

Diseño de riego por melgas empleando las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt

• Heber Saucedo* •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor de correspondencia

• Manuel Zavala •

Universidad Autónoma de Zacatecas

• Carlos Fuentes •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Saucedo, H., Zavala, M., & Fuentes, C. (septiembre-octubre, 2015). Diseño de riego por melgas empleando las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 103-112.

Se presenta un método de diseño de riego por melgas basado en la aplicación de un modelo que emplea las ecuaciones de Saint-Venant para describir el flujo del agua sobre el suelo, y la ecuación de Green y Ampt para representar el flujo del agua en el suelo. La principal ventaja del modelo presentado es el poco tiempo de cómputo que requiere para su aplicación, en comparación con el necesario para ejecutar un modelo hidrodinámico completo reportado en la literatura, mismo que emplea las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre el suelo, acopladas internamente con la ecuación de Richards, que permite modelar el flujo del agua en el suelo. Con base en los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo para diez tipos de suelo diferentes se han elaborado cuadros de diseño operativo del riego por melgas.

Palabras clave: riego por melgas, ecuaciones de Saint-Venant, ecuación de Green y Ampt, gasto óptimo.

Abstract

Saucedo, H., Zavala, M., & Fuentes, C. (September-October, 2015). *Border Irrigation Design with the Saint-Venant and Green & Ampt Equations*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(5), 103-112.

A design procedure for border irrigation is presented. The procedure is based on the use of Saint-Venant equations to describe water flow over the soil and the Green and Ampt equation to model water flow in the soil. The main advantage of the model presented is that its application requires very little computation time compared to a full hydrodynamic model using Saint-Venant equations to describe water flow over soil, internally coupled with the Richards equation to model water flow in the soil. The results obtained from applying the model to 10 types of different soils were used to generate operating design tables for border irrigation.

Keywords: Border irrigations, Saint-Venant equations, Green & Ampt equation, optimal flow.

Recibido: 14/02/2015

Aceptado: 11/05/2015

Introducción

El objetivo del diseño de riego por melgas es conseguir la aplicación de una lámina de riego requerida por el cultivo de la manera más uniforme posible, conservando una eficiencia de aplicación alta. El diseño del riego consiste

en determinar el gasto de aporte y el tiempo durante el cual se aplica dicho gasto en la cabecera de la melga para lograr la mayor uniformidad posible; es decir, en determinar el gasto óptimo para una longitud de melga y una caracterización hidrodinámica del suelo específica.

Rendón, Fuentes y Magaña (1997) obtuvieron que el gasto óptimo de diseño guarda una proporción lineal con la longitud de la melga en la cual debe aplicarse. El resultado se obtiene usando un modelo formado por las ecuaciones de Lewis y Milne (1938) para describir el flujo del agua sobre la superficie del suelo, y de Green y Ampt (1911) para describir el flujo del agua en el suelo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las ecuaciones de Lewis y Milne (1938) son la forma más simplificada de modelar el flujo del agua a superficie libre en el riego por melgas.

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo donde se utilice una forma precisa de modelar el flujo del agua a superficie libre, para lo cual se hace uso de las ecuaciones de Saint-Venant, mientras que para la descripción del flujo del agua en el suelo se utiliza la ecuación de Green y Ampt, que es una forma sencilla de modelar el fenómeno manteniendo bases físico-matemáticas en la representación.

Flujo del agua sobre la superficie del suelo

El flujo del agua con una superficie libre es modelado con las ecuaciones de Saint-Venant, que resultan de la aplicación de las leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento. En una melga, la relación entre su ancho y el tirante de agua permite considerar las ecuaciones correspondientes al escurrimiento sobre una superficie de ancho infinito (Woolhiser, 1975). La ecuación de continuidad se escribe como:

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

la ecuación de momentum se escribe en la forma recomendada por Saucedo, Fuentes y Zavala (2005):

$$\frac{1}{h} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2q}{h^2} \frac{\partial q}{\partial x} + \left(g - \frac{q^2}{h^3} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + g(J - J_o) + \beta \frac{q}{h^2} \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

donde $q(x,t) = U(x,t)h(x,t)$ es el gasto por unidad de ancho de melga [L^2T^{-1}]; x , la coordenada espacial en la dirección principal del movimiento del agua en la melga [L]; t , el tiempo [T]; U , la velocidad media; h , el tirante de agua [L]; J_o , la pendiente topográfica de la melga [LL^{-1}]; J , la pendiente de fricción [LL^{-1}]; $V_1 = \partial I / \partial t$, el flujo de infiltración [LT^{-1}], es decir, el volumen de agua infiltrado en la unidad de tiempo por unidad de ancho y por unidad de longitud de la melga; I , la lámina infiltrada [L]; g , la aceleración gravitacional [LT^{-2}]; $\beta = U_{ix}/U$, donde U_{ix} es la proyección en la dirección del movimiento de la velocidad de salida de la masa de agua debido a la infiltración.

La relación entre las variables hidráulicas q y h con la pendiente de fricción, denominada ley de resistencia hidráulica, es adoptada de acuerdo con Fuentes, De León, Saucedo, Parlange y Antonino (2004), haciendo uso de una ley potencial de resistencia:

$$q = kv \left(\frac{h^3 g J}{\nu^2} \right)^d \quad (3)$$

donde ν es el coeficiente de viscosidad cinemática del agua [L^2T^{-1}] y k es un factor adimensional; d es un parámetro adimensional, que varía entre $1/2 \leq d \leq 1$, en función del tipo de flujo; los valores extremos $d = 1/2$ y $d = 1$ corresponden, respectivamente, al régimen de Chézy y al flujo laminar de Poiseuille.

Para establecer las condiciones inicial y de frontera que deben sujetar a las ecuaciones de Saint-Venant para modelar el riego por melgas se tiene en cuenta una melga cerrada, para evitar la pérdida de masa fuera del dominio de riego. Para la fase de avance se tiene:

$$q(x,0) = 0 \quad \text{y} \quad h(x,0) = 0 \quad (4)$$

$$q(0,t) = q_o, \quad q(x_f,t) = 0 \quad \text{y} \quad h(x_f,t) = 0 \quad (5)$$

donde $x_f(t)$ es la posición del frente de onda para el tiempo t y q_o es el gasto de aporte en la entrada de la melga. Para la fase de almacenamiento:

$$q(0,t) = q_0, \quad q(L,t) = 0 \quad (6)$$

donde L es la longitud de la melga y q_0 es el gasto de aporte en la cabecera de la melga. Para la fase de consumo:

$$q(0,t) = 0, \quad q(L,t) = 0 \quad (7)$$

Para cerrar el sistema es necesario conocer la forma en que evoluciona en el tiempo la lámina infiltrada en toda posición sobre la melga, esto es, la ley de infiltración.

Flujo del agua en el suelo

El modelo de Green y Ampt (1911) se establece a partir de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy con las siguientes hipótesis: a) el perfil de humedad inicial en una columna de suelo es uniforme $\theta = \theta_0$; b) la presión del agua en la superficie del suelo es hidrostática: $\psi = h \geq 0$, donde h es el tirante de agua; c) existe un frente de humedecimiento bien definido, caracterizado por una presión negativa: $\psi = -h_f < 0$, donde h_f es la succión en el frente de humedecimiento; y d) la región entre la superficie del suelo y el frente de humedecimiento está completamente saturada (flujo en pistón), $\theta = \theta_s$ y $K = K_s$, donde K_s es la conductividad hidráulica a saturación, es decir, el valor de la conductividad hidráulica de la ley de Darcy correspondiente al contenido volumétrico de agua a saturación. La ecuación diferencial ordinaria resultante es la siguiente:

$$V_I = \frac{dI}{dt} = K_s \left[1 + \frac{(h_f + h)\Delta\theta}{I} \right] \quad (8)$$

donde $\Delta\theta = \theta_s - \theta_0$ es la capacidad de almacenamiento; I es el volumen infiltrado acumulado por unidad de superficie de suelo o lámina infiltrada.

Solución numérica

Para el cálculo del gasto óptimo se hace uso de un modelo numérico para las cuatro fases del

riego por melgas desarrollado por Saucedo, Zavala y Fuentes (2011). La disposición de las celdas de cálculo para las fases de avance, almacenamiento, consumo y recesión se muestra en la figura 1.

La forma discreta de la ecuación de continuidad para la fase de avance se escribe como:

$$\begin{aligned} & [\omega q_\ell + (1-\omega)q_j] \delta t - (x_\ell - x_j) \left[\begin{aligned} & \omega(h_\ell + I_\ell) \\ & + (1-\omega)(h_j + I_j) \end{aligned} \right] \\ & - [\omega q_r + (1-\omega)q_m] \delta t + (x_r - x_m) \left[\begin{aligned} & \omega(h_r + I_r) \\ & + (1-\omega)(h_m + I_m) \end{aligned} \right] \\ & - [\phi h_\ell + (1-\phi)h_r + \phi I_\ell + (1-\phi)I_r] (x_r - x_\ell) \\ & + [\phi h_j + (1-\phi)h_m + \phi I_j + (1-\phi)I_m] (x_m - x_j) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

para las fases de almacenamiento, consumo y recesión se tiene:

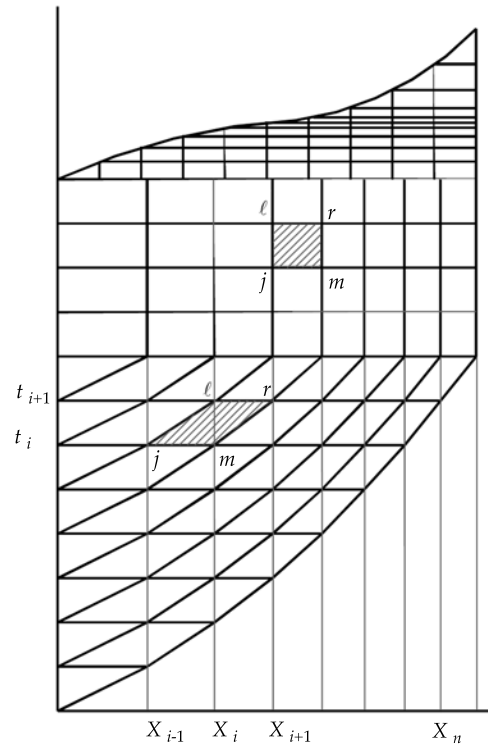


Figura 1. Disposición de las celdas de cálculo para las fases de avance, almacenamiento, consumo y recesión.

$$\begin{aligned} & [\omega q_r + (1-\omega)q_j] \delta t - [\omega q_r + (1-\omega)q_m] \delta t \\ & - [\phi h_r + (1-\phi)h_r + \phi I_r + (1-\phi)I_r](x_r - x_i) \\ & + [\phi h_j + (1-\phi)h_m + \phi I_j + (1-\phi)I_m](x_m - x_j) = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

La ecuación de momentum guarda la misma forma discreta para las cuatro fases del riego:

$$\begin{aligned} & 2\bar{q}\bar{h}(q_r - q_i)\delta t + (g\bar{h}^3 - \bar{q}^2)(h_r - h_i)\delta t \\ & + \bar{h}^2(x_r - x_i)[\omega q_r + (1-\omega)q_i - \omega q_m - (1-\omega)q_j] \quad (11) \\ & + g\delta t \bar{h}^3(x_r - x_i)[\omega J_r + (1-\omega)J_i - J_o] \\ & + \beta\delta t \bar{q}\bar{h}(x_r - x_i)[\omega I_r + (1-\omega)I_i - \omega I_m - (1-\omega)I_j] = 0 \end{aligned}$$

En las ecuaciones (9) a (11), δt es el paso de tiempo, ω y ϕ son factores de peso en espacio y tiempo, y las demás variables se definen de acuerdo con la figura 1. El cálculo de los coeficientes se realiza con base en los valores pertenecientes al nivel de tiempo anterior: $\bar{q} = (1-\phi)q_m + \phi q_r$, $\bar{h} = (1-\phi)h_m + \phi h_r$ (Saucedo et al., 2005). Se introducen las variables pequeñas (Strelkoff & Katopodes, 1977): δh_r , δq_r , δh_i y δq_i tales que, para las celdas interiores se tiene: $h_i = h_j + \delta h_i$, $h_r = h_m + \delta h_r$, $q_i = q_j + \delta q_i$ y $q_r = q_m + \delta q_r$. Se sustituyen en las formas discretas de las ecuaciones de continuidad y *momentum*, y se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas, cuya solución permite avanzar en el tiempo los valores de las variables hidráulicas. El detalle de las entradas al sistema matricial puede consultarse en Saucedo et al. (2011).

La ecuación de Green y Ampt (8) se resuelve numéricamente usando un método de diferencias finitas. El procedimiento se encuentra bien documentado en la literatura y puede consultarse, por ejemplo, en Burden y Faires (1985).

Se ha utilizado un paso de tiempo constante $\Delta t = 1.0$ s para el acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt. La discretización utilizada para la solución de la forma completa de las ecuaciones de Saint-Venant guarda

semejanza con las reportadas en la literatura: Katopodes y Strelkoff (1977): $\Delta t_{\min} = 5$ s; Akanbi y Katopodes (1988): $\Delta t_{\max} = 1$ s; Playán, Walker y Merkley (1994) $\Delta t_{\min} = 2.12$ s.

Ventajas del modelo simplificado

La principal ventaja que se tiene con el empleo del modelo simplificado basado en el uso de las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt es el menor tiempo de cómputo que se requiere para la obtención de resultados de la aplicación del modelo. A manera de ejemplo, se utilizan datos de un experimento reportado en la literatura por Fuentes (1992). Se dispone de los siguientes datos: gasto unitario $q_o = 0.0032$ m³/s/m; pendiente topográfica $J_o = 0.002$ m/m; longitud de la melga $L = 100$ m; parámetros para la ley de resistencia de Fuentes et al. (2004): $d = 1$, $k = 1/54$; parámetro en la ecuación de cantidad de movimiento: $\beta = 2$; valor inicial del contenido volumétrico de agua $\theta_o = 0.2749$ cm³/cm³. Los parámetros θ_s , θ_r , m y η de las características hidrodinámicas fueron determinados a partir de la curva granulométrica del suelo franco de Montecillo. Siguiendo la metodología sugerida por Fuentes (1992) resulta $\theta_s = 0.4865$ cm³/cm³, $\theta_r = 0.0$ cm³/cm³, $m = 1258$, $n = 2.2878$ y $\eta = 11.0$. Los valores de los parámetros $\psi_d = 32.75$ cm y $K_s = 1.84$ cm/h fueron obtenidos mediante la aplicación de un procedimiento inverso para describir datos de una prueba de riego efectuada en el experimento mencionado.

En una computadora de escritorio, con procesador Intel® Core™ i7-4770 CPU @ 3.40 GHz y 8.0 GB de memoria RAM, la aplicación del modelo hidrodinámico completo basado en el uso de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards para modelar las cuatro fases del riego por gravedad (avance, almacenamiento, consumo, recesión) requiere de un tiempo de cómputo de 3 505 segundos (58 minutos y medio, aproximadamente), mientras que la modelación empleando el modelo simplificado basado en el uso de las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt requiere de sólo 23.6 segundos; es decir,

en el ejemplo bajo análisis, el modelo simplificado es 150 veces más rápido que el modelo hidrodinámico completo. La comparación de los resultados obtenidos durante la simulación de la fase de avance empleando ambos modelos se muestran en la figura 2 para el caso de la posición del frente de avance, y en la figura 3 para el caso de la evolución en el tiempo del tirante y la lámina infiltrada en la cabecera de la melga. Puede apreciarse que, no obstante la muy significativa diferencia en los tiempos de cómputo necesarios para la aplicación de ambos modelos, los resultados son muy similares. Es importante aclarar que la comparación se realiza para un suelo franco. Conforme la textura del suelo sea más arcillosa, es de esperarse que la diferencia en los tiempos de cómputo sea aún mayor.

Otra ventaja que tiene el modelo simplificado sobre el modelo hidrodinámico completo es que la información necesaria para su aplicación es, en general, más fácil y menos costosa de obtener que aquella que se ocupa en la aplicación del modelo hidrodinámico completo.

Diseño del riego por melgas

Para el diseño del riego por melgas se pueden utilizar dos métodos (Rendón *et al.*, 1997): pruebas de riego y modelos físico-matemáticos. Las pruebas de riego consisten en hacer experimentos de campo, en donde las variables experimentales son el gasto de riego, longitud de la melga y tipo de suelo. Con base en los resultados de los experimentos, para cada tipo de suelo se obtienen combinaciones de gasto de riego unitario y longitud de la melga que hacen posible aplicar con un alto grado de uniformidad una lámina de riego específica. Las pruebas de riego tienen la desventaja de requerir un tiempo considerable para su ejecución, son costosas y debe realizarse una cantidad elevada de pruebas para determinar el gasto de riego para el que se obtiene la mayor uniformidad en el riego; por estas razones son recomendadas sólo para calibrar los métodos de diseño.

En riego es indispensable distinguir al menos tres eficiencias relacionadas con el proceso: la eficiencia de aplicación, la eficiencia de

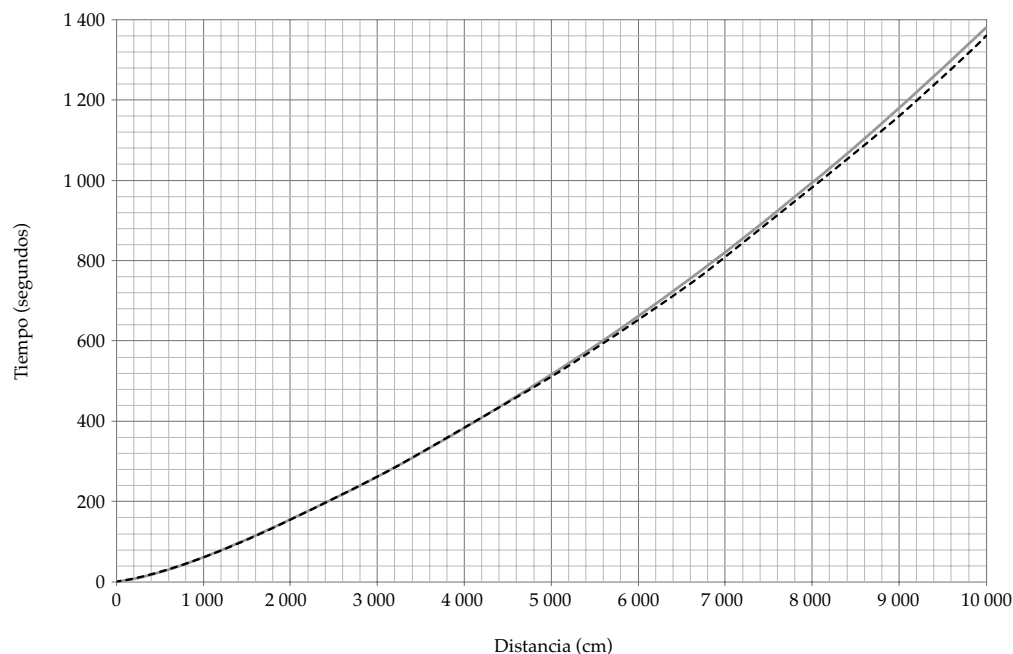


Figura 2. Frentes de avance obtenidos mediante la aplicación del modelo hidrodinámico completo (línea continua) y el modelo simplificado (línea punteada). Suelo franco de Montecillo.

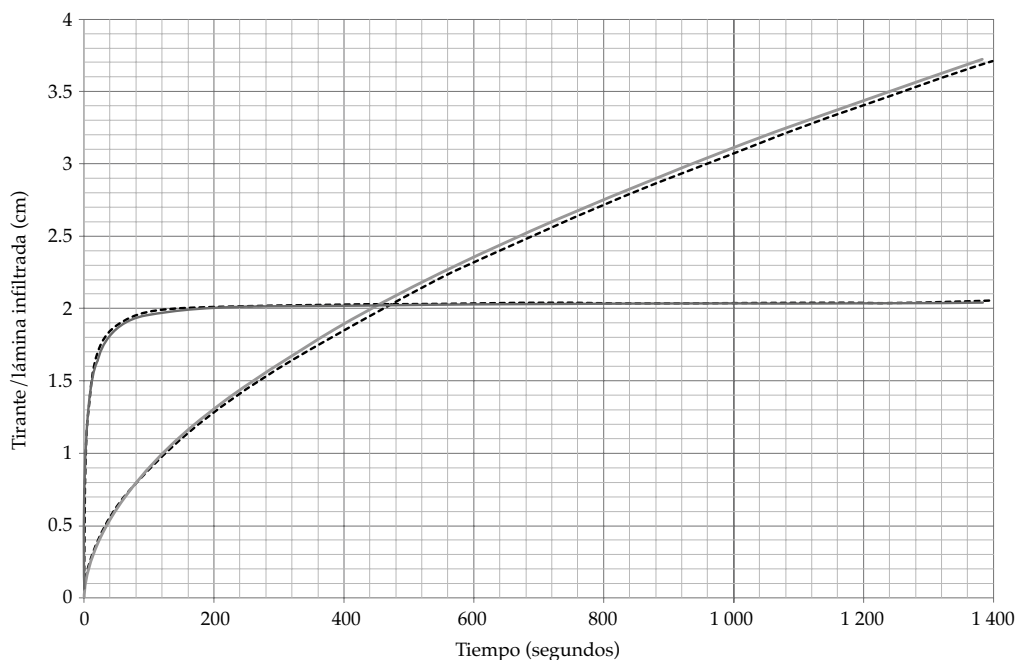


Figura 3. Evolución en el tiempo del tirante y la lámina infiltrada en la cabecera de la melga, obtenidos mediante la aplicación del modelo hidrodinámico completo (línea continua) y el modelo simplificado (línea punteada). Suelo franco de Montecillo.

requerimiento de riego y la eficiencia de uniformidad del riego. La eficiencia de aplicación (Ea) se define como $Ea = Vr / Vp$, donde Vr es el volumen requerido para satisfacer las necesidades de agua en la zona de raíces del cultivo [L^3] y Vp es el volumen de proyecto [L^3]; Vr se obtiene con la expresión $Vr = LnAr$, donde Ln es la lámina de riego neta [L], definida conforme a los requerimientos de riego del cultivo, y Ar es la superficie de riego considerada [L^2]. El volumen de proyecto se calcula como $Vp = QpTr = LbAr$, donde Qp es el gasto de proyecto [L^3T^{-1}], Tr es el tiempo de riego [T] y Lb es la lámina de riego bruta. Si en la expresión (18) el numerador y denominador se dividen entre Ar se obtiene $Ea = Ln/Lb$. La eficiencia de requerimiento de riego (Er) se define como $Er = Vd/Vr$, donde Vd es el volumen disponible [L^3]. Esta eficiencia indica la manera en que se están satisfaciendo las necesidades de agua del cultivo.

La situación ideal respecto a la uniformidad se presenta cuando todas las plantas reciben la misma cantidad de agua, situación que equivale

a aplicar una lámina de riego uniforme en toda la longitud de la melga. Para evaluar la uniformidad en la distribución de la lámina infiltrada puede utilizarse el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC):

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - \hat{I}|}{n\hat{I}} \quad (12)$$

donde I_i es la lámina infiltrada en el punto i [L]; \hat{I} es la lámina infiltrada media [L], y n es el número de puntos considerados para efectuar el cálculo.

Empleando un modelo numérico desarrollado para el acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt, es posible determinar el gasto para el cual se obtiene la mayor eficiencia de uniformidad, manteniendo los valores lo más elevado posible en cuanto a las eficiencias de aplicación y requerimiento de riego; es decir, para determinar el gasto óptimo de riego.

Para calcular el gasto óptimo para diversos tipos de suelo, diferenciados según su caracterización hidrodinámica, se ha procedido como a continuación se indica. El valor de la presión en el frente de humedecimiento (h_f), así como la conductividad hidráulica a saturación (K_s) se determinan con base en los valores proporcionados por Rawls y Brakensiek (1981) en relación con la textura del suelo. El contenido volumétrico de agua a saturación ha sido asimilado a la porosidad total del suelo (ϕ), la cual ha sido determinada mediante el mismo procedimiento.

El contenido volumétrico de agua necesario para asignar la condición inicial $\theta = \theta_0$ para la ecuación de Green y Ampt se determinó teniendo en cuenta la humedad aprovechable de cada tipo de suelo, suponiendo que se ha consumido 50% de dicha humedad antes de la aplicación del riego. La humedad aprovechable se determinó restando los contenidos volumétricos de agua correspondiente a la capacidad de campo (CC) y al punto de marchitamiento permanente (PMP), los valores de CC y PMP para cada tipo de suelo se estimaron de acuerdo con los reportados por Rawls y Brakensiek (1981), asociados con el triángulo de texturas.

En el cuadro 1 se muestran los valores de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt para diez tipos de suelo. El conocimiento de dichos valores y del valor del contenido volumétrico de agua inicial hace posible calcular la relación

entre la longitud de la melga y el gasto de riego óptimo para cada suelo, dada una lámina de riego.

El coeficiente de uniformidad varía de forma sensible con el gasto de riego. En la figura 4 se muestra esta situación para el caso de tres tipos de suelo diferentes. Los puntos de inflexión de cada una de las curvas coinciden con el valor del gasto óptimo para una longitud de melga de 100 m y una lámina de riego de 10 cm para cada uno de los tipos de suelo especificados en la gráfica.

Es posible determinar el gasto de riego óptimo para diferentes longitudes de melga. La representación gráfica de dicho cálculo para un suelo franco se muestra en la figura 5 para tres láminas de riego diferentes. Puede apreciarse que existe una relación básicamente lineal entre el gasto óptimo de riego y la longitud de la melga. El valor de la constante de proporcionalidad entre dichas variables puede expresarse en términos de gasto de aporte por unidad de área, es decir, por unidad de ancho y por unidad de longitud de melga; el resultado se muestra en el cuadro 2 para tres láminas de riego típicas de 8, 10 y 12 cm. El cuadro presentado puede utilizarse con fines de diseño del riego por melgas.

Conclusiones

Se desarrolló un método de diseño de riego por melgas, obtenido mediante la aplicación de

Cuadro 1. Parámetros medios de la ecuación de infiltración de Green y Ampt (1911) utilizados para el diseño del riego por gravedad.

Suelo	θ_0 (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	h_f (cm)	K_s (cm/h)
Franco arenoso	0.16	0.46	12	2.9
Franco	0.20	0.46	25	1.5
Franco limoso	0.17	0.55	30	1.0
Limo	0.14	0.50	35	0.8
Franco arcillo arenoso	0.18	0.42	12	2.0
Franco arcilloso	0.25	0.48	38	0.4
Franco arcillo limoso	0.26	0.49	60	0.15
Arcilla arenosa	0.25	0.42	25	0.5
Arcilla limosa	0.32	0.48	100	0.05
Arcilla	0.36	0.49	100	0.05

un modelo basado en el uso de las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre el suelo, y la ecuación de Green y Ampt para el proceso de infiltración del agua en el suelo. La principal ventaja del modelo presentado es el poco tiempo de cómputo que requiere para su aplicación, comparado con un modelo hidrodinámico completo reportado en la literatura, el cual emplea las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre el suelo, acopladas internamente con la ecuación de Richards, que permite modelar el flujo del agua en el suelo.

Referencias

- Akanbi, A., & Katopodes, N. (1988). *Model for Flow Propagation on Initially Dry Land*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(7), 689-706.
- Burden, R. L., & Faires, J. D. (1985). *Análisis numérico* (721 pp.). México, DF: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Fuentes, C., De León, B., Saucedo, H., Parlange, J. Y., & Antonino, A. (2004). El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 1. La ley potencial de resistencia hidráulica. *Ingeniería Hidráulica en México*, 18(2), 121-131.
- Fuentes, C. (1992). *Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non saturés* (267 pp.). Tesis de doctorado. Grenoble: Universidad Joseph Fourier.
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies in Soil Physics, I: The Flow of Air and Water Through Soils. *J. Agric. Sci.*, 4, 1-24.
- Katopodes, N., & Strelkoff, T. (1977). Hydrodynamics of Border Irrigation, Complete Model. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, IR3*, 309-324.13188.
- Lewis, M. R., & Milne, W. E. (1938). Analysis of Border Irrigation. *Transactions of the ASAE*, 19, 267-272.
- Playán, E., Walker, W. R., & Merkle, G. P. (1994). Two-Dimensional Simulation of Basin Irrigation. I. Theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(5), 837-856.
- Rawls, W. J., & Brakensiek, D. L. (1981). Estimating Soil Water Retention from Soil Properties. *Amer. Soc. Civ. Eng.*, 108(IR2), 167-171.
- Rendón, L., Fuentes, C., & Magaña, G. (1997). Diseño del riego por gravedad (pp. I-75 a I-87). En *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Richards, L. A. (1931). Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- Saucedo, H., Fuentes, C., & Zavala, M. (abril-junio, 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. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20(2), 109-119.

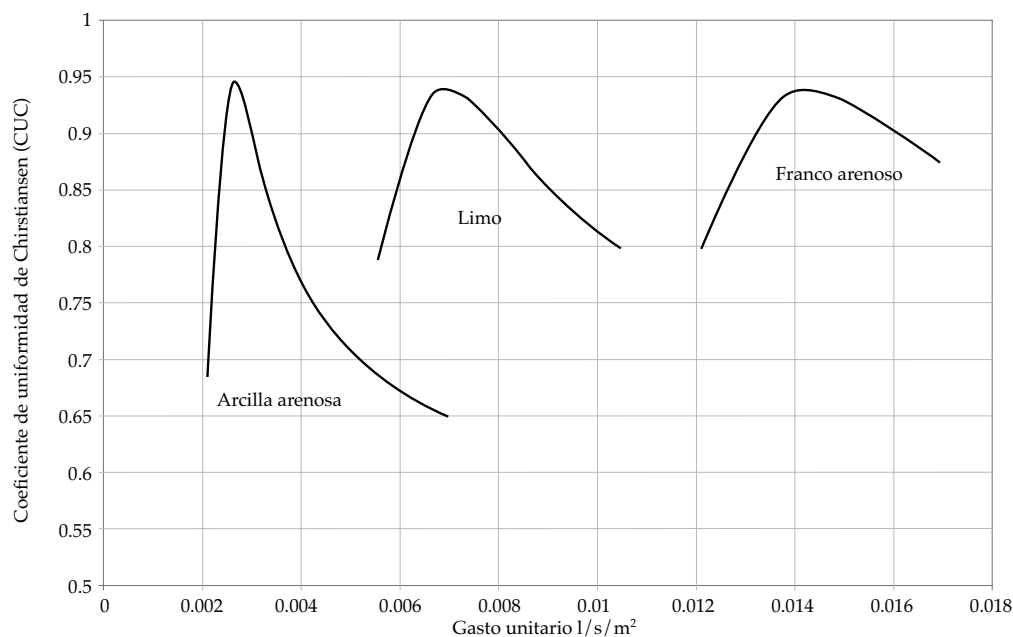


Figura 4. Variación de la eficiencia de uniformidad con el gasto de riego para tres tipos de suelo. Lámina de riego de 10 cm.

Cuadro 2. Cuadro de diseño del riego por melgas: gasto en l/s/m² para la aplicación óptima de la lámina de riego. Factor de fricción $\kappa = 1/54$; pendiente topográfica $J_p = 0.002$. Modelo de ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt.

Suelo	Lámina de riego de 8 cm			Lámina de riego de 10 cm			Lámina de riego de 12 cm		
	Q _{opt}	TR	CUC	Q _{opt}	TR	CUC	Q _{opt}	TR	CUC
	l/s/m ²	horas	-	l/s/m ²	horas	-	l/s/m ²	horas	-
Franco arenoso	0.01565	1.6	0.921	0.01425	2.2	0.938	0.01330	2.8	0.951
Franco	0.00965	2.6	0.922	0.00875	3.5	0.939	0.00810	4.5	0.952
Franco limoso	0.01040	2.4	0.922	0.00890	3.4	0.936	0.00800	4.5	0.949
Limo	0.00810	3.1	0.924	0.00700	4.3	0.937	0.00620	5.9	0.950
Franco arcillo arenoso	0.01740	1.5	0.923	0.01515	2.0	0.938	0.01360	2.7	0.951
Franco arcilloso	0.00330	7.5	0.927	0.00285	10.6	0.941	0.00270	13.4	0.952
Franco arcillo limoso	0.00175	13.7	0.924	0.00145	20.9	0.940	0.00130	27.9	0.953
Arcilla arenosa	0.00290	8.5	0.929	0.00265	11.4	0.945	0.00245	14.7	0.959
Arcilla limosa	0.00060	40.6	0.888	0.00051	59.0	0.901	0.00046	77.5	0.911
Arcilla	0.00053	46.5	0.888	0.00045	67.3	0.901	0.00040	90.3	0.911

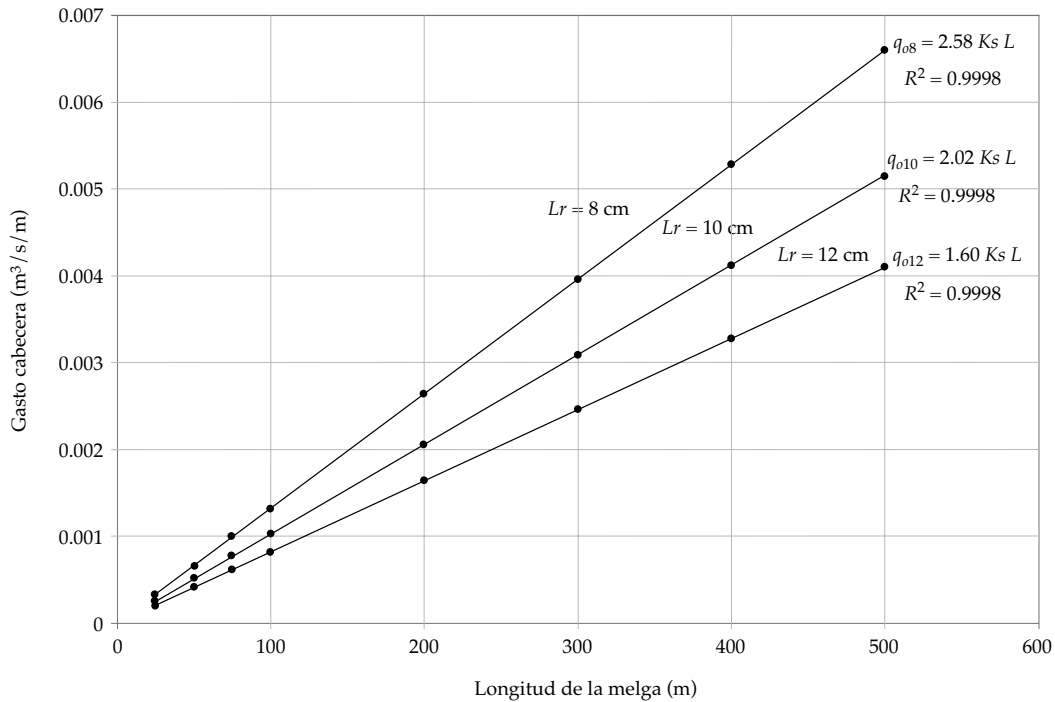


Figura 5. Relación entre la longitud de melga y el gasto de aporte óptimo para un suelo franco para tres láminas de aplicación: 8, 10 y 12 cm; K_s en cm/s.

Saucedo, H., Zavala, M., & Fuentes, C. (abril-junio, 2011). Modelo hidrodinámico completo para riego por melgas. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*, 2(2), 23-38.

Strelkoff, T., & Katopodes, N. (1977). Border-Irrigation Hydraulics with Zero Inertia. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, IR3*, 325-342, 13189.

Woolhiser, D. A. (1975). Simulation of Unsteady Overland Flow (pp. 485-508). In K. Mahmood & V. Yevjevich (Eds.). *Unsteady Flow in Open Channels*. Vol II. Fort Collins, USA: Water Resources Publications.

Dr. Manuel Zavala

Universidad Autónoma de Zacatecas
Av. Ramón López Velarde # 801, Colonia Centro
98000 Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO
Teléfono: +52 (492) 9239 407
mzavala73@yahoo.com

Dirección institucional de los autores

Dr. Heber Saucedo
Dr. Carlos Fuentes

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600
hsaucedo@tlaloc.imta.mx
cfuentes@tlaloc.imta.mx