

DESARROLLO, EVALUACION Y APLICACION DE UN MODELO HIDROLOGICO PARA EL RIEGO POR MELGAS/1*

*Luis R. Calvo ***
*Luis Rendón ****
*Oscar Palacios ****
*Rafael Acosta ****
*Raúl Hernández *****

ABSTRACT

Development, evaluation and application of a hydrological model for border irrigation. A mathematical model for the simulation of the phases of: advance, depletion, storage and recession for border irrigation is presented. It is based on the hydrological approach, founded in the mass conservation equation for the solution of the runoff and the Fuentes and Rendón (1987) infiltration equation. The use of the last equation gives the model the predictive capacity, since it is physically founded. The model was calibrated and evaluated with the results from two irrigation test of 16.0 and 12.0 lps, as a consequence an excellent representation of the experimental data was observed. The use of the model as a tool in border irrigation design as well as its didactical application is recommended.

INTRODUCCION

El problema del diseño del riego por melgas consiste en seleccionar la mejor combinación de longitud, ancho y pendiente de la melga, así como el gasto y tiempo de riego que permitan distribuir de manera uniforme un volumen de agua previamente seleccionado a lo largo y ancho de la melga.

De las variables señaladas anteriormente, la única con la que se puede trabajar con mayor

libertad es el gasto de riego, ya que las demás son dependientes de las características del terreno y de la maquinaria a emplear en la cosecha.

Este problema de diseño puede ser atacado, entre otras formas, con la implementación de modelos de simulación, los cuales permiten simular en forma rápida y a bajo costo diversas situaciones de diseño.

La presente investigación se planteó con el objetivo de desarrollar un modelo matemático para el riego por melgas, basado en la solución de la ecuación de conservación de la masa y efectuando ciertas simplificaciones en la dinámica del escurrimiento superficial. Asimismo se plantea la posible aplicación del modelo al diseño del riego por melgas.

Fases del riego por melgas

El riego por melgas consiste en introducir un gasto de riego en ésta, el cual produce 2 escurrimientos, uno superficial y otro subterráneo; con fines prácticos ambos escurrimientos pueden considerarse como unidimensionales (Rendón, 1987).

1/ Recibido para publicación el 2 de abril de 1992.

* Parte de la tesis de Maestría en Ciencias presentada por el primer autor en el Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

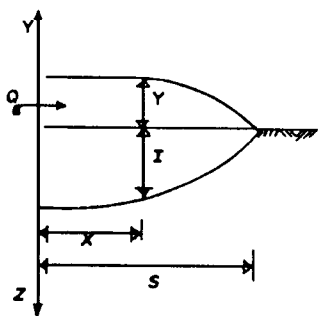
** Dirección de Investigaciones Agrícolas, Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.

*** Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

**** Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo. México.

En el proceso del riego por melgas, cuando éstas presentan el extremo final cerrado, ocurren 4 fases principales. La Figura 1 gráfica estas 4 fases y describe matemáticamente para cada una, las condiciones iniciales y de frontera.

La fase de avance comprende desde el inicio del riego hasta que el frente de avance llega al extremo final de la melga (Figura 1a). La fase de almacenamiento comprende desde que el agua ha alcanzado el final de la melga hasta que ha cesado

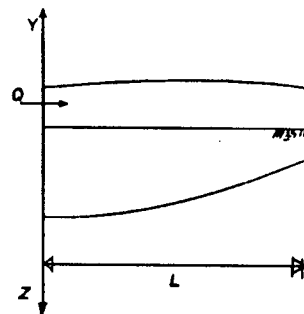


a) Fase de avance

Condición inicial $Y = 0 ; Z = 0 ; X \geq 0 ; t = 0$
 Frontera aguas arriba $Q = Q_E ; X = 0 ; 0 \leq t \leq t_a$
 Frontera aguas abajo $Y = 0 ; X = S ; 0 \leq t \leq t_a$
 $Q = 0 ; Z = 0 ; X = S$

donde:

Q_E = gasto de riego [L^3/T]
 X = distancia en dirección del flujo [L]
 t = tiempo [T]
 t_a = tiempo de avance [T]
 Y = Tirante [L]
 Z = lámina infiltrada [L]
 S = distancia del avance en el tiempo (t) [L]

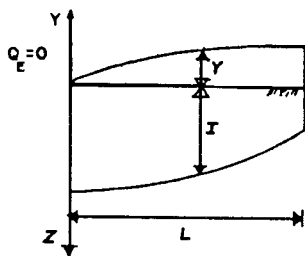


b) Fase de almacenamiento

Aguas arriba $Q_E = Q ; X = 0 ; t_a \leq t \leq t_c$
 Aguas abajo $Q = 0 ; X = L ; t_a \leq t \leq t_c$

donde:

t_c = tiempo de riego [T]
 L = longitud de la melga [L]

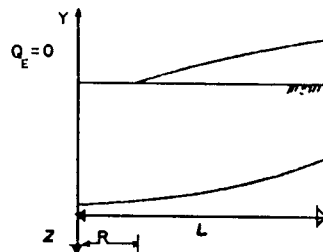


c) Fase de consumo

Aguas arriba $Q = 0 ; X = 0 ; t_c \leq t \leq t_r$
 Aguas abajo $Q = 0 ; X = L ; t_c \leq t \leq t_r$

donde:

t_r = tiempo de recesión [T]



d) Fase de recesión

Aguas arriba $Q = 0 ; X = R ; t \geq t_r$
 $Y = 0 ; X = R ; t \geq t_r$
 Aguas abajo $Q = 0 ; X = L ; t \geq t_r$

donde:

R distancia de recesión [L]

Fig. 1. Esquema de las fases del riego por melgas rectas.

el gasto de riego (Figura 1b). La fase de consumo se inicia cuando el gasto de riego ha cesado y finaliza cuando el tirante es cero en el extremo superior de la melga (Figura 1c). A esta fase se le ha llamado también "retraso de la recesión". La última fase o de recesión se inicia con la desaparición del agua en la superficie aguas arriba de la melga, incrementándose dicha superficie hasta la total desaparición del agua en el extremo final de la melga por efecto de la infiltración y del escurrimiento superficial (Figura 1d).

En la Figura 2 se pueden apreciar en forma integrada las diversas fases del riego por gravedad.

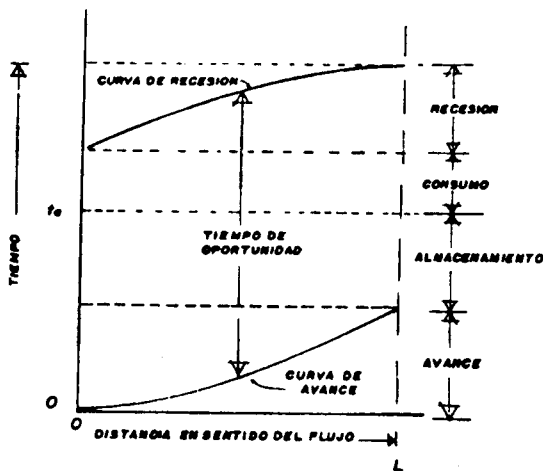


Fig. 2. Representación general del riego superficial con algunos de sus componentes.

Ecuaciones del escurrimiento superficial

En el riego por melgas, el escurrimiento superficial puede considerarse como un caso de flujo hidráulico no permanente, gradualmente variado, y es descrito por las ecuaciones de Saint Venant (1871). Estas ecuaciones están compuestas por la de continuidad y la de momentum, que se resumen en la Figura 3 (Ecuación 1a). La ecuación de momentum puede ser evaluada por la de Manning, que también se presenta en la Figura 3.

Ecuaciones del escurrimiento subterráneo

El flujo isotérmico vertical del agua en un suelo indeformable, parcialmente saturado puede ser descrito por la Ecuación de Transporte de Humedad (Figura 4, Ecuación 1b). La Ecuación 1 en su forma Fokker-Plank presenta una indeterminación en la zona saturada, por lo que Richards (1931) la modificó (Figura 4, Ecuación 2) introdu-

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (vY) = -q_1$$

Ecuación de momentum

(Ec. 1a)

$$\frac{1}{g} \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial Y}{\partial x} + S_f - S_0 - q_1 \frac{v}{gY} = 0$$

donde: g = aceleración gravitacional [LT^{-2}]

v = velocidad media del flujo [LT^{-1}]

t = tiempo [T]

x = distancia [L]

q_1 = velocidad de infiltración [LT^{-1}]

Y = tirante sobre la superficie [L]

S_0 = es la pendiente longitudinal de la melga

S_f = es la pendiente de la línea de enrgía.

Ecuación de Manning

$$S_f = \frac{n^2 |v| v}{Y^{4/3}}$$

donde: n = coeficiente de rugosidad de Manning.

Fig. 3. Ecuaciones del escurrimiento superficial.

Ecuación de transporte de humedad (Fokker-Plank)

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] \quad (\text{Ec. 1b})$$

donde: θ = contenido volumétrico de humedad [L^3L^{-3}]

τ = tiempo de oportunidad [T]

z = la coordenada espacial positiva hacia abajo [L]

$K(\theta)$ = conductividad hidráulica en función de θ [LT^{-1}]

$D(\theta)$ = es la difusividad capilar [L^2T^{-1}], dada por:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{d h}{d \theta}$$

donde: h = presión efectiva del agua expresada en términos de una columna equivalente de agua

Ecuación de Richards

(Ec. 2)

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[C(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z}$$

donde: $C(h)$ = capacidad específica, dada por:

$$C(h) = \frac{d \theta}{d h}$$

Fig. 4. Ecuaciones del escurrimiento subterráneo.

ciéndole el término de capacidad específica $C(h)$, para hacerla aplicable a suelos saturados e insaturados, de perfil homogéneo o estratificado.

Ecuación de infiltración de Fuentes y Rendón (1987)

La ecuación de Fuentes y Rendón (1987) presenta parámetros con carácter físico y por lo tanto puede ser usada con fines predictivos. Esta Ecuación 3 se presenta en la Figura 5.

$$I = \frac{S_T \tau^{1/2}}{1 + (1-\mu)(K_s/S_T)\tau^{1/2}} + K_s \tau \quad (\text{Ec. 3})$$

con

$$S_T^2 = S_1^2 + 2 K_s \bar{y} (\theta_s - \theta_0)$$

donde

$$\mu = -\frac{1}{2} \left[1 + \alpha(1-\gamma) \right] \left[1 - (K_0/K_s) \right] + 1$$

$$\gamma = 2 K_s \bar{y} (\theta_s - \theta_0) / S_T^2$$

donde: S_1 = sorbilidad [$\text{LT}^{-1/2}$]
 S_T = sorbilidad total [$\text{LT}^{-1/2}$]
 θ_s = contenido volumétrico de humedad a saturación natural [LT^{-3}]
 θ_0 = contenido volumétrico de humedad inicial [LT^{-3}]
 K_0 = conductividad hidráulica inicial [LT^{-1}]
 K_s = conductividad hidráulica a saturación natural [LT^{-1}]
 $\bar{y}$ = tirante medio [L]
 α = parámetro de forma de las características hidrodinámicas del suelo.

Fig. 5. Ecuaciones de infiltración de Fuentes y Rendón, 1987.

MATERIALES Y METODOS

Desarrollo del modelo

El modelo que se presenta se basa en el enfoque de la conservación de la masa, que establece que para la fase de avance o cuando la melga está cerrada:

(Ec. 4)

$$V_E = V_S + V_I$$

donde: V_E = volumen de entrada
 V_S = volumen superficial
 V_I = volumen infiltrado.

La Ecuación 4 puede escribirse de la siguiente manera:

(Ec. 5)

$$Q_E t = \int_0^S Y(X, t) dX + \int_0^S I(X, \tau) dX$$

donde: Q_E = gasto de entrada a la melga [L^3T^{-1}]
 S = distancia recorrida por el frente de avance en un tiempo t
 $I(X, \tau)$ = lámina de agua infiltrada en función de la distancia y el tiempo de oportunidad.

Esta ecuación puede ser resuelta, para cada una de las fases si se conoce la función de infiltración y si se hacen ciertos supuestos sobre la dinámica del escurrimiento superficial. En el presente modelo, la función de infiltración utilizada es la representada por la Ecuación 3.

Fase de avance

Suponiendo que el escurrimiento superficial se desplaza como una lámina de espesor constante conocido (Y) y que el suelo es homogéneo a lo largo de la melga, entonces, la Ecuación 5 se puede resolver para el avance:

(Ec. 6)

$$s(t) = \frac{1}{Y} \left[Q_E t - \int_0^S I(\tau) dX \right]$$

La solución de la Ecuación 6 se basa en una discretización constante en el tiempo y variable en el espacio, la cual se resuelve recursivamente para cada intervalo de tiempo, obteniéndose la siguiente expresión general:

(Ec. 7)

$$\Delta X_M = \frac{M Q_E \Delta t - \sum_{j=1}^{M-1} \Delta X_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} (I_{M-j+1} + I_{M-j}) \Delta X_j}{\bar{Y} + F_f I_1}$$

donde: I_j = lámina de agua infiltrada a la entrada de la melga en el tiempo $t_j = j \Delta t$, calculada con la Ec. 3
 F_f = factor de forma del escurrimiento subterráneo
 M = número de intervalos de tiempo considerados.

La forma del perfil superficial al final de la fase de avance se calcula con la siguiente ecuación (Rendón, 1987):

(Ec. 8)

$$Y(X) = a \left[1 - e^{-b(L-X)} \right]$$

donde: e = base de los logaritmos neperianos
 a, b = constantes de ajuste
 L = longitud de la melga.

Los valores de a y b se obtienen suponiendo que el tirante en el extremo final de la melga es conocido e igual al tirante normal Y_N :

(Ec. 9)

$$Y_N = a \left[1 - e^{-bL} \right]$$

de donde

(Ec. 10)

$$a = \frac{Y_N}{1 - e^{-bL}}$$

Para obtener el valor del parámetro b se aplica el procedimiento Newton-Raphson, empleando como primer estimador de b la expresión:

(Ec. 11)

$$b^* = Y_N / L$$

Al integrar la Expresión 8 a todo lo largo de la melga, se obtiene la ecuación del volumen superficial, cuyo residuo se escribe como:

(Ec. 12)

$$P(b^*) = Y_N \left[\frac{L}{1 - e^{-b^*L}} - \frac{1}{b^*} \right] - V_s$$

El nuevo estimador b^{**} se obtiene de la siguiente manera:

(Ec. 13)

$$b^{**} = b^* - \frac{P(b^*)}{P'(b^*)}$$

donde: $P'(b^*)$ es la derivada de la Ec.12 respecto a b^* .

Con el nuevo estimador (b^{**}) se repite la secuencia de cálculos partiendo de la Ecuación 12 hasta que se cumpla la convergencia:

(Ec. 14)

$$\left| \frac{b^{**} - b^*}{b^{**}} \right| \leq 0.001$$

Con el valor final de b se obtiene a con la Ecuación 10 y se calculan los tirantes empleando la Ecuación 8.

Fase de almacenamiento

En la fase de almacenamiento se considera que el tirante es constante a lo largo de la melga, el cual es la incógnita en lugar de la distancia de avance ($s(t)=L$), ya que la melga está cerrada. Por lo tanto, de la Ecuación 5 se obtiene:

(Ec. 15)

$$\bar{Y} = \frac{1}{L} \left[Q_E t - \int_0^L I(\tau) dx \right]$$

La solución numérica de la Ecuación 15 queda expresada en los términos siguientes:

(Ec. 16)

$$\bar{Y} = \frac{Q_E t - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} (I_j + I_{j+1}) \Delta x_j}{L}$$

Al final de la fase de almacenamiento, el perfil superficial se define con la siguiente ecuación:

(Ec. 17, Ec. 18 y Ec. 19)

$$Y(X) = Y_N + a \left[1 - e^{-bX} \right]$$

con

$$a = \frac{Y_E + Y_N}{1 - e^{-bL}}$$

donde su primer estimador Y_E es:

$$Y_E = Y_N + \left[1 - e^{-cL} \right]$$

El valor del parámetro c se obtiene por el Método de Newton-Raphson, utilizando un primer estimador c^* , como

(Ec. 20)

$$c^* = - \frac{\ln(1 + Y_N - Y_E^*)}{L}$$

con

$$Y_E^* = L * S_0$$

Una vez obtenido Y_E con la Ecuación 19, para darle una mayor curvatura a la superficie libre del agua, Y_E se incrementa en el tirante normal (Y_N). Con este valor de Y_E se obtiene el valor del parámetro b con el Método de Newton-Raphson, utilizando un primer estimador $b^* = c^*$; posteriormente se calcula a con la Ecuación 18 y finalmente los tirantes con la Ecuación 17.

Fase de consumo

El volumen superficial se obtiene para cada intervalo de tiempo, con la ecuación:

(Ec. 21)

$$V_s = Q_E t_c - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} [I_j + I_{j+1}] \Delta X_j$$

donde: t_c = tiempo de riego.

Para conocer cuándo termina la fase de consumo se define la siguiente estrategia. En primer lugar, se calcula la velocidad del escurrimiento superficial en régimen permanente, lo cual se hace utilizando la Fórmula de Manning:

(Ec. 22)

$$V = \frac{1}{n} S_0^{1/2} Y_N^{2/3}$$

Después se calcula el tiempo en que el escurrimiento superficial se encuentra en equilibrio cuando el efecto de la gravedad ha cesado, con la siguiente ecuación:

(Ec. 23)

$$T_e = \frac{L}{2V}$$

Posteriormente se calcula la longitud de la melga cubierta con el agua al tiempo de equilibrio (T_e) como:

(Ec. 24)

$$T_e = \frac{L}{2V}$$

donde: V_s = volumen superficial calculado al final de la fase de almacenamiento.

Finalmente se calcula el tiempo que tarda en desaparecer el tirante Y_N a la entrada de la melga por interpolación lineal como:

(Ec. 25)

$$T_{yn} = \frac{T_e Y_N}{Y_f}$$

donde: Y_f = tirante correspondiente a la longitud de la melga (L_{sa})
con $L_{sa} = L - L_{al}$ al final de la fase de almacenamiento.

La forma del perfil superficial al final de la fase de consumo se calcula con la ecuación:

(Ec. 26, Ec. 27, Ec. 28, Ec. 29 y Ec. 30)

$$Y(x) = a [1 - e^{-bx}]$$

por lo que:

$$a = \frac{Y_E}{1 - e^{-bL}}$$

siendo

$$Y(L) = Y_E = Ls + Dle$$

donde: Ls = tirante al final de la fase de almacenamiento
 Dle = incremento de tirante obtenido con la Ec. 29

$$Dle = \frac{Vte}{L}$$

donde: Vte = volumen del agua que se mueve hacia aguas abajo de la melga e igual a:

$$Vte = \frac{V}{2} T_{yn}$$

Para obtener el valor del parámetro b se aplica el procedimiento Newton-Raphson, empleando como primer estimador de b la expresión:

(Ec. 31)

$$b^* = \frac{Y_E}{L}$$

Integrando la Ecuación 26 a todo lo largo de la melga, y sustituyendo el valor de a , se obtiene el volumen superficial, a partir del cual se sigue el mismo procedimiento empleado en la fase de avance para obtener el perfil superficial al final de la fase, con la Ecuación 26.

Fase de recesión

Durante esta fase se determina el tiempo en que el frente de recesión llega a cada uno de los nodos, siendo necesario definir el perfil superficial cada vez que el frente de recesión sea localizado.

El perfil superficial de agua es definido por la siguiente ecuación potencial:

(Ec. 32)

$$Y(X) = a X^b$$

donde: X = distancia desde el frente de recesión hacia aguas abajo de la melga.

Por integración de la Ecuación 32 en toda la longitud con agua de la melga se obtiene la expresión del volumen superficial:

(Ec. 33)

$$V_s = \frac{a}{b+1} L_e^{b+1}$$

donde: L_e = distancia desde el frente de recesión hasta el extremo final de la melga.

El tirante en el extremo de la melga en el tiempo j siempre es conocido e igual a:

(Ec. 34)

$$Y_E^j = Y_E^{j-1} - L_i + L_{te}$$

Y_E^j = tirante en el extremo de la melga en el tiempo j

Y_E^{j-1} = tirante en el extremo de la melga en el tiempo $j-1$

L_i = lámina infiltrada en el extremo de la melga en el intervalo de tiempo considerado

L_{te} = tirante de agua transferido al extremo de la melga debido a la gravedad.

De las Ecuaciones 32 y 33 se obtienen las expresiones de los parámetros a y b :

(Ec. 35 y Ec. 36)

$$a = \frac{Y_E}{L_e^b}$$

$$b = \frac{Y_E L_e}{V_s} - 1$$

Se supone que para que haya movimiento de agua hacia aguas abajo de la melga, la pendiente del espejo del agua (S_a) en el nodo aguas abajo del frente de recesión debe ser menor que la pendiente de la melga (S_o). La pendiente del espejo del agua se calcula con la siguiente ecuación:

(Ec. 37 y Ec. 38)

$$S_a = a b D_v^{b-1}$$

donde: D_v = distancia entre los dos nodos considerados, y:

$$L_{te} = F_d Y_v$$

donde: $0 \leq F_d < 1$ = coeficiente que en el presente trabajo es igual a 0.9

Y_v = tirante en el siguiente nodo aguas abajo, en el caso contrario ($S_a \geq S_o$), entonces $F_d = 0$.

El frente de recesión llega al siguiente nodo cuando se infiltra todo el tirante (Y_s) que existe en dicho nodo:

$$Y_s = Y_v - L_{te}$$

El volumen de agua infiltrado desde la entrada de la melga hasta el frente de recesión (VIP), es la integral de las láminas totales infiltradas hasta dicho punto durante la progresión de la fase, lo cual se hace numéricamente.

El volumen de agua infiltrado en la parte cubierta por agua (VIF), se calcula integrando las láminas infiltradas hasta el tiempo considerado, desde el frente de recesión hasta el extremo de la melga, de manera que el volumen superficial de agua se obtiene por diferencia:

$$V_s = V_E - VIP - VIF$$

siendo V_E el volumen de agua introducido a la melga, $V_E = Q_{Et} t$. Una vez que se conoce V_s , se procede a calcular los nuevos valores de los

parámetros a y b con las Ecuaciones 35 y 36, respectivamente, y se continúa de nuevo el procedimiento para el nodo siguiente.

Trabajos de campo y laboratorio

Las pruebas de campo se realizaron en el Campo de Enseñanza e Investigación del Centro de Hidrociencia (CEICH) del Colegio de Postgraduados. Se efectuó un levantamiento topográfico en cuadrícula de 20x20 m y posteriormente se niveló, dejando la pendiente longitudinal en 0,19% y la transversal nula. Se construyeron un canal de riego y 2 melgas de 110 m de longitud x 5 m de ancho. Una de las melgas fue nivelada manualmente para garantizar uniformidad a lo largo y ancho de la misma, con el fin de realizar en ella 2 pruebas de riego. Estas pruebas de riego se hicieron con gastos de 16,0 y 12,0 L/seg (lps), empleando sifones previamente calibrados. Antes y después de cada prueba se determinó el contenido de humedad en varios puntos a lo largo de la melga, con el método gravimétrico. En cada prueba de riego se midió el tiempo de llegada del frente de avance a cada una de las estaciones ubicadas a lo largo de la melga y separadas a 10 m entre ellas, así como la evolución de los tirantes en el tiempo.

En la melga contigua a la señalada anteriormente, cada 5 m, se tomaron muestras de suelo a las profundidades de 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm, para la determinación de la densidad aparente (ρ_b), densidad (ρ_s) y granulometría. En esos mismos puntos se hicieron pruebas de infiltración (un total de 22 pruebas) con infiltrómetros de doble cilindro, las cuales tuvieron una duración de 24 h.

Determinación de la curva granulométrica

El análisis granulométrico se efectuó empleando tamices de diferentes diámetros y con el método del hidrómetro, para obtener, finalmente, las curvas granulométricas al graficar el diámetro (D) en micras contra la frecuencia acumulada $F(D)$.

Determinación de las características hidrodinámicas

Las características hidrodinámicas del suelo, $h(q)$ y $k(q)$, se obtuvieron empleando las ecuaciones tipo van-Genuchten (1980) y Averyanov (1949), citado por Poluvarinova-Kochina (1962), las cuales son, respectivamente:

(Ec. 39, Ec. 40, Ec. 41 y Ec. 42)

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \frac{1}{\left[1 + \left[\frac{h}{h_g} \right]^n \right]^m}$$

$$K(\theta) = K_s \left[\frac{\theta}{\theta_s} \right]^\eta$$

donde: m, n, η y h_g = parámetros empíricos, siendo:

$$m = 1 - (1/n) \quad (0 < m < 1)$$

$$\eta = (2/m) + (1/2) \quad (\text{Fuentes et al., 1986})$$

Determinación del contenido volumétrico de humedad a saturación natural (q_s).

Este parámetro se calculó a partir de los datos puntuales de r_b y r_s obtenidos en la melga donde se realizaron las pruebas de infiltración, empleando la relación de Rogowski (1971):

(Ec. 43)

$$\theta_s = 0.9 \left[1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right]$$

Determinación de los parámetros h_g y m

Los datos experimentales de frecuencia acumulada (F) y diámetro de las partículas (D) obtenidos de la curva granulométrica, fueron ajustados con la siguiente ecuación (Fuentes, 1985; Fuentes et al., 1986):

(Ec. 44 y Ec.45)

$$F(D) = \frac{1}{\left[1 + \left[\frac{Dg}{D} \right]^{\frac{1}{1 - (1 + P_t)^m}} \right]^i}$$

donde: $F(D)$ = frecuencia acumulada con base en el peso de las partículas del suelo de tamaño igual o menor que D .

Dg, P_t, m = parámetros empíricos, siendo

$$1 + P_t = m^{-\alpha}$$

con

$$0 \leq \alpha < 1$$

Finalmente, el parámetro h_g se obtiene con la siguiente expresión (Fuentes, 1985; Fuentes et al., 1986):

(Ec. 46, Ec.47 y Ec. 48)

$$h_g = -\frac{0.148}{D_g} \sqrt{\frac{6(1-\epsilon)}{\theta_s}} \left\{ \frac{19(\mu_1-1) a^\alpha}{\rho_s \pi D_g^2 2^m [(\mu_1-1) a^\alpha + 1 - a^\alpha]} \right\}^{\mu_1-1}$$

donde: E = porosidad, definida por

$$\epsilon = 1 - (\rho_b / \rho_s)$$

$$\mu_1 = \frac{6-3a-2a^{1-\alpha}}{6-4a-3a^{1-\alpha}}$$

Además, los valores de h_g y D_g están dados en cm.

Estos parámetros fueron calculados utilizando el programa desarrollado por Fuentes (1985).

Parámetro n

Una vez obtenidos m , el parámetro n puede ser calculado fácilmente con la Ecuación 42.

Determinación de la conductividad hidráulica a saturación (K_s)

Este parámetro se obtuvo ajustando los valores de láminas infiltradas obtenidas en las pruebas de infiltración contra el tiempo. Para esto se empleó un programa de cómputo que calcula los parámetros de varias ecuaciones de infiltración, incluyendo la de Fuentes y Rendón (1987), seleccionándose el valor de K_s reportado para esta última ecuación.

Parámetros de la ecuación de infiltración de Fuentes y Rendón (1987)

Para poder utilizar la ecuación de infiltración de Fuentes y Rendón (1987) es necesario conocer, además de K_s , la sorbilidad S_1 y el parámetro μ , los cuales fueron determinados de la manera siguiente.

Sorbilidad (S_1)

La sorbilidad ($LT_{0.5}$), que puede definirse como la capacidad del suelo para absorber agua por pura capilaridad, fue calculada mediante la integración numérica de la ecuación de Philips y Knight (1974):

(Ec. 49 y Ec. 50)

$$S_1 = \left[2 \int_{h_0}^0 \frac{\theta(h) - \theta_0}{f(h)} K(h) dh \right]^{1/2}$$

$$f(h) = \frac{2(\theta(h) - \theta_0)}{\theta_s + \theta(h) - 2\theta_0}$$

donde

$$h_0 = h(\theta_0)$$

Parámetro α

Para calcular el parámetro μ es necesario conocer el parámetro α , el cual es un factor de forma de las características hidrodinámicas del suelo y se calculó con la siguiente ecuación (Fuentes, 1986):

(Ec. 51)

$$\alpha = 2 - \frac{4}{S_1^2} \int_0^{\theta} \left[\frac{K(\theta) - K_0}{K_s - K_0} \right] \frac{\theta(h) - \theta_0}{f(h)^2} K(h) dh$$

El término $f(h)$ se obtiene con la misma Ecuación 50. Una vez obtenido α , μ se calculó con la Ecuación 3c.

RESULTADOS Y DISCUSION

Calibración del modelo

La calibración se realizó con los datos de la primera prueba de riego ($QE=16,0$ lps). A partir de los valores de q_0 medidos en cada estación antes de la prueba de riego, se calcularon los parámetros K_0 y S_1 , con las Ecuaciones 40 y 49, tomándose la media geométrica y la media aritmética de los mismos. Los valores usados para efectuar la simulación fueron, respectivamente: los valores de: 0,1026 cm/h y 3,9814cm/h^{1/2}.

El valor de Y utilizado en la Ecuación 3b se obtuvo con 0,8 Y_N .

En el proceso de calibración se ajustó únicamente el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se fijó finalmente en 0,04 hm^{-1/3} debido a que el avance era ligeramente sobreestimado cuando se utilizó el valor de 0,033 hm^{-1/3} propuesto por Schmitz *et al.* (1985).

Evaluación del modelo

Con el fin de evaluar la capacidad predictiva del modelo, se proporcionaron al mismo los parámetros obtenidos en la segunda prueba de riego.

Siguiendo el mismo procedimiento descrito para la calibración del modelo, se recalcularon los valores de conductividad hidráulica inicial (K_0) y la sorbilidad (S_1), ya que dependen de q_0 . Los parámetros que se proporcionaron al programa

para la predicción de la segunda prueba de riego se presentan en el Cuadro 1.

Fase de avance. En la Figura 6 se aprecia que el modelo predice con excelente precisión la fase de avance, ya que los datos simulados se sobrepone a los datos experimentales.

Las bondades de la ecuación de infiltración utilizada se hacen notorias, ya que es imposible lograr una buena predicción del escurrimiento superficial si se ignoran los parámetros físicos que participan en el escurrimiento subterráneo.

Cuadro 1. Datos generales obtenidos para la simulación de la segunda prueba de riego. Gasto de riego = 12,0 lps.

Gasto (lps)	12,0
Longitud (m)	110,0
Ancho (m)	5,0
Pendiente (%)	0,9
Coef. Manning ($TL^{-1/3}$)	0,040
K_o (cm/h)	0,22096
K_s (cm/h)	2,6471
q_o (cm ³ /cm ³)	0,2801
q_s (cm ³ /cm ³)	0,4069
S_1 (cm ³ /h ^{0.5})	3,3584
α	0,5723
m	0,51986
Tiempo riego (min)	50,58

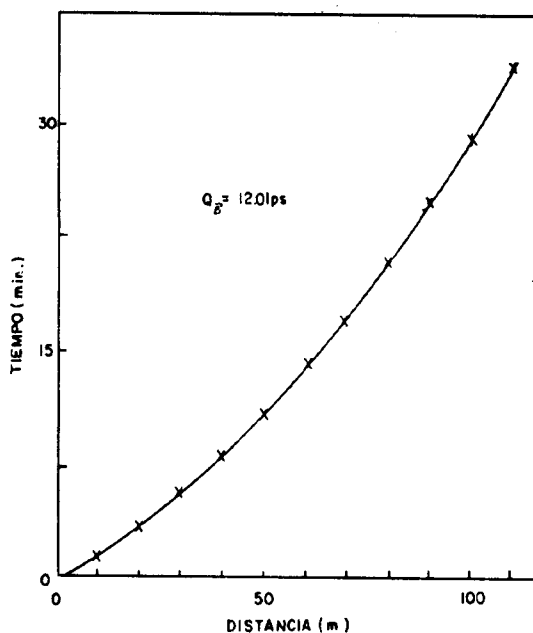


Fig. 6. Representación del avance predicho en la segunda prueba de riego. Datos simulados (-). Datos experimentales (x).

Al comparar los volúmenes superficiales simulado y medido experimentalmente, se observó un error relativo de 7,81%, siendo mayor el simulado. Este error se atribuye a la imprecisión en la lectura de los tirantes, ya que no es posible que en esta fase se subestime la lámina infiltrada (volumen infiltrado) sin sobrecribir el avance.

Fase de almacenamiento. En la Figura 7 se aprecia el resultado de la simulación de la fase de almacenamiento para la segunda prueba de riego (12,0 lps). No obstante las ligeras diferencias entre los perfiles superficiales simulado y experimental, el modelo efectúa una buena representación de la misma. Sin embargo, la forma del perfil puede carecer de importancia, por lo que se efectuó análisis de los volúmenes infiltrados al final de la fase.

El análisis de los volúmenes infiltrados simulado y observado presentaron un error relativo de 1,65%, siendo mayor el simulado.

Este error se atribuye a la falta de precisión en las observaciones de campo, ya que la infiltración es bien estimada por el modelo de acuerdo a lo discutido previamente.

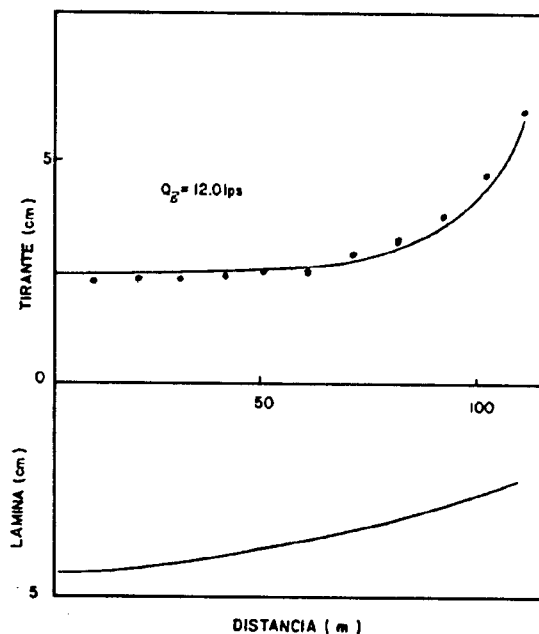


Fig. 7. Perfiles superficial y subterráneo al final de la fase de almacenamiento. Segunda prueba de riego. Datos simulados (-). Datos experimentales (o).

Fase de consumo. En la fase de consumo, la forma del perfil superficial no experimentó grandes cambios, atribuyéndosele la mayor importancia a la definición del tiempo de recesión, el cual, para la segunda prueba de riego fue de 52,60 min.

Fase de recesión. Los resultados de la predicción de la fase de recesión para la segunda prueba de riego se presentan en la Figura 8. En ésta se aprecia la gran similitud de los datos de campo con los datos obtenidos por simulación. A pesar de que la lluvia impidió el seguimiento de esta fase más allá de la estación de observación ubicada a los 70 m, se hace evidente que el esquema numérico planteado reproduce con fidelidad la dinámica del proceso.

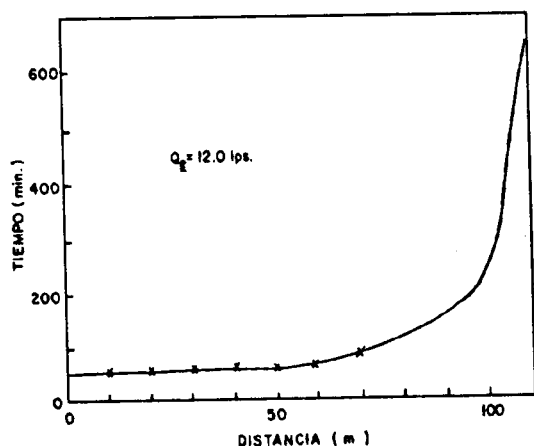


Fig. 8. Representación de los tiempos de recesión observados (x) y simulados (—) en la segunda prueba de riego.

En la misma Figura 7 se observa que al final de esta fase, la velocidad de recesión es muy baja, debido principalmente a que el movimiento del agua es afectado solamente por la infiltración, debido a la condición impuesta en la frontera derecha. Esta misma condición causó una mala distribución del volumen infiltrado.

La capacidad predictiva del modelo cuando cambia el contenido de humedad, se debe a que este cambio es considerado por la ecuación de infiltración utilizada a través de los parámetros S_1 y μ ; además, cuando se cambia el gasto de riego el modelo sigue conservando su capacidad predictiva, ya que los parámetros de la ecuación de infiltración tienen significado físico, por lo que son independientes del gasto de riego.

Los supuestos que se hacen en el modelo sobre la dinámica del escurrimiento superficial en cada una de las fases, pueden ser asimilados en la práctica sin conducir a errores importantes.

Los resultados obtenidos con el modelo y discutidos en los párrafos anteriores muestran que este modelo puede ser utilizado para diseñar el riego por melgas.

Aplicación del modelo al diseño

El problema del diseño del riego por melgas consiste en determinar el gasto de riego Q_E que permita distribuir la lámina de agua deseada uniformemente a lo largo y ancho de la melga. Una vez que se ha elegido el gasto, el tiempo de riego se calcula como:

(Ec.52, Ec.53 y Ec. 54)

$$t_c = \frac{V_r}{Q_E}$$

donde: V_r = volumen de riego [L^3] obtenido con:

$$L_r = (\theta_{cc} - \theta_o) Pr$$

$$V_r = L_r * Am * L$$

donde: L_r = lámina de riego [L]

θ_{cc} = contenido de humedad capacidad de campo [$L^3 L^{-3}$]

θ_o = contenido de humedad inicial [$L^3 L^{-3}$]

Pr = profundidad de mojado [L]

Am = ancho de la melga [L]

L = longitud de la melga [L]

Para observar el comportamiento del modelo ante diferentes situaciones de diseño, se simuló 2 eventos de riego hipotéticos, con gastos de 20 y 10 lps. Para lo anterior se supusieron valores de q_{cc} y de q_o de 0,39 y 0,24 cm^3/cm^3 , respectivamente; además supuso una profundidad de mojado de 0,40 m. Con la Ecuación 53 se obtuvo una lámina de riego de 0,06 m y se determinaron los tiempos de riego respectivos para cada gasto con la Ecuación 52. Finalmente, se recalcularon los valores de los parámetros de la ecuación de infiltración (Ecuación 3).

Al introducir un gasto de 20 lps, se observó que hasta la estación de 50 m la lámina infiltrada es uniforme ($\approx 3,5$ cm), pero menor que la lámina de riego (6,0 cm), esto se debe a que el tiempo de oportunidad es menor con respecto al tiempo de contacto requerido.

A partir de la estación 50 m, la lámina infiltrada aumenta debido al aumento del tiempo de recesión.

La misma situación de diseño se simuló, pero ahora con un gasto de 10 lps, para observar el efecto de este cambio y las bondades del modelo de su aplicación al diseño.

En la Figura 9 se observa que la lámina infiltrada en la entrada de la melga ($\approx 5,5$ cm) es muy similar a la de riego (6,0 cm), sin embargo ésta disminuye paulatinamente hasta la estación 70 m ($\approx 4,5$ cm), pero sigue siendo muy parecida a la de riego. Esta disminución se debe a que en estos puntos la velocidad del frente de recesión fue mayor a la velocidad del frente de avance. A partir de esta estación, la lámina infiltrada aumenta debido al aumento del tiempo de recesión. En este caso, la distribución de la lámina de riego fue mucho mejor que en el caso anterior.

Con lo anterior queda demostrada la gran utilidad del presente modelo como herramienta en el diseño del riego por melgas, pues con su aplicación es posible plantear diversas combinaciones de gastos y tiempos de riego, permitiendo seleccionar aquella con la que se logre la mejor uniformidad del mismo.

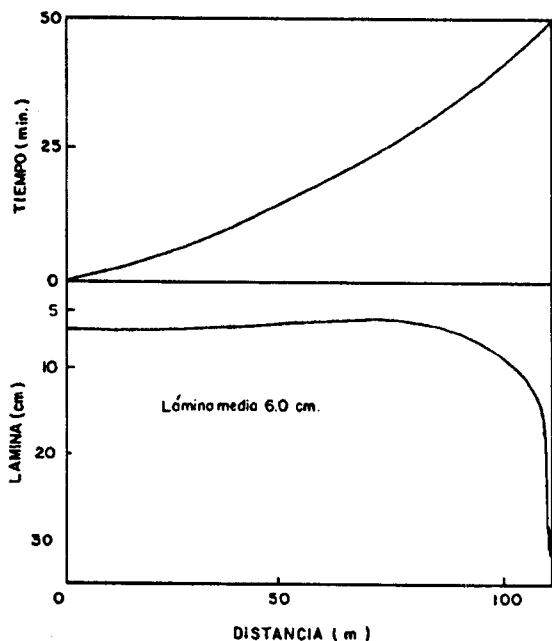


Fig. 9. Representación gráfica de la fase de avance y el patrón final de mojado. Simulación del riego con 10 lps.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los objetivos planteados y con base en los resultados obtenidos se concluye y recomienda lo siguiente:

Conclusiones

- 1- No obstante las simplificaciones que se efectúan en la dinámica del escurrimiento superficial, el modelo que se presenta permite simular excelente precisión de las fases de avance, almacenamiento y consumo en el riego por melgas, así como la fase de recesión hasta las distancias evaluadas.
- 2- Las características propias de la función de infiltración utilizada confieren al modelo capacidad predictiva, ya que son contemplados los cambios de las condiciones iniciales (q_0) y de frontera (Q_E).
- 3- Las láminas infiltradas al final de la fase de recesión presentan una distribución inadecuada debido a la condición de frontera derecha impuesta y a la pendiente de la melga, lo que impide que el riego sea uniforme.
- 4- La disminución del gasto de riego permite mejorar la uniformidad del riego, como se ha apreciado en la evaluación del modelo mediante las pruebas de aplicación, ya que los tiempos de infiltración son más uniformes a lo largo de la melga.
- 5- El presente modelo muestra ser de gran utilidad como herramienta en el diseño del riego por melgas, pues con su aplicación es posible plantear diversas combinaciones de gasto y tiempo de riego, permitiendo seleccionar aquella con la que se logre la mejor uniformidad del riego.

Recomendaciones

- 1- Comparar el presente modelo con algún modelo completo que simule las 4 fases del riego por melgas para validar el comportamiento del mismo.
- 2- Evaluar el modelo con datos experimentales de pruebas de riego en donde se mida la

evolución de la lámina infiltrada a lo largo de la melga durante toda la prueba de riego.

- 3- Aplicar el modelo a una parcela comercial de cultivo para corroborar el comportamiento del mismo en otras condiciones de rugosidad.
- 4- Verificar la simulación de la fase de recesión con otros datos experimentales, ya que en el modelo presente solamente fue evaluada hasta una distancia de 70 m.
- 5- Se recomienda el empleo del presente modelo con fines didácticos, dada la escasa disponibilidad de material similar.
- 6- Investigar con el presente modelo, cuál es la pendiente máxima en la que puede recomendarse el uso de la frontera derecha cerrada.

RESUMEN

Se presenta un modelo matemático para la simulación de las fases de: avance, almacenamiento, consumo y recesión en el riego por melgas, basado en el enfoque hidrológico. Se fundamenta en la ecuación de la conservación de la masa para la solución del escurrimiento superficial y en la solución de la ecuación de Fuentes y Rendón (1987) para el escurrimiento subterráneo. La utilización de esta última ecuación le confiere al modelo capacidad predictiva, ya que está físicamente fundamentada. El modelo fue calibrado y evaluado con los resultados de 2 pruebas de riego con gastos de 16,0 lps y 12,0 lps, observándose una excelente representación de los datos experimentales. Se recomienda el uso del modelo como herramienta en el diseño del riego por melgas, así como su empleo con fines didácticos.

LITERATURA CITADA

- FUENTES, R.C. 1985. El potencial de presión y la conductividad hidráulica: análisis y predicción. Tesis Profesional. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación. México.
- FUENTES, R.C.; RENDON, P.L. 1987. Sobre una ecuación para describir la infiltración vertical. III Congreso Nacional de Irrigación. Los Mochis. Sinaloa.
- FUENTES, R.C.; HERNANDEZ, S.R.; PALACIOS, V.I.; HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.Y. 1986. El potencial de presión y la conductividad hidráulica: análisis y predicción. Resumen de Tesis Profesional. Revista Chapingo, México.
- PHILIP, J.E.; KNIGHT, J.H. 1974. On solving the unsaturated flow equation: 3. New quasi-analytical technique. *Soil Sci.* 117:1-13.
- POLUVARINOVA-KOCHINA, P. 1962. Theory of groundwater movement. Princeton University Press. Princeton, N.J. USA.
- RENDON, P.L. 1987. L'irrigation á la planche: Développement et évaluation d'un nouveau modèle hydrologique pour simuler et prédire l'avancement du front couplé à l'infiltration. Tesis de Doctor-Ingeniero. Universidad Científica, Tecnológica y Médica de Grenoble, Francia.
- RICHARDS, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1:318-333.
- ROGOWSKI, A.S. 1971. Watershed physics: Model of the soil moisture characteristic. *Water Resources Res.* 7(6):1575-1578.
- SAINT VENANT, A.J.C. 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lits. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences.* Vol 73:147-154, 237-240.
- SCHMITZ, G.; HAVERKAMP, R.; PALACIOS, O. 1985. A coupled surface-subsurface model for shallow water flow over initially dry soil. Congress of the International Association for Hydraulic Research. Melbourne, Australia.
- VAN-GENUCHTEN, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.