the design of surface irrigation, with the aim of achieving more efficient water management in agricultural production. Therefore, we made a comparison between the full hydrodynamic model and the hydrological model in border irrigation. To reduce the variations caused by differences in the infiltrated depth obtained with the Green-Ampt and Richards equations used in hydrological and full hydrodynamic models, we performed the suction parameter adjustment in the wet front of the Green-Ampt equation, thereby reproducing the change of the infiltrated depth obtained with the Richards equation. We did the comparison based on the analysis of the profiles of surface and subsurface flows occurring in irrigation, and the final distribution of the infiltrated depth. There were differences between the elements analyzed, attributable to the use of an equation of overall momentum in the full hydrodynamic model. Differences in flow profiles influence the final distribution of the infiltrated depth and therefore the optimal irrigation flow. Thus, by analyzing their behavior in texture triangle soils, where it is appropriate to apply border irrigation, we observed that the difference between optimal irrigation flow provided by the hydrological model and the full hydrodynamic model grows with the increasing content of clay in the soil.

Keywords: full hydrodynamic model, hydrological model, border irrigation.

INTRODUCTION

The importance of the soil's role in the modeling of surface irrigation has been recognized in recent times. In the first models, and even in

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2012. Aprobado: febrero, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 209-223. 2013.

INTRODUCCIÓN

Recientemente se ha reconocido la importancia de la función del suelo en la modelación del riego por gravedad. En los primeros modelos e incluso en varios de los actuales se incluye su efecto a través de leyes de infiltración simplificadas, que tienen deficiencias en la representación físico-matemática del proceso (Saucedo *et al.*, 2005). Entre los modelos simplificados está el modelo hidrológico RIGRAV desarrollado por Rendón *et al.* (1997), es usado ampliamente en México para el diseño de riego por gravedad y se basa en el empleo de la ecuación de continuidad para la modelación de las cuatro fases del riego. Entre los modelos complejos está el hidrodinámico completo, desarrollado por Saucedo *et al.* (2005); en él se usan las ecuaciones de Saint-Venant para describir el flujo del agua en superficie libre sobre el suelo durante el riego, y la de Richards para modelar el proceso de infiltración del agua en el suelo.

El objetivo de este estudio fue comparar los resultados obtenidos con un modelo hidrológico (Rendón *et al.*, 1997) y con un modelo hidrodinámico completo (Saucedo *et al.*, 2005) para la determinación del gasto óptimo de riego en diez tipos de suelo y tres láminas de riego. Se consideró el gasto óptimo de riego como aquel con coeficiente de uniformidad máximo, manteniendo los valores de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego más elevados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo hidrológico

Si se ignora la ecuación de cantidad de movimiento y se resuelve solamente la ecuación de continuidad se obtiene el modelo de balance de volumen o modelo hidrológico. La ecuación de continuidad se escribe como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

donde $q(x, t) = U(x, t) h(x, t)$ es el gasto por unidad de ancho de melga [$L^2 T^{-1}$], x es la coordenada espacial en la dirección principal del movimiento del agua en la melga [L], t es el tiempo [T], U es la velocidad media [$L T^{-1}$], h es el tirante de agua [L] e i es la lámina infiltrada [L].

many of the current ones, its effect is included through infiltration simplified laws, which are deficient in the physical-mathematical representation of the process (Saucedo *et al.*, 2005). Among the simplified models, there is the hydrological model RIGRAV, developed by Rendón *et al.* (1997), and is widely used in Mexico for surface irrigation design; it is based on the use of the continuity equation for modeling the four phases of irrigation. Among the complex models is the full hydrodynamic developed by Saucedo *et al.* (2005), in which the Saint-Venant equations are used to describe the flow of free surface water on the soil during irrigation, and that of Richards to model the process of water infiltration into the soil.

The aim of this study was to compare the results obtained with a hydrological model (Rendón *et al.*, 1997) and a full hydrodynamic model (Saucedo *et al.*, 2005) to determine the optimal irrigation flow in ten soil types and three water depths. We considered that the optimal irrigation flow was that with maximum uniformity coefficient, keeping the highest values of application and irrigation requirements.

MATERIALS AND METHODS

Hydrological model

By ignoring the momentum equation and only solving the continuity equation, we obtained the volume balance model or hydrological model. The continuity equation is:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

where $q(x, t) = U(x, t) h(x, t)$ is the cost per width border unit [$L^2 T^{-1}$], x is the spatial coordinate in the main direction of water movement in the border [L], t is time [T], U is the average velocity [$L T^{-1}$], h is the water depth [L] and i is the infiltrated depth [L].

The integrated version of the continuity equation (1) written for the case of a border is:

$$Q_o t = \int_0^{x_f} h(x, t) dx + \int_0^{x_f} l(x, t) dx \quad (2)$$

La versión integral de la ecuación de continuidad (1) escrita para el caso de una melga es:

$$Q_o t = \int_0^{x_f} h(x, t) dx + \int_0^{x_f} l(x, t) dx \quad (2)$$

donde x_f es la posición del frente de avance en el tiempo [L] y Q_o es el gasto de riego de la melga [$L_3 T^{-1}$]. Si se considera un valor medio del tirante y el suelo homogéneo se tiene:

$$Q_o t = \bar{h} x_f(t) + \int_0^{x_f} l(\tau) dx \quad (3)$$

donde τ es el tiempo de infiltración definido como $\tau = t - t_x$, siendo t_x el tiempo que tarda el frente de avance en llegar al punto situado a la distancia x .

Para resolver numéricamente la ecuación (1), se tiene en cuenta que $\bar{h}$ es conocido y que la función de infiltración $l(\tau)$ puede asignarse conforme al modelo de Green-Ampt. Para el cálculo $\bar{h}$ de la expresión: $\bar{h} = 0.8 h_n$ puede usarse (Rendón *et al.*, 1997), donde h_n es el tirante normal para régimen permanente y puede estimarse con base en una ley potencial de resistencia hidráulica propuesta por Fuentes *et al.* (2004). Así, la expresión para el cálculo del tirante normal es: $h_n = [\omega Q_o / (g J_o)]^{1/3}$, con: $\omega J^* v(Q_o/v)^{1/d-1}$ y $J^* = 1/\kappa^{1/d}$ donde v es el coeficiente de viscosidad cinemática [$L^2 T^{-1}$], κ es un factor adimensional, J_o es la pendiente topográfica de la melga [$L L^{-1}$], g es la aceleración gravitacional [$L T^{-2}$] y d es la potencia de la ley de resistencia hidráulica, a partir de la cual se pueden deducir la de Chézy con $d=1/2$ y la de Poiseuille con $d=1$.

Green-Ampt (1911) tomaron como base la ley de Darcy para deducir una ecuación simple para la infiltración vertical del agua en el suelo, con las siguientes hipótesis: 1) el perfil de humedad inicial en una columna de suelo es uniforme: $\theta = \theta_o$, 2) la presión del agua en la superficie del suelo es hidrostática: $\psi = h \geq 0$, donde h es el tirante del agua, 3) existe un frente definido de humedecimiento y caracterizado por una presión negativa $\psi = \psi_f < 0$; ψ_f es denominado presión de frente de humedecimiento; 4) la región entre la superficie del suelo y el frente de humedecimiento (z_f) está completamente saturada (flujo en pistón): $\theta = \theta_s$, $K = K_s$. La combinación de estas hipótesis, de la ecuación de continuidad y de la ley de Darcy, permiten obtener la expresión siguiente para la lámina infiltrada (Fuentes, 1992):

$$I(t) = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) \quad (4)$$

where x_f is the position of the advancing front in time [L] and Q_o is the border watering expense [$L_3 T^{-1}$]. When assuming a mean value of the water depth and homogeneous soil, we have:

$$Q_o t = \bar{h} x_f(t) + \int_0^{x_f} l(\tau) dx \quad (3)$$

where τ is the infiltration time defined as $\tau = t - t_x$, being t_x the time the advancing front takes to reach the point located at the x distance.

For numerically solving equation (1), we took into account that $\bar{h}$ is known and that the infiltration function $l(\tau)$ can be allocated according to the Green-Ampt model. For $\bar{h}$ calculation in the expression: $\bar{h} = 0.8 h_n$ can be used (Rendón *et al.*, 1997), where h_n is the normal water depth for permanent regime and can be estimated based on a power hydraulic resistance law proposed by Fuentes *et al.* (2004). So, the expression for calculating the normal water depth is: $h_n = [\omega Q_o / (g J_o)]^{1/3}$, with: $\omega J^* v(Q_o/v)^{1/d-1}$ and $J^* = 1/\kappa^{1/d}$, where v is the kinematic viscosity coefficient [$L^2 T^{-1}$], k is a dimensionless factor, J_o is the border topographical slope [$L L^{-1}$], g is gravitational acceleration [$L T^{-2}$] and d is the power of the hydraulic resistance law, from which that of Chézy can be deduced with $d=1/2$ and Poiseuille's with $d=1$.

Green-Ampt (1911) based on the Darcy law to deduce a simple equation for vertical infiltration of water into the soil, with the following assumptions: 1) the initial moisture profile in a soil column is uniform: $\theta = \theta_o$; 2) water pressure in the soil surface is hydrostatic: $\psi = h \geq 0$, where h is the water depth; 3) there is a set front of wetting characterized by a negative pressure $\psi = \psi_f < 0$; ψ_f is called wetting front pressure; and 4) the region between the soil surface and the wetting front (z_f) is completely saturated (plug flow): $\theta = \theta_s$, $K = K_s$. The combination of these assumptions, the continuity equation and Darcy law, allow to obtain the following expression for the infiltrated depth (Fuentes, 1992):

$$I(t) = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) \quad (4)$$

with $\lambda = (\bar{h} + h_f) (\theta_s - \theta_o)$, where $h_f = -\psi_f$ is the suction in the front wetting. Rendón *et al.* (1977) developed the RIGRAV computer program for numerically solving equation (3), taking into account equation (4) and the equation for calculating the normal water depth.

con $\lambda = (\bar{h} + h_f)(\theta_s - \theta_o)$, donde $h_f = -\psi_f$ es la succión en el frente de humedecimiento. Rendón *et al.* (1977) desarrollaron el programa de computo RIGRAV para resolver numéricamente la ecuación (3), teniendo en cuenta la ecuación (4) y la ecuación para el cálculo del tirante normal.

Modelo hidrodinámico completo

Saucedo *et al.* (2005) presentaron un esquema numérico para el acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards en el riego por melgas. La solución de las ecuaciones de Saint-Venant se aproxima con un esquema lagrangiano en diferencias finitas y para la ecuación de Richards se utilizan elementos finitos para la integración en el espacio y diferencias finitas implícitas para la integración en el tiempo. A partir del análisis de las formas de aproximación de las derivadas espaciales y temporales y de la forma de cálculo de los coeficientes de la ecuación de cantidad de movimiento se deduce una solución numérica monótona; para ello se aplica en la discretización de la ecuación de momentum tres aspectos: 1) las derivadas en el espacio y la pendiente de fricción en una celda de cálculo se aproximan adelante en el tiempo, 2) las derivadas en el tiempo se aproximan mediante una forma ponderada en tiempo y espacio, 3) los coeficientes son calculados en el tiempo anterior. La solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant para las fases de avance, almacenamiento y consumo se aproxima con un esquema de paso de tiempo constante, y para la fase de recesión se usa un esquema de paso de espacio fijo.

Flujo del agua en el suelo: ecuación de Richards

El riego ocurre en tres dimensiones, así el flujo del agua en el suelo lo describe la ecuación de Richards en su forma tridimensional. Sin embargo, por el esfuerzo computacional requerido es conveniente aceptar la hipótesis de que el fenómeno se efectúa en planos paralelos al desarrollo de la melga y usar la forma bidimensional de la ecuación de Richards (Richards, 1931):

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

que se resuelve sobre el dominio de solución mostrado en la Figura 1.

Condiciones límites

Como condición inicial para la solución de la ecuación de Richards bidimensional debe especificarse la distribución de las presiones en el espacio:

Full hydrodynamic model

Saucedo *et al.* (2005) presented a numerical scheme for the coupling of the equations by Saint-Venant and Richards in border irrigation. The solution of the Saint-Venant equations uses a Lagrangian approach in finite differences and for the Richards equation finite elements are used for integration in space and implicit finite differences for time integration. From the analysis of the forms of approach of the temporal and spatial derivatives and the method for calculating the coefficients of the momentum equation, we deduced a monotonous numerical solution; to this end, in the discretization of the momentum equation, we took into account three aspects: 1) spatial derivatives and the friction slope in a calculation cell are approached forward in time, 2) the derivatives in time, being approached through a weighted manner in time and space, and 3) coefficients are calculated in the previous time. We reached the numerical solution of the Saint-Venant equations for the phases of advancement, storage and consumption with a scheme of constant time step, and for the recession phase, we used a fixed space step scheme.

Water flow in the soil: Richards equation

Irrigation occurs in three dimensions, so the water flow in the soil is described by the Richards equation in its three-dimensional form. However, because of the computational effort required, it is convenient to accept the hypothesis that the phenomenon takes place in planes parallel to the border development, and use the two-dimensional form of the Richards equation (Richards, 1931):

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

To be solved on the solution domain shown in Figure 1.

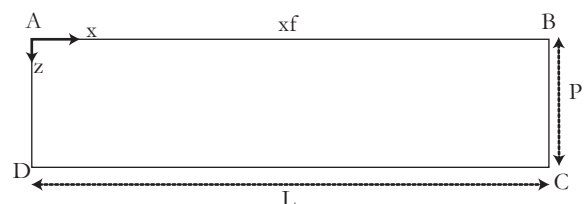


Figura 1. Dominio de solución para la ecuación de Richards bidimensional.

Figure 1. Solution domain for two-dimensional Richards equation.

$$\psi = \psi_o(x, z) \quad (6)$$

Las condiciones de frontera correspondientes pueden considerarse como sigue: $\overline{Ax_f}$ frontera tipo Dirichlet con potencial prescrito, utilizando las ecuaciones de Saint-Venant, $\overline{x_fB}$, $\overline{BC}$ y $\overline{DA}$ fronteras tipo Neumann con flujo nulo, $\overline{CD}$ frontera bajo gradiente unitario:

$$\psi = h, \quad x \in \overline{Ax_f}, \quad z=0, \quad t > 0 \quad (7)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} = 0, \quad x \in \overline{x_fB}, \quad z = 0, \quad t > 0 \quad (8)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad x = L, \quad z \in \overline{BC}, \quad t > 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} = -1, \quad x \in \overline{CD}, \quad z = P, \quad t > 0 \quad (10)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad z \in \overline{DA}, \quad t > 0 \quad (11)$$

Características hidrodinámicas

Para la solución de la ecuación de Richards es indispensable representar las propiedades hidrodinámicas del suelo, expresar el potencial de presión (ψ) como una función del contenido volumétrico de agua (θ) y la conductividad hidráulica K como una función de θ . Como señaló Fuentes *et al.* (1992), en estudios experimentales puede ser conveniente usar la combinación de la curva de retención propuesta por van Genuchten (1980), con la restricción de Burdine (1953) y la curva de conductividad hidráulica propuesta por Brooks y Corey (1964), ya que satisfacen las propiedades integrales de la infiltración y facilitan la identificación de sus parámetros. La curva de retención propuesta por van Genuchten (1980) es descrita por: $(\theta(\psi) - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) = [1 - (\psi/\psi_d)^n]^{-m}$, donde ψ_d es un valor característico de la presión del agua en el suelo, m y n son dos parámetros empíricos relacionados por la restricción de Burdine (1953): $m = 1 - 2/n$, con $0 < m < 1$ y $n > 2$, θ_s es el contenido volumétrico de agua del suelo a saturación efectiva y θ_r es el contenido volumétrico de agua residual. La conductividad hidráulica propuesta por Brooks y Corey (1964) se representa como: $K(\theta) = K_s [(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)]^\eta$, donde η es un parámetro de forma.

Cálculo de la lámina infiltrada

La lámina infiltrada, necesaria para resolver numéricamente las ecuaciones de Saint-Venant se calcula como:

Boundary conditions

As initial condition for the solution of the two-dimensional Richards equation, we specified pressure distribution in space:

$$\psi = \psi_o(x, z) \quad (6)$$

The corresponding boundary conditions can be considered as follows: $\overline{Ax_f}$ Dirichlet type boundary with prescribed potential, using the Saint-Venant equations, $\overline{x_fB}$, $\overline{BC}$ and $\overline{DA}$ Neumann type boundaries with no flow, $\overline{CD}$ boundary under unitary gradient:

$$\psi = h, \quad x \in \overline{Ax_f}, \quad z=0, \quad t > 0 \quad (7)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} = 0, \quad x \in \overline{x_fB}, \quad z = 0, \quad t > 0 \quad (8)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad x = L, \quad z \in \overline{BC}, \quad t > 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} = -1, \quad x \in \overline{CD}, \quad z = P, \quad t > 0 \quad (10)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad z \in \overline{DA}, \quad t > 0 \quad (11)$$

Hydrodynamic characteristics

For the solution of the Richards equation it is essential to represent the hydrodynamic properties of the soil, express the pressure potential (ψ) as a function of the volumetric water content (θ), and hydraulic conductivity K as a function of θ . As noted by Fuentes *et al.* (1992), experimental studies may require the combination of the retention curve proposed by van Genuchten (1980), with the restriction by Burdine (1953) and the hydraulic conductivity curve proposed by Brooks and Corey (1964), as they meet the integral properties of infiltration and facilitate the identification of their parameters. The retention curve proposed by van Genuchten (1980) is described by: $(\theta(\psi) - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) = [1 - (\psi/\psi_d)^n]^{-m}$, where ψ_d is a characteristic value of water pressure in the soil, m and n are two empirical parameters related by the Burdine restriction (1953): $m = 1 - 2/n$, with $0 < m < 1$ and $n > 2$; θ_s is the volumetric water content of the soil at effective saturation and θ_r is the volumetric content of residual water. Hydraulic conductivity proposed by Brooks and Corey (1964) is represented as: $K(\theta) = K_s [(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)]^\eta$, where η is a shape parameter.

$l(x_i, t) = \int_0^F \theta(x_i, z, t) - \theta_o(x_i, z, 0) dz$, donde F es la posición del frente de humedecimiento y θ_o es el contenido volumétrico de agua inicial en la columna de suelo localizada en una posición x_i , dichas posiciones corresponden con los puntos donde se resuelven las formas discretas de las ecuaciones de Saint-Venant.

Solución numérica de la ecuación bidimensional de Richards

La ecuación bidimensional de Richards es discretizada en el espacio con elementos finitos y en el tiempo con un esquema implícito en diferencias finitas. El procedimiento fue documentado por Neumann (1973) y Saucedo *et al.* (2005).

Flujo del agua sobre la superficie del suelo: ecuaciones de Saint-Venant

La descripción del flujo del agua en el riego por melgas requiere la ecuación de Richards para describir el flujo del agua en el suelo y las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre la superficie del suelo. Su acoplamiento permitirá conocer las formas de los perfiles de flujo superficial y la distribución de los potenciales de presión en el suelo según avance el riego. El tirante proporcionado por la solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant se utiliza para definir una condición de frontera tipo Dirichlet para la ecuación de Richards, cuya solución numérica permite el cálculo de la lámina infiltrada necesaria para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant, y por lo tanto es un procedimiento iterativo. El esquema numérico para resolver las ecuaciones de Saint-Venant completas tiene como base el esquema presentado por Katopodes y Strelkoff (1977), para la forma de inercia cero de las ecuaciones de Saint-Venant. En una melga la relación entre su anchura y el tirante de agua permite considerar las ecuaciones correspondientes al escurrimiento sobre una superficie de anchura infinita (Woolhiser, 1975):

Para la conservación de la masa se utiliza la ecuación (1).

La ecuación de cantidad de movimiento es de la forma:

$$h^2 \frac{\partial q}{\partial t} + 2qh \frac{\partial q}{\partial x} + (gh^3 - q^2) \frac{\partial h}{\partial x} + gh^3(J - J_o) + \beta qh \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

donde J_o es la pendiente topográfica de la melga [LL^{-1}], J es la pendiente de fricción [LL^{-1}], $VI = \partial I / \partial T$ es el flujo de infiltración [LT^{-1}], es decir el volumen de agua infiltrado en la unidad de

Calculation of the infiltrated depth

The infiltrated depth needed to numerically solve the equations of Saint-Venant is calculated as: $l(x_i, t) = \int_0^F \theta(x_i, z, t) - \theta_o(x_i, z, 0) dz$, where F is the position of the wetting front and θ_o is the volumetric initial water content in the soil column located at a x_i position; these positions correspond to points where discrete forms of the Saint-Venant equations are solved.

Numerical solution of the two-dimensional Richards equation

The two-dimensional Richards equation is discretized in space with finite elements and in time with an implicit finite difference scheme, as described by Neumann (1973) and Saucedo *et al.* (2005).

Water flow on the soil surface: Saint-Venant equations

The description of the water flow in border irrigation requires the Richards equation to describe the water flow in the soil and the Saint-Venant equations for the flow of water on the soil surface. Their coupling will reveal forms of surface flow profiles and the distribution of the ground pressure potentials during irrigation. A water depth value provided by the numerical solution of Saint-Venant equations was used to define a Dirichlet type boundary condition for the Richards equation, whose numerical solution allows calculating the infiltrated depth necessary for solving the Saint-Venant equations, thus taking an iterative procedure. The numerical scheme to solve the Saint-Venant equations is based on the scheme presented by Katopodes and Strelkoff (1977) for the zero inertia form of the Saint-Venant equations. In a border, the relationship between width and the water depth allows considering the equations corresponding to runoff on a surface of infinite width (Woolhiser, 1975):

To conserve mass, we used equation (1).

The momentum equation is expressed as follows:

$$h^2 \frac{\partial q}{\partial t} + 2qh \frac{\partial q}{\partial x} + (gh^3 - q^2) \frac{\partial h}{\partial x} + gh^3(J - J_o) + \beta qh \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

where J_o is the border topographical slope [LL^{-1}], J is the friction slope [LL^{-1}], $VI = \partial I / \partial T$ is the infiltration flow [LT^{-1}], *i.e.*, the

tiempo por unidad de longitud de la melga, el parámetro adimensional $\beta=1-\alpha$ con $\alpha=1-U_{lx}/U$ y U_{lx} es la proyección en la dirección del movimiento de la velocidad de salida de la masa de agua debida a la infiltración.

Condiciones límites

Las condiciones inicial y de frontera que deben sujetar a las ecuaciones de Saint-Venant para modelar la fase de avance en el riego por melgas son las siguientes:

$$q(x, 0) = 0 \quad y \quad h(x, 0) = 0 \quad (13)$$

$$q(0, t) = Q_0, \quad q(x_f, t) = 0 \quad h(x_f, t) = 0 \quad (14)$$

Similarmente, deben asignarse condiciones de frontera para las demás fases del riego.

La ecuación de continuidad se discretiza con un esquema lagrangiano en diferencias finitas y considerando la deformación de la frontera del dominio de solución para seguir el frente de avance. La Figura 2 presenta la disposición de las celdas para expresar en diferencias finitas las ecuaciones de Saint-Venant. La forma discreta de la ecuación de continuidad es:

volume of infiltrated water in the time unit per border length unit, the dimensionless parameter $\beta=1-\alpha$ con $\alpha=1-U_{lx}/U$ y U_{lx} is the projection in the direction of movement of the exit speed of the water mass due to infiltration.

Boundary conditions

The initial and boundary conditions which must hold the Saint-Venant equations to model the advance phase in border irrigation are the following:

$$q(x, 0) = 0 \quad y \quad h(x, 0) = 0 \quad (13)$$

$$q(0, t) = Q_0, \quad q(x_f, t) = 0 \quad h(x_f, t) = 0 \quad (14)$$

Similarly, it was necessary to allocate boundary conditions to the other irrigation phases.

We discretized the continuity equation with a Lagrangian scheme in finite differences and considering the deformation of the boundary of the solution domain to keep monitoring the advance front. Figure 2 shows the arrangement of the cells to express the Saint-Venant equations in finite differences. The discrete form of the continuity equation is:

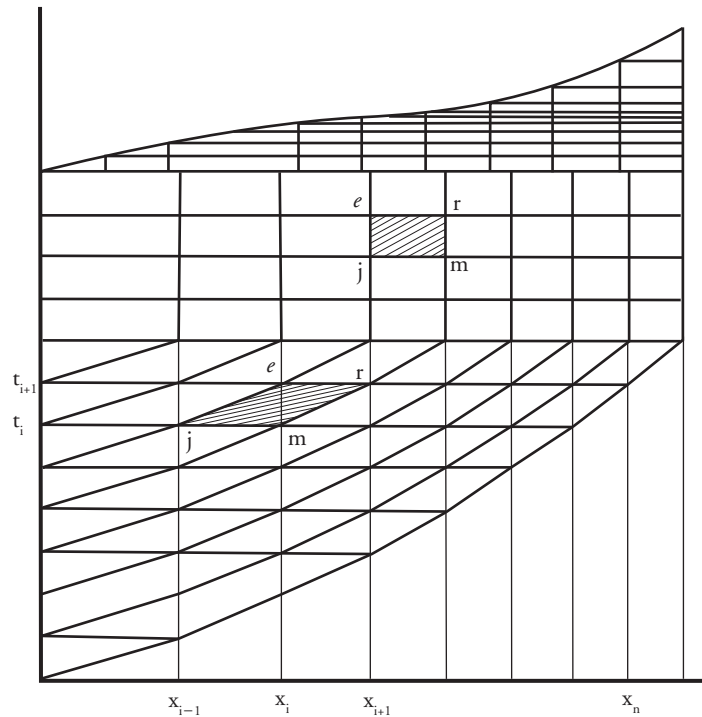


Figura 2. Disposición de la malla lagrangiana para las fases de avance almacenamiento, consumo y recesión.
Figure 2. Arrangement of the Lagrangian mesh for the stages of advance, storage, consumption and recession.

$$[\omega q_1 + (1-\omega)q_j] \delta t - (x_1 - x_j)[\omega(h_1 + I_1) + (1-\omega)(h_j + I_j)] - [\omega q_r + (1-\omega)q_m] \delta t + (x_r - x_m)[\omega(h_r + I_r) + (1-\omega)(h_m + I_m)] - [\phi h_1 + (1-\phi)h_r + \phi I_1 + (1-\phi)I_r](x_r - x_1) + [\phi h_j + (1-\phi)h_m + \phi I_j + (1-\phi)I_m](x_m - x_j) = 0 \quad (15)$$

Para obtener formas monótonas de los perfiles de flujo superficial se propone la siguiente forma discreta de la ecuación de momentum:

$$2\bar{q}h(q_r - q_1)\delta t + (\bar{g}h^3 - \bar{q}^2)(h_r - h_1)\delta t + \bar{h}^2(x_r - x_1) \omega q_r + (1-\omega)q_1 - \omega q_m - (1-\omega)q_j + g\delta t \bar{h}^3(x_r - x_1) \omega J_r + (1-\omega)J_1 - J_o + \beta \delta t \bar{q}h(x_r - x_1) \omega I_r + (1-\omega)I_1 - \omega I_m - (1-\omega)I_j = 0 \quad (16)$$

El desarrollo del esquema numérico para las fases de almacenamiento, consumo y recesión, se obtuvo por un procedimiento similar al de la fase de avance; la disposición de la malla lagrangiana se presenta en la Figura 2.

Eficiencias en el riego por melgas

La eficiencia de aplicación (E_a) se define como: $E_a = V_r / V_p$, donde V_r es el volumen requerido para satisfacer las necesidades de agua en la zona de raíces del cultivo [L^3] y V_p es el volumen de proyecto [L^3]. V_r se obtiene con la expresión: $V_r = L_n A_r$, donde L_n es la lámina de riego neta [L], definida con los requerimientos de agua del cultivo, y A_r es la superficie de riego considerada [L^2]. El volumen de proyecto se calcula como: $V_p = Q_p T_r$, donde Q_p es el gasto de proyecto [$L^3 T^{-1}$] y T_r es el tiempo requerido para el riego [T]. Si en la expresión que define la eficiencia de aplicación el numerador y el denominador se dividen entre A_r , se obtiene: $E_a = L_n / L_b$, donde L_b es la lámina de riego bruta y L_n la lámina de riego neta.

La eficiencia de requerimiento de riego (E_r) se define como: $E_r = V_d / V_r$, donde V_r es el volumen requerido por el cultivo y V_d el volumen disponible [L^3]. La eficiencia indica la manera en que se satisfacen las necesidades de agua del cultivo.

Sería ideal que todas las plantas recibieran la misma cantidad de agua, con el riego, aplicando una lámina uniforme en toda la longitud de la melga. Para evaluar la uniformidad en la distribución de la lámina infiltrada se utiliza el coeficiente de uniformidad de Christiansen denotado por CUC, y calculado como: $CUC = 1 - (\sum |I_i - \hat{I}| / n\hat{I})$ donde I_i es la lámina infiltrada en el punto i [L], $\hat{I}$ es la lámina infiltrada media [L] y n es el

$$[\omega q_1 + (1-\omega)q_j] \delta t - (x_1 - x_j)[\omega(h_1 + I_1) + (1-\omega)(h_j + I_j)] - [\omega q_r + (1-\omega)q_m] \delta t + (x_r - x_m)[\omega(h_r + I_r) + (1-\omega)(h_m + I_m)] - [\phi h_1 + (1-\phi)h_r + \phi I_1 + (1-\phi)I_r](x_r - x_1) + [\phi h_j + (1-\phi)h_m + \phi I_j + (1-\phi)I_m](x_m - x_j) = 0 \quad (15)$$

For monotonous forms of surface flow profiles, we proposed the following discrete form of the momentum equation:

$$2\bar{q}h(q_r - q_1)\delta t + (\bar{g}h^3 - \bar{q}^2)(h_r - h_1)\delta t + \bar{h}^2(x_r - x_1) \omega q_r + (1-\omega)q_1 - \omega q_m - (1-\omega)q_j + g\delta t \bar{h}^3(x_r - x_1) \omega J_r + (1-\omega)J_1 - J_o + \beta \delta t \bar{q}h(x_r - x_1) \omega I_r + (1-\omega)I_1 - \omega I_m - (1-\omega)I_j = 0 \quad (16)$$

We obtained the numerical scheme for the phases of storage, consumption and recession through a procedure similar to the advance phase. Figure 2 shows the Lagrangian mesh arrangement.

Efficiencies in border irrigation

The application efficiency (E_a) is defined as: $E_a = V_r / V_p$, where V_r is the volume required to meet the needs of water in the root zone of the crop [L^3] and V_p is the project volume [L^3]. V_r is given by the expression: $V_r = A_r L_n$, where L_n is the net irrigation depth [L], defined with crop water requirements, and A_r is the surface irrigation [L^2]. We calculated the project volume as: $V_p = Q_p T_r$, where Q_p is the project expense [$L^3 T^{-1}$] and T_r is the time required for irrigation [T]. If in the expression that defines the application efficiency the numerator and denominator are divided between A_r , the result is: $E_a = L_n / L_b$, where L_b is the gross irrigation depth and L_n the net irrigation depth.

The efficiency of irrigation requirement (E_r) is defined as: $E_r = V_d / V_r$, where V_r is the volume required by the crop and V_d the available volume [L^3]. Efficiency indicates the way in which the crop water needs are met.

Ideally, all plants should receive the same amount of water for irrigation, by applying a uniform water depth along the entire border. To evaluate uniformity in the distribution of the infiltrated depth we used the Christiansen uniformity coefficient denoted by CUC, and calculated as: $CUC = 1 - (\sum |I_i - \hat{I}| / n\hat{I})$, where I_i is the infiltrated depth at point i [L], $\hat{I}$ is the mean infiltrated depth [L] and n is the number of points considered for calculation. A CUC greater than or equal to 0.80 is generally considered acceptable in border irrigation (Rendón *et al.* 1997).

número de puntos considerados para efectuar el cálculo. Generalmente se considera que un CUC mayor o igual que 0.80 es aceptable en el riego por melgas (Rendón *et al.* 1997).

Cálculo del gasto óptimo

Los modelos descritos se utilizan para la determinación del gasto, para éste se obtiene la eficiencia de uniformidad mayor y se mantienen valores de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego lo más elevado posible; es decir, para determinar el gasto óptimo de riego con láminas de riego y longitudes de melga diferentes. En este estudio, los parámetros en los dos modelos se determinaron con los valores relacionados con el triángulo de texturas reportados por Rawls y Brakensiek (1983); en el caso del modelo hidrológico la determinación fue directa, y en el caso del modelo hidrodinámico completo la determinación de parámetros se realizó de acuerdo con Saucedo *et al.* (2005).

La eficiencia de uniformidad medida a través del coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) puede obtenerse para diferentes combinaciones de longitud y gasto de aporte en la cabecera de la melga. Para cada longitud de melga es posible determinar el gasto de aporte que produce un máximo en el coeficiente de uniformidad manteniendo los valores más elevados de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego, el gasto así determinado se denomina gasto óptimo. Al correlacionar diversos valores de gastos de aporte óptimos y longitudes de melga es posible establecer que existe una proporción básicamente lineal entre ambas variables para un suelo considerado homogéneo. La relación del gasto óptimo y la longitud de la melga para el suelo franco-arcilloso, láminas aplicadas de 8, 10 y 12 cm se muestra en la Figura 3.

En los dos modelos comparados en este estudio los parámetros se determinaron con los valores relacionados con el triángulo de texturas reportados por Rawls y Brakensiek (1983) (Cuadro 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del modelo hidrodinámico completo y el modelo hidrológico en riego por melgas, en términos de los perfiles de flujo y la distribución final de la lámina infiltrada, se realizó para diez suelos del triángulo de texturas. Para propiciar el cambio en el tiempo de la lámina infiltrada, según la ecuación de Green-Ampt para el modelo hidrológico y la ecuación de Richards para el modelo hidrodinámico completo, se ajustó el parámetro h_f de la ecuación de Green-Ampt para reproducir el cambio de la lámina infiltrada según la ecuación de Richards (Figura 4).

Optimal irrigation flow calculation

We used the models described above to determine the optimal flow. For this purpose, we obtained higher uniformity efficiency and kept values of irrigation application and requirement as high as possible, in order to determine the optimal irrigation flow with water depths and different border lengths. In this study, we determined the parameters in the two models with the values associated with the triangle of textures reported by Rawls and Brakensiek (1983). In the case of the hydrological model, we determined it directly, and in the full hydrodynamic model, we performed the parameter determination in accordance with Saucedo *et al.* (2005).

The efficiency of uniformity measured using the Christiansen uniformity coefficient (CUC) can be obtained on the head of the border for different combinations of length and input flow. For each border length, you can determine the input flow produced by a maximum in the uniformity coefficient, maintaining the highest values of the efficiencies of application and irrigation requirement; the flow determined in this way is called optimal irrigation flow. By correlating various values of optimal input flows and border lengths, it is possible to establish that there is a linear ratio between the two variables for a soil considered homogeneous. Figure 3 shows the relationship between the optimal flow and the border length for the clay loam soil, with applied depths of 8, 10 and 12 cm.

In the two models compared in this study, we determined the parameters with the values associated with the triangle of textures reported by Rawls and Brakensiek (1983) (Table 1).

RESULTS AND DISCUSSION

We applied the full hydrodynamic model and hydrological model in border irrigation in terms of flow profiles and final distribution of the infiltrated water depth for ten soils of the textures triangle. To foster the change in time of the infiltrated depth according to the Green-Ampt equation for the hydrological model and the Richards equation for the full hydrodynamic model, we adjusted the h_f parameter of the Green-Ampt equation to reproduce change in the infiltrated depth in accordance with Richards equation (Figure 4).

After adjusting the parameters of the Green-Ampt equation, we compared the flow profiles for a time during irrigation. Despite the adjustment for changing the infiltrated depth remarkably similar in both models, we found differences between the profiles (Figure 5). This may be due principally to the

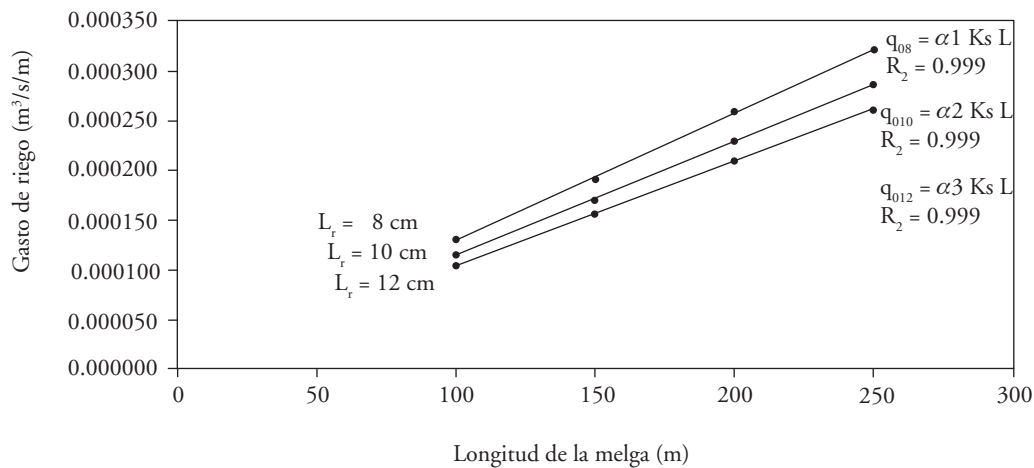


Figura 3. Relación entre la longitud de melga y el gasto de aporte óptimo para el suelo franco-arcilloso para láminas de riego de 8, 10 y 12 cm, cuando $\alpha_1=3.05$, $\alpha_2=2.58$ y $\alpha_3=2.35$. Ks es expresado en m/s.

Figure 3. Relationship between the border length and the optimal contribution flow for the clay loam soil for water depths of 8, 10 and 12 cm, when $\alpha_1 = 3.05$, $\alpha_2 = 2.58$ and $\alpha_3 = 2.35$. Ks is expressed in m/s.

Cuadro 1. Los parámetros relacionados con el triángulo de texturas y reportados por Rawls y Brakensiek (1983).

Table 1. Parameters related to the triangle of textures as reported by Rawls and Brakensiek (1983).

Textura del suelo	Porosidad total ε (cm ³ /cm ³) (θ_s)	Capacidad de campo (cm ³ /cm ³) (θ_c)	Punto de marchitamiento permanente (cm ³ /cm ³) (θ_{pmp})	Contenido de humedad inicial (cm ³ /cm ³) (θ_o)	Presión en el frente de humedecimiento (cm) (h_f)	Conductividad hidráulica a saturación (cm/h) (K_s)
Arcilla	0.49	0.48	0.24	0.360	100	0.05
Arcilla limosa	0.48	0.43	0.21	0.320	100	0.05
franco-arcillo-limoso	0.48	0.37	0.20	0.285	58	0.08
Franco-arcilloso	0.48	0.35	0.19	0.270	35	0.15
Arcilla-arenosa	0.43	0.35	0.23	0.290	28	0.18
Limo	0.50	0.28	0.09	0.185	33	0.40
Franco	0.48	0.24	0.14	0.190	22	0.70
Franco-limoso	0.54	0.28	0.13	0.205	28	0.58
Franco-arcillo-arenoso	0.42	0.23	0.15	0.190	12	1.00
Franco-arenoso	0.44	0.17	0.09	0.130	11	3.00

Después de ajustar los parámetros de la ecuación de Green-Ampt se la compararon los perfiles de flujo para un tiempo durante el riego. A pesar del ajuste para el cambio de la lámina infiltrada notablemente similares en ambos modelos, existieron diferencias entre los perfiles (Figura 5). Esto pudo deberse principalmente al uso de la ecuación de cantidad de movimiento en el modelo hidrodinámico completo

use of the motion equation in the full hydrodynamic model, and because in the hydrologic model we only used the mass conservation equation.

We compared the final distributions of the infiltrated depths obtained by applying the full hydrodynamic model and hydrological model. We presented the example of a clay loam soil type (Figure 6).

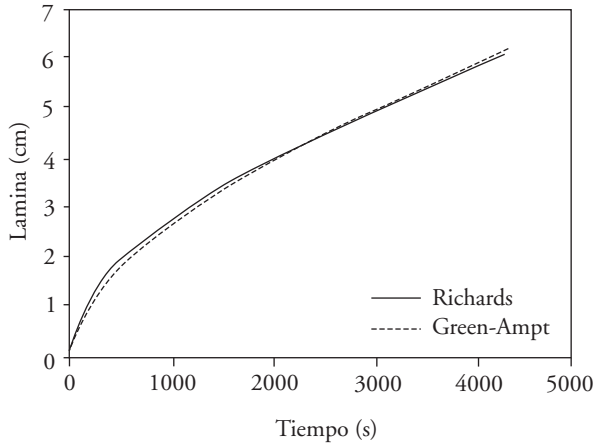


Figura 4. Cambio de la lámina infiltrada mediante las ecuaciones de Richards y de Green-Ampt en suelo tipo franco-arcilloso.

Figure 4. Change of the infiltrated depth by using Richards and Green-Ampt equations in clay loam soil type.

y a que en el modelo hidrológico solamente se usó la ecuación de conservación de la masa.

Se compararon las distribuciones finales de las láminas infiltradas obtenidas mediante la aplicación del modelo hidrodinámico completo y del modelo hidrológico. Se presenta el ejemplo para un suelo tipo franco arcilloso (Figura 6).

El error cuadrático medio entre las distribuciones finales de la lámina infiltrada se calculó con la siguiente ecuación: $Ecm = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Lr_{MHC_j} - Lr_{MH_j})^2 \right]^{1/2}$

donde: Lr_{MHC_j} es la lámina de riego calculada con el modelo hidrodinámico completo y Lr_{MH_j} es la lámina de riego calculada con el modelo hidrológico y la media de errores se calcularon con:

$$M_{error} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Lr_{MHC_j} - Lr_{MH_j}) \quad (\text{Cuadro 2}).$$

La diferencia entre las distribuciones finales de la lámina infiltrada calculadas con ambos modelos crece con el incremento del contenido de arcilla en el suelo. El valor de la media de los errores indica que el MH subestima los resultados del MHC para tres tipos de suelo con predominancia de arcilla, y los sobrestima en los demás casos.

El valor del gasto óptimo de riego conocido como gasto unitario (C) y el tiempo de riego (T_r) para tres láminas de riego se calculó para diez tipos de suelos

We calculated the mean square error between the final distributions of the infiltrated depth with the following equation: $Ecm = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Lr_{MHC_j} - Lr_{MH_j})^2 \right]^{1/2}$ where: Lr_{MHC_j} is the irrigation depth calculated

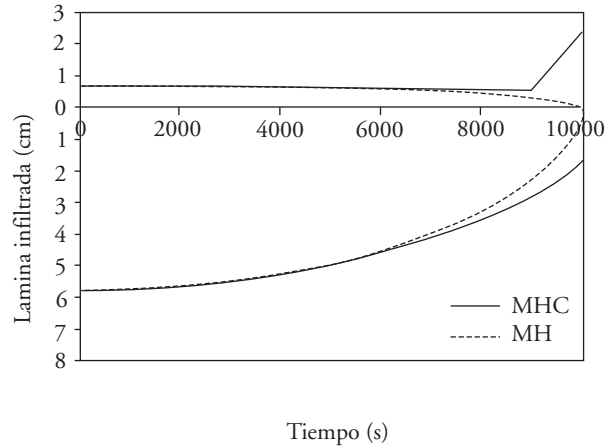


Figura 5. Perfiles de escurrimiento superficial y subterráneo obtenidos con el modelo hidrológico (MH) y el modelo hidrodinámico completo (MHC) para suelo tipo franco-arcilloso.

Figure 5. Profiles of surface and underground runoff obtained with the hydrologic model (MH) and the full hydrodynamic model (MHC) for clay loam soil type.

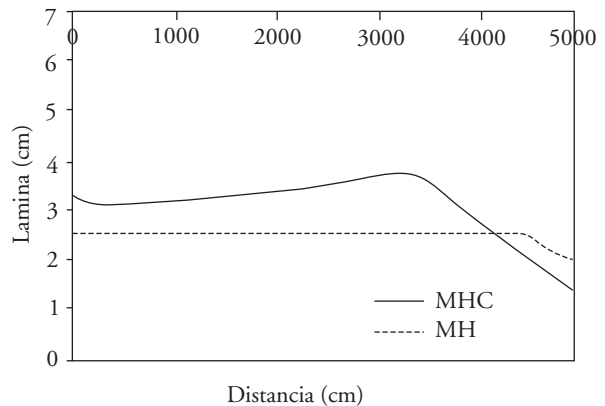


Figura 6. Perfil de la lámina infiltrada obtenido con el modelo hidrológico (MH) y el modelo hidrodinámico completo (MHC), para suelo tipo franco-arcilloso ($L_r=8$ cm).

Figure 6. Infiltrated depth profile obtained with the hydrological model (MH) and the full hydrodynamic model (MHC) for clay loam soil type ($L_r=8$ cm).

Cuadro 2. Error cuadrático medio y media de errores entre las láminas simuladas con el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico completo para diez texturas de suelo.

Table 2. Mean square error and error mean between the depths simulated with the hydrological model and full hydrodynamic model for ten soil textures.

Textura del suelo	Error cuadrático medio (cm)	Media de errores (cm)
Arcilla	1.72	1.66
Arcilla Limosa	1.61	1.31
Franco-arcillo-limoso	1.1	0.012
Franco-arcilloso	0.97	-0.22
Arcilla-arenosa	1.25	-0.069
Limo	1.13	-0.0051
Franco	1.12	-0.028
Franco-limoso	1.06	-0.065
Franco-arcillo-arenoso	1.02	-0.144
Franco-arenoso	1.05	-0.033

del triángulo de texturas, de manera que para (Cuadros 3 y 4).

La diferencia entre los gastos óptimos de riego proporcionados por el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico completo crece conforme se incrementa el contenido de arcilla en el suelo, el incremento en la diferencia se debe a que la hipótesis del flujo en pistón, es decir de la existencia de un frente de humedecimiento bien definido, empleada para la deducción de la ecuación de Green-Ampt, se cumple en menor grado conforme se incrementa el contenido de arcilla en el suelo (Figura 7). El Cuadro

with the full hydrodynamic model, and Lr_{MHj} is the irrigation depth calculated with the hydrological model and the error mean was calculated with:

$$M_{error} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Lr_{MHCj} - Lr_{MHj}) \quad (\text{Table 2}).$$

The difference between the final distributions of the infiltrated depth calculated with both models increases with the increment of clay in the soil. The value of the error mean indicates that MH underestimates the results of MHC for three clay predominant soil types, and overestimates them in other cases.

We calculated the value of optimal irrigation flow known as unit flow (C) and irrigation time (Tr) for three water depths for ten types of soil texture triangle (Tables 3 and 4).

The difference between optimum irrigation flows provided by the hydrological model and the full hydrodynamic model is greater insofar as the soil clay content increases. The increased difference is because the hypothesis of plug flow, that is, the existence of a clearly defined wetting front employed for the deduction of the Green-Ampt equation occurs to a lesser extent as the soil clay content rises. (Figure 7). Table 5 shows the percentage difference between the optimal irrigation unit costs obtained with the hydrological model and the full hydrodynamic model; Figure 8 shows graphically the results obtained and presented in Table 5.

CONCLUSIONS

We compared the irrigation full hydrodynamic model with the hydrological border model. To

Cuadro 3. Cálculo del gasto óptimo y del tiempo de riego con el MH (pendiente topográfica $J_o=0.002$).

Table 3. Calculation of the optimal flow and irrigation time with the MH (topographic slope $J_o=0.002$).

Textura del suelo	Lr = 8 cm		Lr = 10 cm		Lr = 12 cm	
	C (l/s/m ²)	Tr (h)	C (l/s/m ²)	Tr (h)	C (l/s/m ²)	Tr (h)
Arcilla	0.00069	18.12	0.00066	19.96	0.00062	22.92
Arcilla Limosa	0.00072	21.21	0.00065	26.57	0.00062	29.55
Franco-arcillo-limoso	0.00090	19.20	0.00080	26.00	0.00070	29.71
Franco-arcilloso	0.00130	13.30	0.00110	17.30	0.00100	20.90
Arcilla-arenosa	0.00120	13.45	0.00100	23.07	0.00095	27.20
Limo	0.00430	4.500	0.00380	5.800	0.00340	7.200
Franco	0.00570	3.400	0.00510	4.400	0.0047	5.300
Franco-limoso	0.00580	3.400	0.00510	4.400	0.0046	5.500
Franco-arcillo-arenoso	0.00540	3.300	0.00520	3.900	0.0048	5.000
Franco-arenoso	0.01850	1.000	0.01710	1.300	0.0160	1.500

Cuadro 4. Cuadro 4. Cálculo del gasto óptimo y del tiempo de riego con el MHC (pendiente topográfica $J_o=0.002$).
Table 4. Calculation of the optimal irrigation flow and irrigation time with the MHC (topographic slope $J_o= 0.002$).

Textura del suelo	Lr = 8 cm		Lr =10 cm		Lr = 12 cm	
	C (l/s/m ²)	Tr (h)	C (l/s/m ²)	Tr (h)	C (l/s/m ²)	Tr (h)
Arcilla	0.00012	224.1	0.00010	338.2	0.00009	445.0
Arcilla Limosa	0.00014	201.6	0.00012	270.5	0.00011	362.5
Franco-arcillo-limoso	0.00060	44.10	0.00050	66.60	0.00046	82.90
Franco-arcilloso	0.00088	31.40	0.00078	44.00	0.00072	57.80
Arcilla-arenosa	0.00090	28.70	0.00080	42.40	0.00072	52.00
Limo	0.00399	6.900	0.00333	10.00	0.00296	13.70
Franco	0.00411	6.400	0.00354	9.60	0.00326	12.50
Franco-limoso	0.00446	6.200	0.00388	8.80	0.00349	11.60
Franco-arcillo-arenoso	0.00490	5.800	0.00476	7.40	0.00464	9.000
Franco-arenoso	0.02476	1.200	0.02223	1.60	0.02073	2.000

5 muestra la diferencia en porcentaje entre los gastos unitarios de riego óptimos obtenidos con el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico completo. La Figura 8 muestra gráficamente los resultados obtenidos y presentados en el Cuadro 5.

CONCLUSIONES

Se comparó un modelo hidrodinámico completo con uno hidrológico en riego por melgas. Para reducir las variaciones originadas por diferencias en

reduce variations caused by differences in changes of the infiltrated depth obtained with the Green-Ampt and Richards equations used in the hydrological model and full hydrodynamic model, respectively, we performed the suction parameter adjustment in the wetting front of the Green-Ampt equation, which led to the reproduction of change in the infiltrated depth obtained by applying the Richards equation. Comparison based on the analysis of the surface and subsurface flow profiles in irrigation and the final distribution of the infiltrated depth

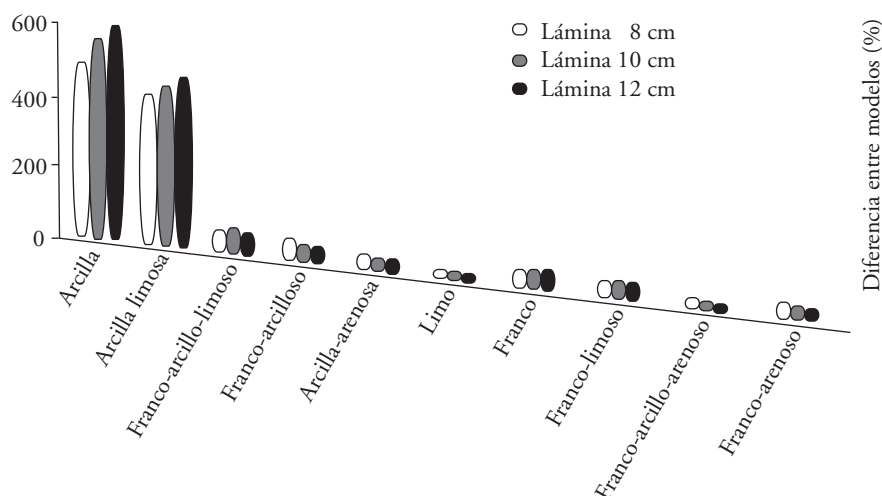


Figura 7. Diferencia en porcentaje entre los gastos unitarios de riego del modelo hidrodinámico completo y el modelo hidrológico, para cada tipo de suelo y para las diferentes láminas.

Figure 7. Percent difference between the irrigation unit flows of the full hydrodynamic model and the hydrological model for each type of soil and the different depths.

los cambios de la lámina infiltrada obtenidos con las ecuaciones de Green-Ampt y de Richards, utilizadas en el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico completo, respectivamente, se realizó el ajuste del parámetro de succión en el frente de humedecimiento de la ecuación de Green-Ampt; así se reprodujo el cambio de la lámina infiltrada obtenida mediante la aplicación de la ecuación de Richards. La comparación a partir del análisis de los perfiles de flujo superficial y subsuperficial en el riego y la distribución final de la lámina infiltrada mostraron diferencias entre los elementos analizados, que pueden atribuirse al empleo de una ecuación de cantidad de movimiento general en el modelo hidrodinámico completo. Las diferencias en los perfiles de flujo generan diferencias en la distribución final de la lámina infiltrada y por lo tanto en el gasto óptimo de riego, de forma que el análisis de su comportamiento en los suelos de triángulo de texturas, en los cuales es conveniente aplicar riego por melgas, la diferencia entre los gastos óptimos de riego proporcionados por el modelo hidrológico y el modelo hidrodinámico completo crece conforme se incrementa el contenido de arcilla en el suelo.

LITERATURA CITADA

Brooks, R. H., and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. 3, Colorado State. University, Fort Collins.

Cuadro 5. Promedio en porcentaje de las diferencias entre los gastos unitarios del modelo hidrodinámico completo y el modelo hidrológico.

Table 5. Percent difference mean between unit flows of the full hydrodynamic model and the hydrological model.

Textura del suelo	Diferencia promedio (%)
Arcilla	541.29
Arcilla Limosa	439.86
Franco-arcillo-limoso	54.05
Franco-arcilloso	42.54
Arcilla-arenosa	30.09
Limo	12.24
Franco	42.30
Franco-limoso	31.09
Franco-arcillo-arenoso	7.63
Franco-arenoso	23.72

showed differences between the analyzed elements, which can be attributed to the use of an equation of overall motion in the full hydrodynamic model. Differences in flow profiles generate differences in the final distribution of the infiltrated depth and, therefore, in the optimal irrigation flow; hence from the analysis of their behavior in texture triangle soils in which border irrigation should be applied, we found that the difference between the optimal irrigation flows provided by the hydrological model and the full hydrodynamic model grows insofar as soil clay content does.

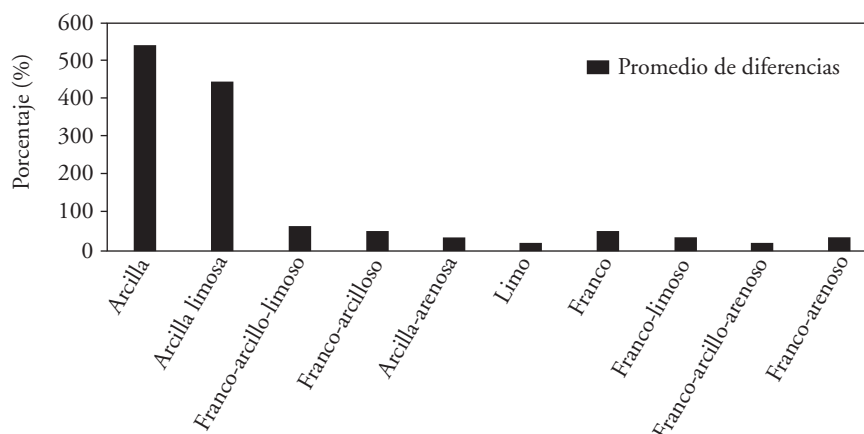


Figura 8. Promedio en porcentaje entre los gastos unitarios de riego del modelo hidrodinámico completo y el modelo hidrológico, para cada tipo de suelo y para las diferentes láminas.

Figure 8. Percent mean between the irrigation unit flows of the full hydrodynamic model and hydrological model for each type of soil and the different depths.

- Burdine, N. T. 1953. Relative permeability calculation from size distributions data. Transactions AIME, 198: 171-199.
- Fuentes, C., R. Haverkamp, and J. Y. Parlange. 1992. Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. J. Hydrol. 134: 117-142.
- Fuentes, C., B de León, H. Saucedo, y J.Y. Parlange. 2004. El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: la ley potencial de resistencia hidráulica. Inge. Hidrául. Méx. 19(2): 65-74.
- Green, W. H., and G. A. Ampt. 1911. Studies in soil physics, I: the flow of air and water through soils. J. Agric. Sci. 4: 1-24.
- Katopodes N., and T. Strelkoff. 1977. Hydrodynamics of border irrigation, complete model. J. Irrig. Drainage Div. IR3:309-324.13188.
- Neumann, S. P. 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. J. Hydraulics Div. ASCE. HY12, pap. 10201: 2233-2250.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1983. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameter. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration, ASAE: 102-112.
- Rendón, L., C. Fuentes: y G. Magaña. 1997. Diseño del Riego por Gravedad. Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México, pp: 1-86.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1: 318-333.
- Saucedo, H., C. Fuentes, y M. Zavala. 2005. El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 2. Acoplamiento numérico para la fase de avance en el riego por melgas. Inge. Hidrául. Méx. 19(2): 109-119.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 44: 892-898.
- Woolhiser, D. A. 1975. Simulation of unsteady overland flow. En Unsteady flow in open channels, editado por K. Mahmood y V. Yevjevich, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, vol II: 485-508.