

FÓRMULA DEL GASTO ÓPTIMO EN RIEGO POR GRAVEDAD PARA SUELOS ALTERADOS POR LABOREO O CON GRIETAS.

Bernardo Muñoz Hernández¹

¹Consultor independiente. Cto. Licenciados 105, Col. Residencial Tecnológico Celaya, Gto.
bemunozh@hotmail.com, Cel 4611482943.

Resumen.

En México los sistemas de riego por gravedad se operan con bajas eficiencias debido a aspectos técnicos y sociales multifactoriales, no obstante, se pueden mejorar.

A nivel parcelario diseñando la aplicación del agua, utilizando fórmulas analíticas o softwares especializados, pero, por la complejidad de las diferentes condiciones del suelo, es recomendable calibrarlos previamente con datos de campo.

En la región del Bajío, se ha tenido problemas en la calibración de parámetros por el problema inverso en los suelos francos y arcillosos, cuando presentan grietas o una capa mullida en la superficie; al forzar el proceso se pueden llegar a parámetros de ajuste, pero, sin sentido físico. Por ello, se propone una fórmula complementaria a la propuesta por Fuentes, et al (2012), la cual, permitió calcular el gasto óptimo para estas condiciones del suelo.

En base a los algoritmos originales y archivos fuente programados en C++, desarrollados por el suscrito, fueron donados sin fines de lucro a la SDAYR, para conformar una nueva interface, hoy denominado "RISUR". En la última versión 2.5.0, se incorporó la fórmula propuesta para suelos agrietados y alterados por el paso de implementos, se probó su aplicación con datos de varios eventos de campo y se muestra solo un caso en particular.

Se encontró que puede ser una alternativa para obtener diseños de riego más precisos, producto de una calibración más acertada dentro del rango del sentido físico de cada textura de suelo.

Palabras claves: calibración de parámetros, infiltración instantánea, software RISUR, diseño de riego.

1. Introducción.

En Guanajuato, se continúa mejorando la infraestructura del riego por gravedad: redes entubadas, revestimiento de canales, cárcamos de bombeo y dentro de la parcela: nivelación de tierras, con asistencia técnica para evaluar, diseñar y proporcionar recetas de riego, elaboradas por el técnico asistente del productor.

Para ello, dicho técnico caracteriza la parcela, realiza una prueba de riego (PR) para obtener por calibración los parámetros de infiltración K_s y h_f de la ecuación de Green y Ampt (1911) y finalmente, determina el gasto óptimo (q_o) mediante la fórmula analítica propuesta por Fuentes, et al (2012) o utilizando el software “RISUR”; cuyos algoritmos originales son propiedad del suscrito y del Dr. Juan Manuel González Camacho, los cuales, fueron donados a la SDAyR para ser utilizados con una mejor arquitectura.

A partir del gasto óptimo (q_o), el técnico determina la “receta de riego”, la cual, contiene los aspectos de: número de surcos por tendido, número de tendidos y tiempo de riego por puesta y total.

Cuando se aplica dicha receta para riegos subsecuentes, funciona en suelos de textura arenosa, sin embargo, en los suelos de textura franca y arcillosa resulta ambiguo; debido a la incertidumbre que arroja la calibración de parámetros de infiltración obtenidos por el problema inverso con el software RISUR versiones 2.4.0 y anteriores o las versiones acopladas a los módulos de diseño del riego en los softwares “MATRI” y “SAPRIGRAT”.

Como en la región del Bajío las texturas dominantes son de este tipo, los técnicos del Programa “Mejores usos del agua en el campo” (MUAC) dependiente de la SDAyR, y el desaparecido “RIGRAT” de la CONAGUA, mostraron preocupación por encontrar una alternativa técnica que les permita ofrecer recetas de riego más coherentes.

Ante esto, se revisó en campo la situación de estos suelos, realizando excavaciones de 30 cm, de profundidad en los surcos por regar. Se observó el perfil del suelo y la evolución del frente de humedecimiento, encontrando algunos aspectos aparentemente obvios.

1. Los surcos recién contruidos para el riego de “presiembr”, o escardados para dar el riego de “auxilio”, presentan una capa superficial mullida (floja) hasta de 20 cm, de profundidad, la cual, se puede determinar físicamente rascando con la mano.
2. Cuando los surcos no están escardados (laborados), al momento de aplicar el riego de “auxilio” el perfil del suelo exterioriza grietas sin un patrón definido sobre la superficie, con ancho y profundidad variable.

Estas dos situaciones de la capa superficial del suelo alteran su estructura uniforme, violando los supuestos de la modelación del riego, donde se acepta que: “El suelo es homogéneo e isotrópico”.

3. Durante la “fase de avance”, una parte del gasto superficial en el surco, se infiltra instantáneamente para llenar los “macroporos” entre los terrones del suelo mullido o entre las grietas de esta capa superficial y una vez llenos los espacios vacíos el frente continúa avanzando.

Estas tres observaciones de campo motivaron el objetivo de este trabajo: modificar la función de infiltración original de Green y Ampt (1911), obtener una calibración de parámetros más objetiva, proponer la fórmula analítica para el gasto óptimo y diseños de riego más acertados.

Para ilustrar la problemática se muestran los datos y la calibración de parámetros de la parcela 3, del Rancho el “Romance”, en el municipio de Jaral del Progreso Gto; donde previamente, se envió al INIFAP una muestra de suelo para análisis físico; con los resultados siguientes: 33.4% de arcilla, 10.6% de arena y 56.0% de limo, la textura fue clasificada como “franco arcillo limosa”. Otras determinaciones: Cont a sat 55%, Cont a Cap de campo 41.3%, Cont a PMP 21.7% y Da 0.98 gr/cm³.

Se realizó una PR el 06 de marzo de 2020, aprovechando el riego de presiembra, donde los surcos estaban contruidos recientemente.

En la Figura 1, se muestra la pantalla principal del RISUR 2.4.0, donde se registran todas las características físicas e hidráulicas de la parcela (variables de riego), las unidades, el rango del valor numérico y la captura de los vectores de la fase de avance y de recesión obtenidas en campo.

Para iniciar la calibración se tomaron valores promedio del Cuadro 1, reportado por Fuentes, et al (2012), para la textura en cuestión, donde $K_s=60$ cm, $h_f=0.15$ cm/h, y rugosidad=0.06. En las siguientes aproximaciones se fijó la rugosidad y el h_f , y por aproximaciones se fue modificando el K_s hasta llegar a un valor de 0.245 cm/h, donde se encontró el mejor ajuste como se muestra en dicha Figura 1.

Pero, las tendencias de las gráficas de datos observados en campo (puntos aislados), contra los simulados no fueron convincentes para ambas fases de avance y recesión. Solo en la fase de avance coinciden en el primero y último punto de la longitud del surco; pero, no se logró mejorar la curvatura tan pequeña de los datos de campo parecidos a una recta y también la recesión no fue posible ajustar.

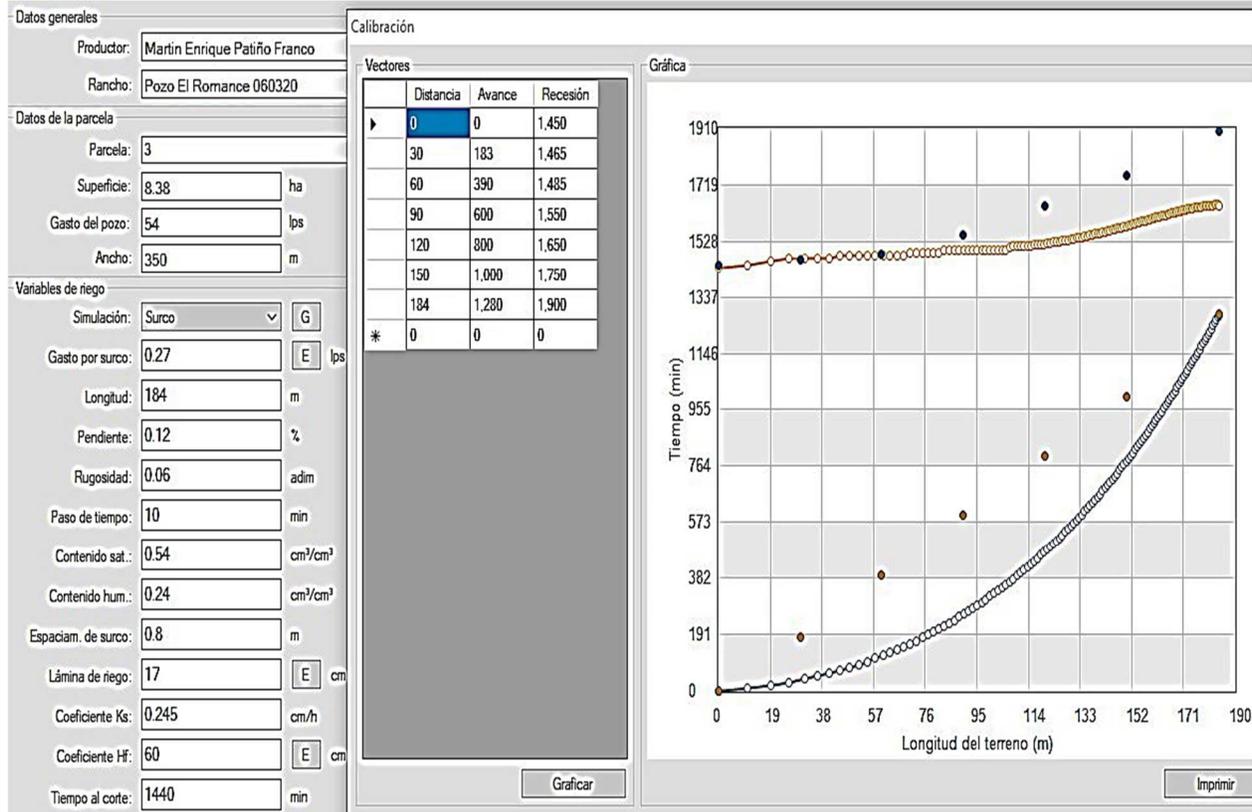


Figura 1. Calibración de parámetros de infiltración, con RISUR ver 2.4.0

Por otra parte, suponiendo que esta calibración fuera válida el gasto óptimo (q_0) estimado con el software RISUR y con la fórmula analítica de Fuentes, (2012) arrojaría un valor de 0.34 lps, por surco.

Cuadro 1. Parámetros medios para las texturas de suelo

Textura del suelo	Parámetros			
	Θ_0 cm ³ /cm ³	Θ_s cm ³ /cm ³	h_f (cm)	K_s (cm/h)
Arcilla	0.36	0.49	140.26	0.05
Arcilla limosa	0.32	0.48	100.16	0.05
Franco arcillo limoso	0.26	0.49	60.12	0.15
Franco arcilloso	0.25	0.48	36.00	0.40
Arcilla arenosa	0.25	0.42	25.72	0.50
Limo	0.14	0.50	30.52	0.80
Franco	0.20	0.46	20.04	1.50
Franco limoso	0.17	0.55	30.07	1.00

Franco arcillo arenoso	0.18	0.42	35.61	2.00
Franco arenoso	0.16	0.46	10.00	2.90

A través de cientos de pruebas de riego de campo evaluadas, se ha encontrado de forma sistemática este inesperado comportamiento, donde no existe un par de parámetros (K_s , h_f), con sentido físico, que permitan ajustar simultáneamente los datos del avance y la recesión. Por ello, se propone modificar la función de infiltración y obtener una nueva ecuación del q_o , para suelos francos y arcillosos.

2. Materiales y métodos.

Para representar la infiltración instantánea en suelos agrietados o laborados se propone un concepto similar al de Mailhol, y González (1993), donde se agrega una variable, en este caso, dependiente del tipo de suelo y del contenido inicial de humedad, denominada “capacidad de almacenaje”, la cual, se expresa por:

$$C_a = (\Theta_s - \Theta_{oc}) P_{gm} \quad (1)$$

Donde:

C_a = capacidad de almacenaje del suelo (L)

Θ_s = contenido de humedad a saturación ($L^3 L^{-3}$)

Θ_{oc} = contenido de humedad inicial de la capa con grietas o mullida ($L^3 L^{-3}$)

P_{gm} = profundidad de la capa de grietas o de suelo mullido (L)

Entonces la función de infiltración propuesta es:

$$l_{\square} = Z + C_a \quad (2)$$

Donde:

l_{\square} es la lámina acumulada (L)

Z la ecuación de Green y Ampt (1911), volumen infiltrado por unidad de área (L):

$$Z = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{Z}{\lambda} \right) \quad (3)$$

K_s es la conductividad hidráulica a saturación (LT^{-1})

\ln es el operador logaritmo natural, considerando que el tirante sobre el surco es pequeño, λ es igual a:

$$\lambda = h_f (\Theta_s + \Theta_o) \quad (4)$$

Θ_0 = contenido de humedad inicial promedio hasta la profundidad radicular ($L^3 L^{-3}$)
 h_f es el potencial de presión del frente húmedo (L).

Denotando ℓ_n de la ecuación (2), como lámina neta (ℓ_n) y espejando Z:

$$Z = \ell_n - Ca \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en la expresión (3), se obtiene:

$$(\ell_n - Ca) = K_S t + \lambda Ln \left(1 + \frac{\ell_n - Ca}{\lambda} \right) \quad (6)$$

La cual permite deducir el gasto óptimo (para la capa 2), donde el suelo es homogéneo de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Volumen}}{\text{Area}} = (\ell_n - Ca) \quad (7)$$

Cuando el área es por unidad de ancho $\text{Area} = L$, L es la longitud del surco o melga, (7) se puede expresar:

$$\frac{q t}{L} = (\ell_n - Ca) \quad (8)$$

Despejando el tiempo de oportunidad:

$$t = \frac{(\ell_n - Ca) L}{q} \quad (9)$$

introduciendo (9) en (6), despejando q , y simplificando se obtiene el gasto óptimo q_{o2} : requerido para infiltrar una lámina ($\ell_n - Ca$) en la capa 2, donde el suelo es homogéneo:

$$q_{o2} = K_S L \alpha_u \quad (10)$$

$$\alpha_u = \frac{(\ell_n - Ca)}{(\ell_n - Ca) - \lambda Ln \left(1 + \frac{(\ell_n - Ca)}{\lambda} \right)} \quad (11)$$

Simplificando, se divide el numerador y denominador por λ , se redefine una nueva variable ℓ_n^* :

$$\ell_n^* = \frac{(\ell_n - Ca)}{\lambda} \quad (12)$$

La ecuación (11) se simplifica:

$$\alpha_u = \frac{\ell_n^*}{\ell_n^* - L_n(1 + \ell_n^*)} \quad (13)$$

Cuando no hay grietas o capa superficial mullida $P_{gm} = 0$, $C_a = 0$, las ecuaciones (1) a (13), se reducen a la ecuación original del q_o de Fuentes, et al (2012).

Ahora la deducción del q_{o1} (de la capa 1), para la capa superficial alterada por el laboreo o por las grietas. Donde, el tiempo de oportunidad de ambas capas lo ha definido el q_{o2} , mediante la ecuación (9):

$$t_{\square} = \frac{(\ell_n - C_a)L}{q_{o2}} \quad (14)$$

Se requiere un gasto adicional q_{o1} , el cual, multiplicado por el tiempo de oportunidad anterior t_{\square} se produzca un volumen que al dividirse entre el área del surco sea igual a la lámina que se infiltra instantáneamente C_a , es decir:

$$C_a = \frac{q_{o1} t_{\square}}{L} \quad (15)$$

Sustituyendo ecuación (14), en (15) y despejando q_{o1} resulta:

$$q_{o1} = \frac{C_a q_{o2}}{(\ell_n - C_a)} \quad (16)$$

Finalmente, el gasto óptimo de las dos capas es:

$$q_o = q_{o1} + q_{o2} \quad (17)$$

Para probar el efecto de estos cambios, se reprogramaron los algoritmos del software "RISUR" en la versión 2.5.0, para calcular un nuevo perfil de infiltración, se incorporó la fórmula para calcular el q_o , de la ecuación (17), también se agregó una restricción al momento de proponer la lámina de riego de diseño (ℓ_n), para no causar indefiniciones se debe cumplir:

$$\ell_n > C_a \quad (18)$$

Es decir, la "lámina de diseño" debe ser siempre mayor a la "capacidad de almacenaje del suelo", por lo demás, se continúa con la base de las ecuaciones de la onda cinemática

en el perfil de la superficie y la función de infiltración de Green y Ampt (1911) propuesta (ecuación 2), en el perfil subterráneo. Las ecuaciones de la onda cinemática son:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (19)$$

$$S_f = S_o \quad (20)$$

Donde: A es el área de la sección transversal del surco por unidad de ancho (L), Q el gasto por unidad de ancho (L^2T^{-1}), t el tiempo acumulado (T), x la distancia de avance (L), τ el tiempo de oportunidad (T), S_f pendiente de la línea de energía (adim), y S_o pendiente del fondo del surco (adim). Ecuaciones resueltas por un método de diferencias finitas programado en lenguaje C++; para detalles ver Muñoz, et al (1998).

3. Resultados y discusión.

En la versión 2.5.0 del RISUR, se adicionó al final y en la parte de abajo un nuevo recuadro para registrar los valores de la profundidad de grietas o de capa mullida (P_{gm}) en centímetros, también denominada profundidad de la capa superficial; todo ello, para mostrar un nuevo resultado en la calibración de parámetros de infiltración.

Se realizó el mismo procedimiento de calibración con los datos de las variables de riego mostrados en la Figura 1, iniciando con valores iniciales de rugosidad $n=0.06$, $K_s=0.245$ cm/h, $h_r=60$ cm y $P_{gm}=0$ cm. Posteriormente, se fue proponiendo nuevos valores, reduciendo gradualmente el K_s e incrementando P_{gm} .

En este caso, los valores $K_s=0.12$ cm/h y $P_{gm}=19$ cm. mostraron una calibración satisfactoria para ambas gráficas de avance y recesión, los resultados se ilustran en la Figura 2.

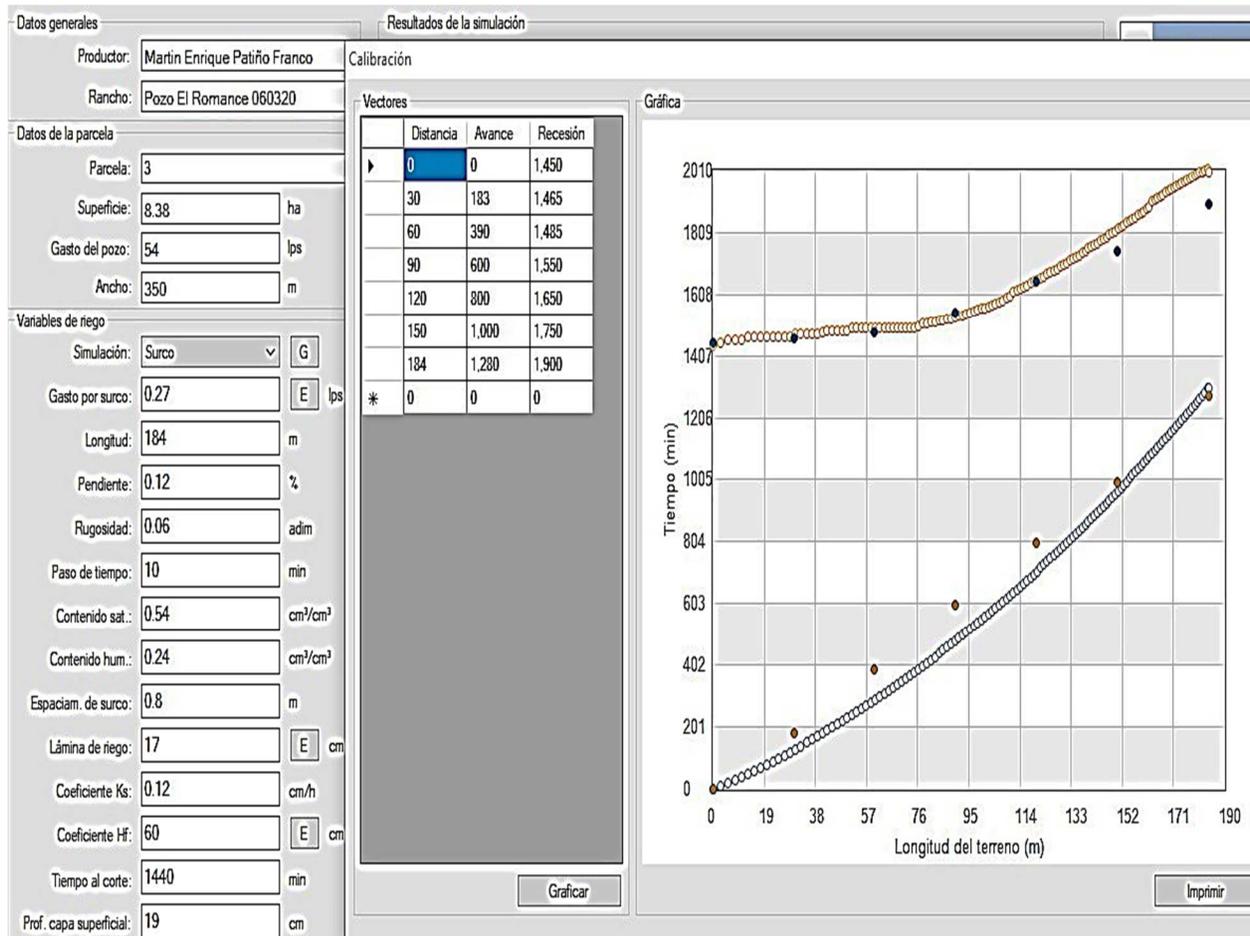


Figura 2. Calibración simultánea de las fases avance y recesión con RISUR ver 2.5.0.

Así mismo, se agregó el ícono E lps adelante del recuadro “Gasto por surco”; el cual, permite calcular directamente q_0 , con la fórmula aquí propuesta, en este caso el resultado fue 0.33 lps/surco, cuyo valor fue similar al calculado con la calibración de la Figura 1; pero, no siempre resulta así.

Con este mejoramiento, es más fiable evaluar la calidad del riego, en este caso el evento PR del 06 de marzo de 2020, aplicado de acuerdo con el criterio del productor y seguidamente reproducir las recetas de riego para los tendidos faltantes.

La Figura 3, muestra el perfil de humedecimiento final considerando los tiempos de oportunidad obtenidos mediante la calibración de parámetros de infiltración por el problema inverso (de la Figura 1), aplicando la ecuación original de Green y Ampt (1911),

como antes se hacía, considerando al suelo homogéneo. Obsérvese el bajo coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) de 82.09%.

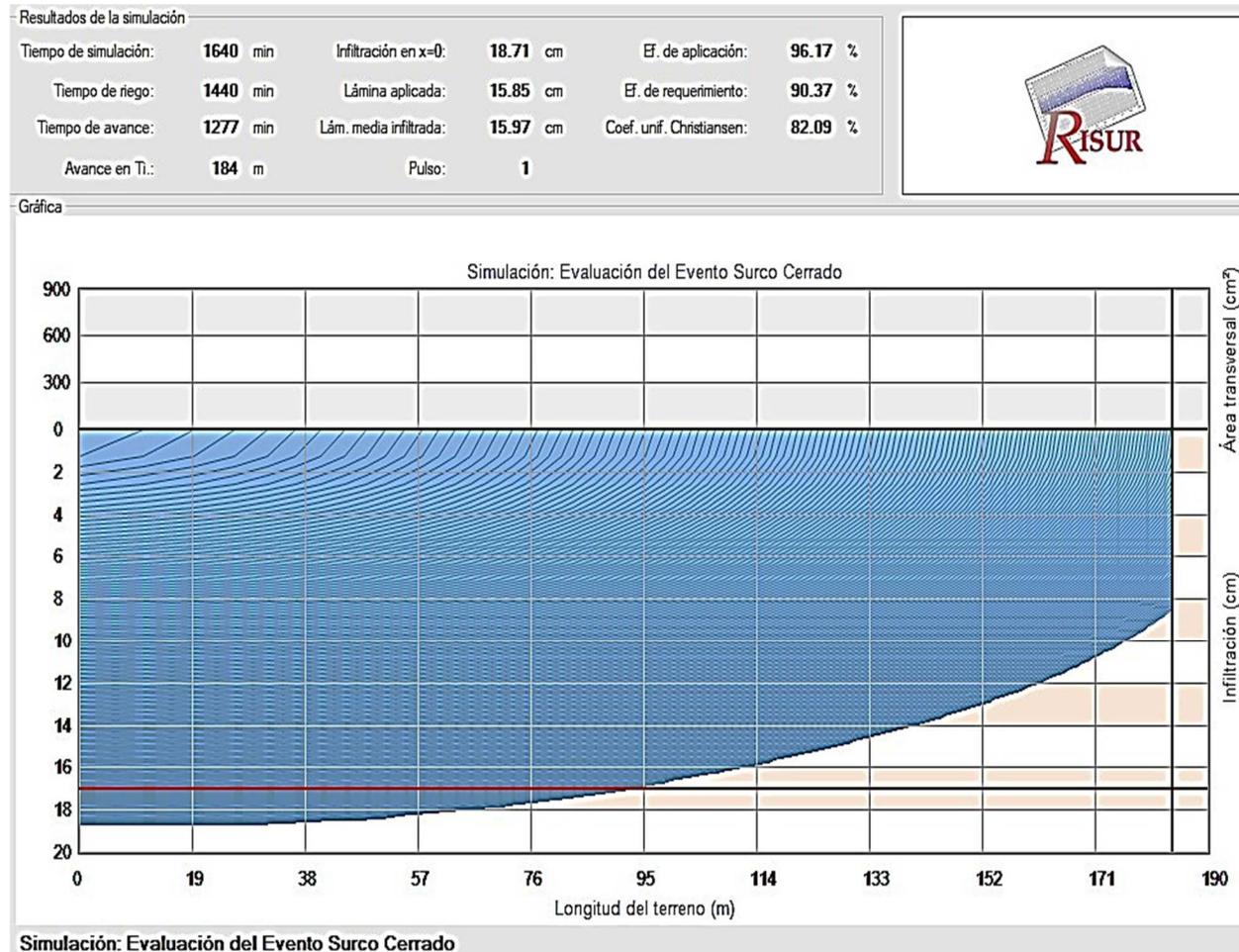


Figura 3. Perfil de infiltración obtenido con RISUR versión 2.4.0 y anteriores.

En contraparte la Figura 4, muestra el perfil de humedecimiento obtenido con los tiempos de contacto resultantes de la calibración por el problema inverso indicados en la Figura 2, y con la ecuación propuesta. Nótese que los 3 indicadores, eficiencia de aplicación (E_a), eficiencia de requerimiento (E_r) y CUC muestran una mejor calidad.

También se observa en la banda azul claro la magnitud de $C_a = 6.5$ cm, lámina que el suelo almacenaría instantáneamente por grietas o laboreo, es decir, cuando la textura del suelo es franca o arcillosa y contiene grietas o esta alterado por laboreo, la lámina de riego por aplicar debe ser mayor a la capacidad de almacenaje, caso contrario en la práctica no sería posible aplicar una lámina menor.

Para diseñar otros riegos de la misma parcela, las condiciones cambiarían en cuanto a: contenido inicial de humedad (Θ_0), lámina por aplicar (l_n^{\square}), rugosidad (n) y profundidad de grietas o de suelo mullido (P_{gm}). Será necesario realizar otro diseño y su receta de riego respectiva, debido a las siguientes consideraciones:

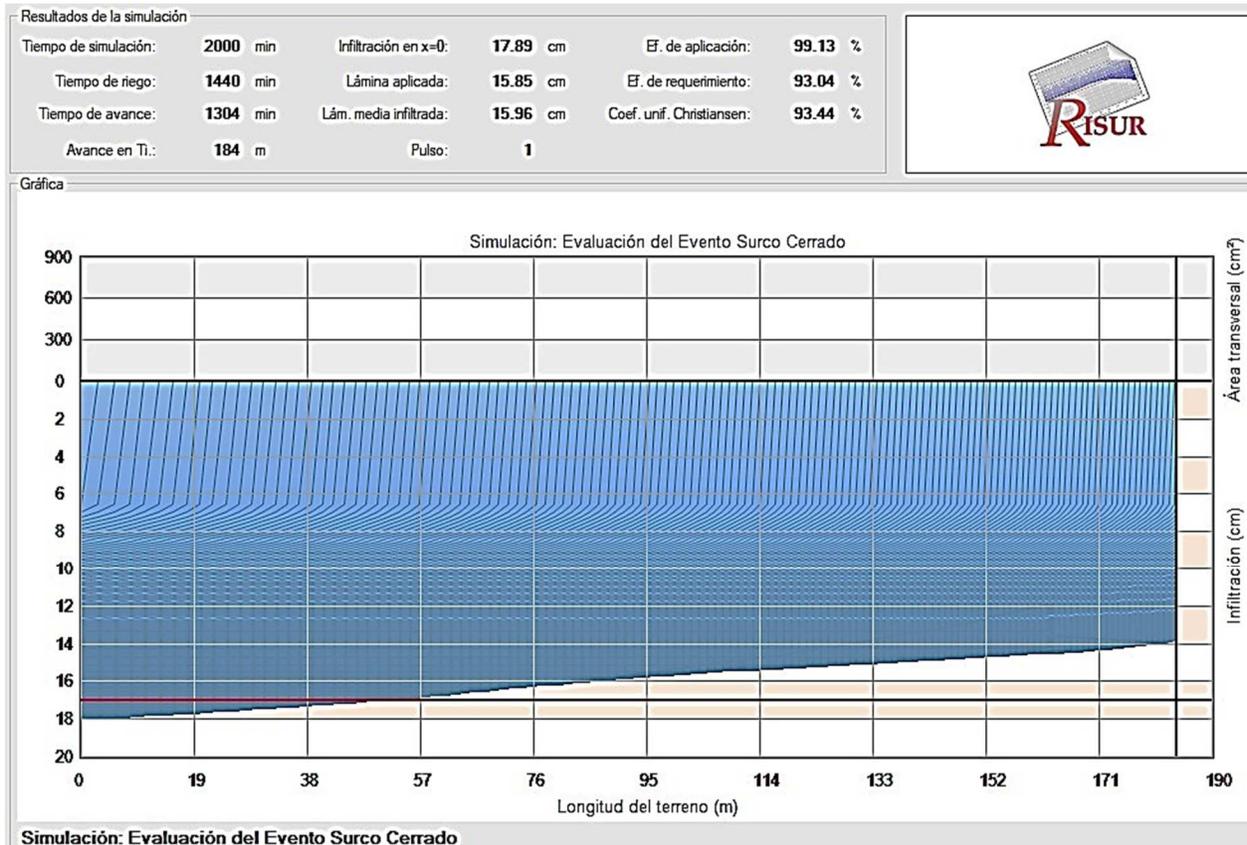


Figura 4. Perfil de infiltración obtenido con la versión 2.5.0 de RISUR.

Cuando hay grietas estas variables están relacionadas; a menor humedad inicial, mayor profundidad de grietas, mayor rugosidad y mayor lámina por reponer.

Por otro lado, cuando existe capa de suelo mullido por el paso de implementos, el contenido inicial de humedad y la lámina neta (l_n^{\square}), están relacionados. En el riego de presiembra, el valor de (Θ_0), está cercano al punto de marchites permanente y P_{gm} toma valores de hasta 35 cm.

En riegos de auxilio cuando los surcos están escardados P_{gm} puede llegar hasta 20 cm, pero, cuando el riego de auxilio se aplica sobre surcos sin escardar o condición de suelo apretado, la P_{gm} tiende a cero.

Para elaborar la receta entre riegos y considerando la dificultad para estimar (Θ_o) promedio en la profundidad de raíces del cultivo, se recomienda estimar las variables con la siguiente secuencia: ℓ_n^{\square} , Θ_o y P_{gm} .

$$\ell_n^{\square} = ET_o K_c N_d \quad (19)$$

Donde:

ET_o , K_c , son la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo promedios del periodo (cm), N_d , número de días transcurridos entre el último riego y el actual.

Considerar la restricción

$$\ell_n^{\square} \leq (\Theta_{cc} - \Theta_{pmp}) Pr \quad (20)$$

Donde:

Pr , es la profundidad de las raíces del cultivo (cm), si se cumple la ecuación (20), el contenido inicial de humedad se estimaría con la expresión:

$$\Theta_o = \Theta_{cc} - \frac{\ell_n^{\square}}{Pr} \quad (21)$$

P_{gm} , se obtiene del perfil del suelo midiendo en varios puntos el promedio de la profundidad de suelo mullido o de grietas en (cm), de toda la parcela.

Por otra parte, se obtuvieron por simulación (RISUR" versión 2.5.0), los perfiles de humedecimiento del gasto óptimo: en la Figura 5, obtenido con la fórmula original de Fuentes, et al (2012), con la calibración de la Figura 1, y en la Figura 6, utilizando la fórmula propuesta y la calibración de la Figura 2.

Resultados de la simulación

Tiempo de simulación:	2020 min	Infiltración en x=0:	17.07 cm	Ef. de aplicación:	98.6 %
Tiempo de riego:	1232 min	Lámina aplicada:	17 cm	Ef. de requerimiento:	99.99 %
Tiempo de avance:	752.4 min	Lám. media infiltrada:	17.24 cm	Coef. unif. Christiansen:	98.77 %
Avance en Ti.:	184 m	Pulso:	1		



Gráfica

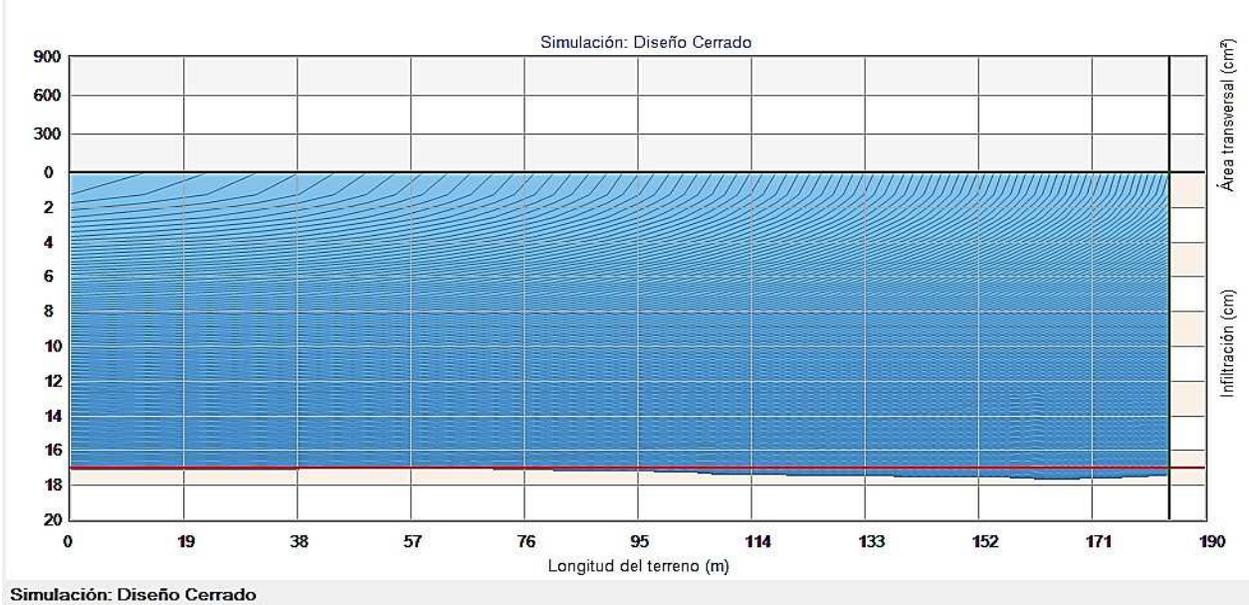


Figura 5. Perfil obtenido con $K_s=0.245$ cm/h, $h_f=60$ cm, $P_{gm}=0$ cm y $q_o=0.34$ lps/surco

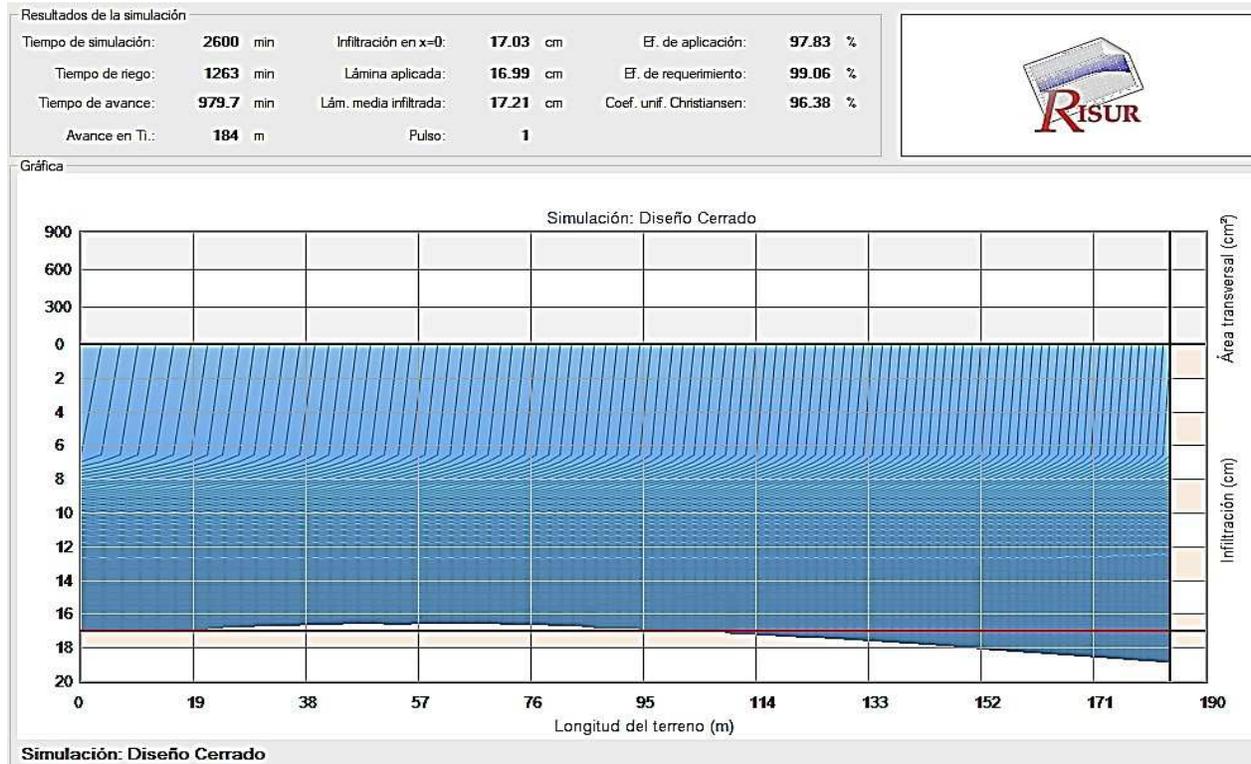


Figura 6. Perfil obtenido con $K_s=0.12$ cm/h, $h_f=60$ cm, $P_{gm}=19$ cm y $q_0=0.33$ lps/surco. En complemento, se realizaron simulaciones variando P_{gm} , de acuerdo con el Cuadro 2, considerando que el pozo provee 54 lps. En el primer renglón se ha calculado q_0 con la ecuación original de Fuentes (2012), tomando los valores de K_s , h_f directamente del Cuadro 1. El segundo renglón la misma ecuación, pero K_s obtenido por calibración. Esta diferencia muestra la importancia de obtener el q_0 por calibración con datos de una PR; en este caso la diferencia del número de surcos por tendido es considerable.

Cuadro 2. Comparación de q_0 para diferentes valores de P_{gm} en suelo franco-arcillo-limoso.

Θ_0 (cm ³ /cm ³)	l_n (cm)	n	h_f (cm)	Calibración	Ecuación	K_s (cm/h)	P_{gm} (cm)	q_0 (lps/surco)	Número surcos/tendido
0.24	17	0.06	60	No	Fuentes	0.150	0	0.207	261
				Si	(2012)		0	0.338	160
				Si	Propuesta	0.120	19	0.329	164
							15	0.277	195
							10	0.229	236
							5	0.193	280
			0	0.166	325				

El segundo renglón muestra también como el parámetro de calibración K_s puede adquirir valores inflados fuera del sentido físico, cuando se obliga a ser parámetro de ajuste. El

laboreo y las grietas permiten explicar porque en campo es factible infiltrar una lámina de riego pesada en suelos arcillosos y por columnas de suelo de laboratorio no es posible.

En los restantes renglones q_0 , se ha calculado con la ecuación propuesta (5), para diferentes profundidades de suelo alterado, encontrando que entre más profunda sea la capa superficial del suelo, mayor será el valor de q_0 . El último renglón es la condición de suelo liso, apretado y sin grietas, donde el número de surcos por tendido es máximo. Este análisis sugiere que P_{gm} , se debe considerar como nueva variable en los diseños del riego por gravedad.

4. Conclusiones.

El proceso de laboreo o de humedecimiento y secado de los suelos francos y arcillosos alteran su estructura, considerarlo en dos capas puede ser una alternativa para simular mejor el proceso de infiltración.

Las fórmulas analíticas para obtener el gasto óptimo (q_0) con base a la ecuación de infiltración de Green y Ampt (1911), son útiles cuando previamente se conocen los parámetros de infiltración específicos de cada parcela.

El proceso de calibración por el problema inverso, donde los parámetros de infiltración se obtienen con datos de la fase de avance y la recesión se validan cuando los valores caen en el rango del sentido físico.

La capa alterada tiene una profundidad medible, se recomienda considerarla como una nueva variable a tomar en cuenta en los diseños del riego por gravedad.

El modelo de simulación de la onda cinemática, permite: calibrar los parámetros, comprobar la veracidad de las fórmulas analíticas, brindar los indicadores de eficiencia de riego y generar las recetas de una forma práctica.

5. Bibliografía.

Fuentes, C., et al., (2012). Riego por gravedad. Querétaro, México. Universidad Autónoma de Querétaro, pp 324-346.

Green, W.A., & G.A. Ampt. (1911). Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science Cotswold Press. Oxford. 4: 1-24.

Mailhol, J.C., & González Camacho J.M. (1993). Furrow irrigation model for real-time applications on Cracking Soils. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 119(5): 769-783.

Muñoz Hernández B., González Camacho J.M., Acosta Hernández R. & De León Mojarro B., (1998). Modelo de la onda cinemática aplicada al riego por surcos continuo y por pulsos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.

Walker, W.R., & A.S. Humpherys. (1983). Kinematic wave furrow irrigation model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 109(4):377-392.

6. Agradecimientos.

Al Dr. Juan Manuel González Camacho, por sus aportaciones en la elaboración de los algoritmos originales del programa de cómputo en C++. Al Ing. Víctor Valencia Rico, M.C. Gustavo Magaña Sosa, programador y revisor de la nueva interfaz, respectivamente. A los técnicos de los programas MUAC y RIGRAT, quienes identificaron el problema en campo razón de este trabajo y a los productores cooperantes Martín Enrique Patiño Franco y otros.