

Análisis estocástico del riego por gravedad a escala global

Stochastic analysis of surface irrigation at global scale

Ernesto Alonso Catalán-Valencia^{1*}, Magdalena Villa-Castorena¹, Marco Antonio Inzunza-Ibarra¹

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA), INIFAP. Km. 6.5 margen derecha Canal de Sacramento, Gómez Palacio, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango.

*Autor para correspondencia: catalan.ernesto@inifap.gob.mx

RESUMEN

La crisis del agua observada en los últimos años y la falta de planeación en el uso de este recurso urgen al establecimiento de estrategias para lograr mayor control en la administración de los recursos hídricos. Una de estas estrategias es la tecnificación de las zonas de riego que implica la incorporación de técnicas y métodos racionales y cuantitativos para aumentar la eficiencia y productividad de los sistemas de riego. A nivel parcelario destacan las técnicas para diseñar, construir y manejar los sistemas de riego. En este estudio se desarrolló un método para cuantificar y acotar el nivel de incertidumbre inducido por la variabilidad de la infiltración sobre los índices de eficiencia y el diseño de los sistemas de riego por gravedad. El método se basa en un esquema de simulación estocástica que combina la simulación determinística y numérica del riego por gravedad y el análisis de incertidumbre con la técnica Monte Carlo. Este esquema se aplicó para evaluar el impacto de la variabilidad de la infiltración derivada de las propiedades hidráulicas de los suelos medidas directamente y registradas en grandes bases de datos sobre los índices de desempeño del sistema de riego por melgas cerradas. También se utilizó para obtener rangos de gastos adecuados y confiables para diferentes escenarios de interés práctico. Estos gastos promueven eficiencias de aplicación y uniformidades del riego superiores a 80% en un 95% de los casos (probabilidad de 95%).

Palabras clave: riego por gravedad, eficiencia de riego, simulación monte carlo, infiltración.

SUMMARY

The crisis of water observed during the last years and the lack of planning on the use of this resource urge the implementation of strategies for achieving a higher control on the administration of water resources. One of these strategies is the modernization of irrigated areas which implies the incorporation of rational and quantitative techniques for improving the efficiency and productivity of irrigation systems. At the farm level, the available techniques are those used for designing, constructing and managing the irrigation systems. In this study, a method was developed for quantifying and restraining the uncertainty level induced by the variability of infiltration on the efficiency indexes and the design of surface irrigation system. The method is based on a stochastic simulation scheme that combines the hydraulic simulation of surface irrigation with the uncertainty analysis using the Monte Carlo technique. This scheme was applied to evaluate the impact of infiltration variability derived from soil hydraulic properties measured directly and recorded in large databases on the performance indexes of closed border irrigation system. The scheme was also used for obtaining ranges of adequate and reliable inflow values for different scenarios of practical interest. These inflow values promote application efficiency and uniformity values higher than 80% in 95% of the cases (probability of 95%).

Key words: surface irrigation, irrigation efficiency, monte carlo simulation, infiltration.

INTRODUCCIÓN

El Programa Nacional Hídrico (PNH) 2014-2018 incorpora los objetivos, estrategias y metas establecidos el Plan Nacional de Desarrollo en relación con el adecuado manejo y preservación del agua. Señala la necesidad de incrementar la eficiencia del uso del agua para el riego de cultivos, en los sistemas de distribución de agua en las ciudades, así como incrementar los volúmenes de agua residual tratada y su reutilización. Una de las estrategias del plan es modernizar la infraestructura hidroagrícola y tecnificar las superficies agrícolas en coordinación con usuarios y autoridades locales. Como meta se pretende incrementar el número de hectáreas modernizadas de 2.27 millones en 2007 a 3.28 millones en 2018, y en un escenario futuro ideal, a 5.95 millones en 2030 (CNA, 2014a).

La gestión empírica sin soporte técnico del riego parcelario explica en gran medida los bajos niveles de eficiencia y productividad con que se utiliza el agua en las zonas de riego del país (CNA, 2014b). La tecnificación del riego ha sido una de las metas prioritarias planteadas en los planes de desarrollo de las últimas administraciones del gobierno federal (SEMARNAT, 2013). Implica tanto la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos como la transferencia y adopción de estas técnicas por el usuario. Tareas como la programación y el diseño de los riegos generalmente se realizan con base únicamente en la experiencia de los usuarios debido principalmente a que las técnicas y principios involucrados son difíciles de practicar y asimilar. En nuestro país también ha influido la supresión, por parte del gobierno federal, de las áreas de asistencia técnica de los distritos y unidades de riego. Sin embargo, la creación de

nuevas infraestructuras y herramientas de investigación dan un nuevo impulso a la transferencia y adopción de la tecnología de riego existente, acercando el conocimiento a los productores.

El diseño de los sistemas de riego consiste en seleccionar, mediante análisis hidráulico, las variables que determinan su funcionamiento tales como gasto, longitud, pendiente, tiempo de aplicación, etc., con el propósito de lograr niveles de eficiencia y productividad máximos en el uso del agua. Existen diversos modelos de simulación del riego por gravedad que han sido desarrollados como herramientas de análisis para diseñar y operar los sistemas de riego (Strelkoff et al., 1998; Walker, 1998; Bautista et al., 2015). Un aspecto clave del análisis hidráulico del riego por gravedad es la determinación de la velocidad de infiltración del agua en el suelo. Las propiedades y características físicas del suelo que determinan este proceso varían en tiempo y espacio, lo cual complica su medición directa e induce un considerable nivel de incertidumbre a las tareas de evaluar, diseñar y operar adecuadamente el riego por gravedad. Como una aproximación inicial, comúnmente se asume una función de infiltración representativa de un tipo de suelo caracterizado en base a su granulometría o textura (USDA, 1974; Walker et al., 2006; Rashidi, et al., 2014). Sin embargo, el uso de esta aproximación implica la aplicación forzada de un enfoque de análisis determinístico a un proceso esencialmente aleatorio o estocástico. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de la variabilidad de la infiltración a escala global sobre el funcionamiento hidráulico y el diseño del riego por meltas cerradas, uno de los sistemas más utilizados en los distritos de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP. La metodología general se basó en el uso del programa SERG (Catalán *et al.*, 2009a), el cual combina dos técnicas: (a) La simulación como herramienta para diseñar el riego por gravedad, a partir del nivel de eficiencia predicho por un modelo determinístico y numérico en función de los parámetros y variables que determinan el funcionamiento del sistema de riego y (b) El análisis de incertidumbre con el método de simulación estocástica Monte Carlo para cuantificar, en base a probabilidad, la incertidumbre inducida por la variabilidad de los parámetros de la función de infiltración sobre la eficiencia del sistema de riego y su diseño.

Programa SERG. El programa SERG plantea una alternativa al enfoque determinístico tradicional utilizado para simular el riego por gravedad, especialmente cuando no se dispone de mediciones directas de la infiltración del agua en el suelo. Se trata de un esquema estocástico que describe la infiltración en términos probabilísticos, el cual permite cuantificar el nivel de incertidumbre inducido por la variabilidad de la infiltración sobre los índices de desempeño (eficiencia) de los sistemas de riego. Por lo tanto, permite al usuario evaluar o diseñar de manera eficiente y confiable su sistema de riego para cualquier escenario definido con base al tipo de

suelo o textura, sistema de riego (surcos o melgas), lámina o dosis de riego, longitud, pendiente, gasto, características de la sección hidráulica y de la superficie del terreno.

El ámbito de aplicación del programa SERG depende de la escala en que se caracterice la variación de los parámetros que determinan la infiltración del agua en el suelo. Para el caso del presente estudio, el ámbito es global, ya que se utilizó una base de datos de 6,000 registros de las propiedades hidráulicas de los suelos medidas en distintos laboratorios de diferentes instituciones y universidades de 33 países, incluyendo México, para caracterizar la variabilidad de la infiltración.

Simulación del riego. El programa SERG ejecuta, de manera sistemática y para múltiples escenarios, el modelo hidrodinámico SRFR (Strelkoff, 1990), uno de los más utilizados para simular el riego por gravedad, cuya versión permite la ejecución del programa como una subrutina independiente del programa SERG. Los parámetros y variables de entrada requeridos por el modelo SRFR son lámina de riego, longitud, pendiente del terreno, coeficiente de rugosidad, gasto, tiempo de riego y los parámetros de la función de infiltración. Las variables de salida son los índices de eficiencia, que para el caso del presente estudio se consideraron la eficiencia de aplicación (E_a) y coeficiente de uniformidad (C_u), ambos expresados en porcentaje:

$$E_a = \frac{100 L_r L}{0.06 q t_r} \quad (1)$$

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |z_i - z_{med}|}{N} \right) 100 \quad (2)$$

Donde L_r = lámina de riego (m), L = longitud (m), q = gasto unitario ($l s^{-1} m^{-1}$) y t_r = tiempo de riego durante el cual se aplica el gasto (min); z_i = lámina infiltrada en algún sitio i a través de la longitud de riego (m), z_{med} = lámina infiltrada promedio (m) y N es el número total de sitios considerados.

Simulación Monte Carlo. A diferencia del enfoque tradicional determinístico empleado para describir la infiltración en la simulación del riego por gravedad (Strelkoff *et al.*, 1998; Utah State University, 2003), en el esquema estocástico propuesto se analiza cómo la incertidumbre en las variables aleatorias de entrada (parámetros de la función de infiltración) se propaga hacia la incertidumbre en las variables de salida (índices de eficiencia). Para cada escenario analizado, el esquema de simulación Monte Carlo (Rubinstein,

1981) consistió en: (1) generar muestras aleatorias de valores de los parámetros de la función de infiltración a partir de sus funciones de distribución y matrices de covarianza determinadas previamente para cada tipo de suelo o textura, y (2) ejecutar el modelo SRFR y registrar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Después se repitió este experimento para obtener observaciones múltiples de los índices de eficiencia resultantes y analizarlas probabilísticamente para evaluar el escenario.

Caracterización de la variabilidad de la infiltración. La función de infiltración considerada en el proceso de simulación estocástica del riego

$$I = St^{1/2} + At \quad (3)$$

Donde S es la sorbilidad ($\text{cm hr}^{-0.5}$), que representa la capacidad del suelo para absorber agua por capilaridad, efecto que domina el inicio del fenómeno de infiltración, y A (cm hr^{-1}) es un parámetro que describe los efectos gravitacionales, prevalecientes al final de dicho fenómeno.

Los parámetros de la Ec. (3) se estimaron a partir de propiedades hidráulicas básicas del suelo como la conductividad hidráulica saturada, densidad aparente y los parámetros de la función de

retención, o sea, la relación entre potencial mátrico (h : kPa) y contenido volumétrico de agua (θ : cm^3/cm^3), (Brooks y Corey, 1964):

$$\frac{\theta}{\phi} = \left(\frac{h_b}{h} \right)^\lambda \quad (4)$$

Donde ϕ =porosidad total del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h_b =presión por entrada de aire "bubbling pressure" (kPa) y λ =índice de la distribución de los poros del suelo por tamaño. A menudo se asume que $\phi = \theta_s$, siendo θ_s el contenido de humedad a saturación ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

La sorbilidad (S) se estimó con la expresión propuesta por Phillip (1969):

$$S = \sqrt{-2K_s h_f (\theta_s - \theta_0)} \quad (5)$$

Donde K_s =conductividad hidráulica del suelo a saturación (cm/hr), conocida también como infiltración básica, h_f =potencial mátrico del frente de humedecimiento (cm) y θ_0 =contenido de humedad inicial del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Nótese la dependencia de la sorbilidad del contenido de humedad inicial, lo que permite estimar el efecto de la variación de θ_0 sobre I, situación que normalmente ocurre de un riego a otro. Los valores de h_f y A se estimaron como (Rawls y Brakensiek, 1982):

$$h_f = \frac{2\lambda + 3}{2\lambda + 2} \left(\frac{h_b}{2} \right) \quad (6)$$

$$A = \frac{2}{3} K_s \quad (7)$$

Se utilizó el sistema SOILVISION (A Knowledge-Based Database System for Saturated/Unsaturated Soil Properties) para caracterizar la variabilidad de la infiltración, el cual incluye una base de datos de 6,000 suelos de 33 países distintos entre ellos México (Soil Vision, 2006). Cuenta con registros de los parámetros de las propiedades hidráulicas

medidas directamente en campo y laboratorios de diversas instituciones como centros de investigación y universidades. Para cada textura de suelo se obtuvieron funciones de distribución de cada parámetro (h_b , λ , K_s y Da) y la matriz de covarianza entre ellos, ya que para generarlos aleatoriamente se consideró la correlación entre parámetros.

Análisis de escenarios. Mediante el uso del programa SERG se analizaron múltiples escenarios de interés práctico (textura, lámina de riego, longitud, pendiente y rugosidad del terreno) para evaluar el impacto de la variabilidad de la infiltración sobre el funcionamiento hidráulico del sistema de riego por melgas cerradas. En cada

escenario se evaluaron diferentes gastos, desde un gasto unitario mínimo de $0.5 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, el cual se incrementó en $0.5 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ hasta alcanzar el gasto máximo no erosivo $q_{\max}$ ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), calculado en función de la pendiente (S_0 , m m^{-1}) y el coeficiente de rugosidad de Manning (n) que caracteriza la rugosidad superficial terreno:

$$q_{\max} = V_{\max}^{1.67} \left[\frac{n}{60 S_0^{0.5}} \right]^{1.5} \quad (8)$$

Donde $V_{\max}$ = velocidad máxima del flujo de agua (m s^{-1}), que fluctúa entre 8 y 13 m min^{-1} , dependiendo de la estabilidad del suelo.

En cada escenario y para cada gasto evaluado se realizaron 100 simulaciones con base en la generación aleatoria de los parámetros que determinan la infiltración, a partir de las funciones de distribución previamente obtenidas para cada parámetro de acuerdo al tipo de suelo según su textura. El propósito de esta búsqueda fue encontrar, en caso de existir, y dentro del rango de gastos extremos determinado por los gastos mínimo y máximo, un sub-rango de gastos eficientes y confiables. Para decidir si un gasto evaluado era eficiente y confiable se

asumieron valores mínimos o umbrales de E_a y C_u que debieron ser superados en al menos una cierta proporción de los casos (simulaciones), proporción definida como el nivel de confianza expresada en por ciento. En este estudio, los valores mínimos aceptables de E_a y C_u fueron ambos 80%, y el nivel de confianza 95%, por lo tanto, al menos 95 de las 100 simulaciones debieron producir valores de E_a y C_u superiores al 80% para que el gasto evaluado fuera considerado eficiente y confiable. La Figura1 ilustra el diagrama de flujo del programa SERG.

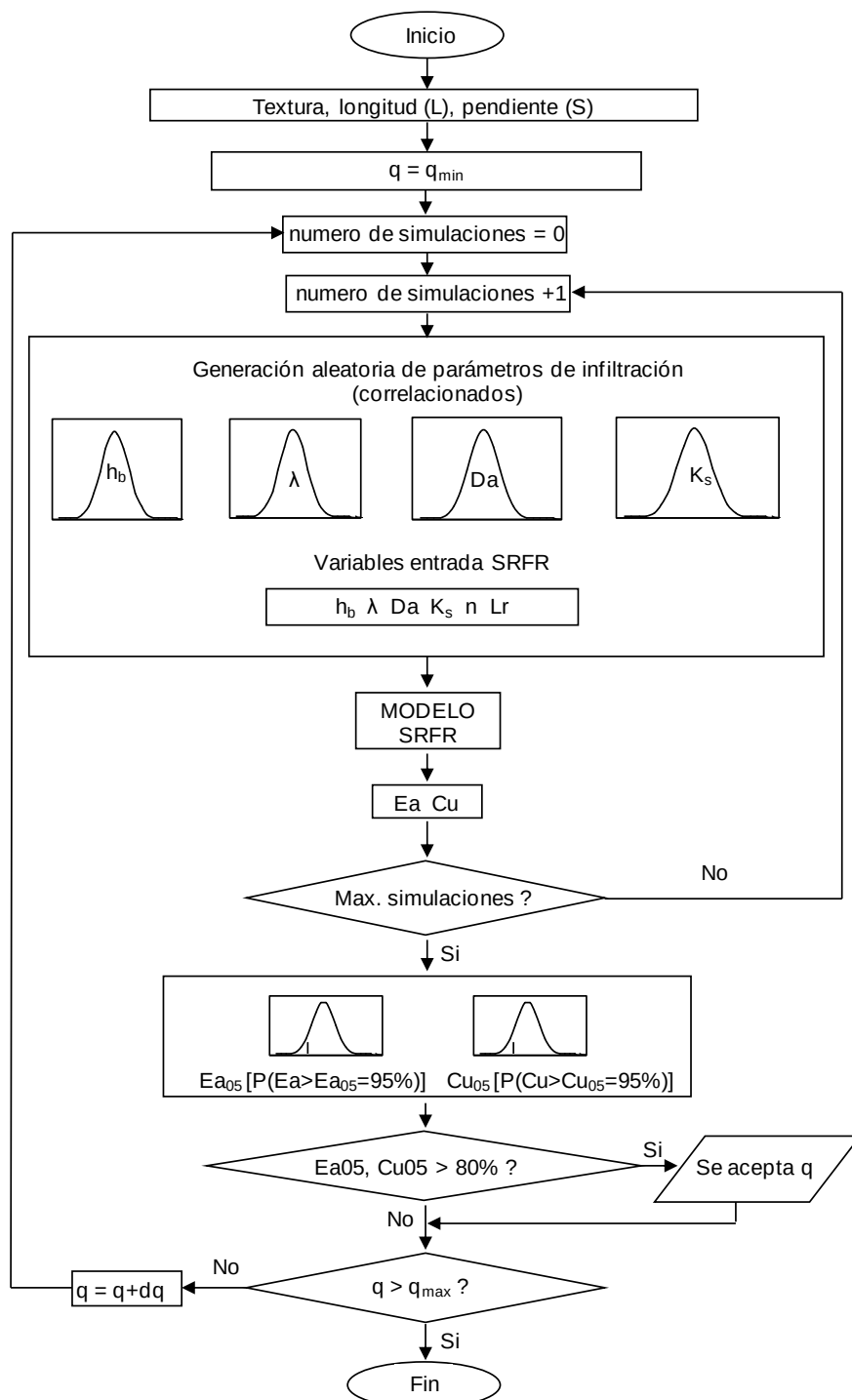


Figura 1. Diagrama de flujo del programa SERG.

RESULTADOS

Funciones de distribución. En el Cuadro 1 se muestran las funciones de distribución de los parámetros h_b y λ de la función de retención de Brooks y Corey (Ec. 4) para cada tipo de suelo o textura. También se muestran la conductividad

hidráulica a saturación (K_s) y la densidad aparente (D_a), la cual se relaciona con el contenido de humedad a saturación y la porosidad (ϕ). Cada función se caracteriza por la media y desviación estándar. Los parámetros h_b , λ y K_s se ajustaron a una distribución lognormal, mientras que D_a se ajustó a una distribución normal.

Cuadro 1. Funciones de distribución de los parámetros de las propiedades hidráulicas del suelo.

Textura	h_b (KPa)	λ	D_a (Kg m ⁻³)	K_s (cm h ⁻¹)
Arenosa	0.3953(0.4256) [†]	-0.1551(0.2926) [‡]	1500.22(66.47) [†]	-9.8268(0.6437) [‡]
Areno francosa	0.3953(0.4186)	-1.0967(0.5237)	1492.17(90.90)	-11.1625(0.5982)
Franco arenosa	0.3515(0.5385)	-1.6091(0.6156)	1420.78(135.37)	-11.6196(0.6342)
Franca	0.9035(0.7857)	-1.6853(0.3328)	1412.47(119.14)	-12.8606(0.5740)
Franco limosa	1.0648(0.6644)	-1.5401(0.3411)	1331.77(118.51)	-12.5594(0.8754)
Limosa	2.0488(0.4038)	-1.0722(0.5115)	1480.88(50.55)	-15.0824(0.2282)
Franco arcillo arenosa	1.0876(0.5500)	-1.5721(0.3513)	1573.76(69.22)	-12.9837(0.7072)
Franco arcillosa	1.4745(0.7141)	-1.7374(0.3779)	1394.33(98.96)	-14.6116(0.5724)
Franco arcillo limosa	1.2539(0.5916)	-1.9639(0.3599)	1404.28(85.88)	-14.5614(0.6656)
Arcillo arenosa	1.4420(0.4676)	-2.0563(0.3855)	1503.38(69.36)	-14.9584(0.1126)
Arcillo limosa	1.3160(0.6424)	-2.2083(0.4131)	1348.52(84.17)	-14.4171(0.3331)
Arcillosa	2.0867(0.8392)	-2.1471(0.3886)	1381.32(97.85)	-14.4872(0.3883)

[†] Valores entre paréntesis expresan la desviación estándar

[‡] Logaritmo de la media y la desviación estándar

Rangos de gastos adecuados. En las secciones siguientes se muestran rangos de gastos unitarios adecuados para el diseño eficiente y confiable del riego por melgas rectas cerradas en los suelos con textura franca arenosa, franca y arcillosa. Los valores comprendidos en cada rango producen una eficiencia de aplicación y uniformidad del riego superiores al 80% en un 95% de los casos (95% de probabilidad).

Textura franco arenosa. En los Cuadros 2 y 3 se muestran rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio respectivamente, en suelos con textura franco

arenosa. Para el riego de presiembra, los rangos se estrechan a medida que la longitud aumenta (Cuadro 2). El límite inferior de los rangos aumenta a razón de 2.0 l s⁻¹ m⁻¹ por cada 50 m de longitud, mientras que el límite superior se encuentra acotado por el gasto máximo no erosivo en la mayoría de los casos. No existen gastos confiables para longitudes mayores o iguales a 200 m. Estas tendencias se deben principalmente a la alta conductividad hidráulica de este tipo de suelos, la cual exige gastos mayores a medida que la longitud del terreno aumenta.

Cuadro 2. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos textura franco arenosa, lámina de riego de 10-14 cm y coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04.

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)					
	50	100	150	200	250	300
	Gastos unitarios (l s ⁻¹ m ⁻¹)					
0	3.5-12.0	5.5-12.0	7.5-12.0			
1	3.5-12.0	5.5-12.0	7.5-12.0			
2	3.5-12.0	5.5-12.0	7.5-12.0			
3	3.5-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0			
4	3.5-12.0	5.5-12.0	7.5-12.0			
5	3.5-10.1	5.5-10.1	7.0-10.1			
6	3.5-8.8	5.5-8.8	7.0-8.8			
7	3.5-7.8	5.0-7.8				
8	3.5-7.1	5.0-7.1				
9	3.5-6.5					
10	3.5-6.0					
15	3.5-4.4					
20						

Continuando con el riego de presiembra (Cuadro 2), los rangos de gastos se mantienen casi constantes en su límite inferior y se reducen en el superior por el gasto máximo no erosivo a medida que la pendiente aumenta. Sin embargo, a partir de cierta pendiente la restricción es total, ya que no existen gastos adecuados. La pendiente máxima para que existan gastos adecuados disminuye con la longitud, lo cual se debe a que, en el sistema de riego por melgas rectas con bordos de contención en el extremo final de la longitud, la eficiencia y uniformidad del riego son muy sensibles al incremento simultáneo de longitud y pendiente por la acumulación de agua en dicho extremo.

Para el caso del riego de auxilio, tanto la pendiente como la longitud ejercen mayor restricción sobre los rangos de gastos adecuados en relación al riego de presiembra (Cuadro 3). Esto se manifiesta en rangos de gastos más estrechos, ya que se requieren un mínimo de 6.5 l s⁻¹ m⁻¹ para la longitud de 50 m y no se tienen gastos adecuados para longitudes mayores a 100 m. La pendiente máxima para que existan gastos adecuados disminuye con la longitud en mayor proporción con respecto al riego de presiembra. Estos efectos ocurrieron porque se consideraron láminas de riego menores que en el riego de presiembra.

Cuadro 3. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos con textura franco arenosa, lámina de riego de 6-10 cm y coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15.

Pendiente (cm/100m)	50	100	150	200	250	300	350
Longitud (m)							
Gastos unitarios ($\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$)							
0	6.5-12.0	8.0-12.0					
1	6.5-12.0	8.0-12.0					
2	6.5-12.0	8.0-12.0					
3	6.5-12.0	8.0-12.0					
4	6.5-12.0	8.0-12.0					
5	6.5-10.1	8.0-10.1					
6	6.0-8.8	7.5-8.8					
7	6.0-7.8						
8	6.0-7.1						
9	6.0-6.5						
10							

Textura franca. Los Cuadros 4 y 5 muestran rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio, respectivamente, en suelos con textura franca. En el Cuadro 4 que corresponde al riego de presiembra, se puede observar que los rangos de gastos se estrechan a medida que la longitud aumenta pero en menor proporción a lo ocurrido para el riego de presiembra en los suelos de textura franco arenosa. El límite inferior de los rangos varía de 2.0 a 10.5 $\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$ en todo el rango de longitud probado. Se detectaron rangos de gastos

adecuados aún para la longitud máxima ensayada de 350 m, lo cual se debe a que la conductividad hidráulica es menor en este tipo de suelos con respecto a suelos de textura franco arenosa. La pendiente máxima para que existan gastos adecuados disminuye con la longitud de manera similar a lo ocurrido con la textura franco arenosa. Esto muestra que para el riego de presiembra en ambas texturas, el efecto adverso producido por el incremento simultáneo de la longitud y la pendiente sobre la eficiencia y uniformidad del riego prevalece.

Cuadro 4. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos con textura franca, lámina de riego de 12- 16 cm y coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04.

Pendiente (cm/100m)	50	100	150	200	250	300	350
Longitud (m)							
Gastos unitarios ($\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$)							
0	2.0-12.0	3.0-12.0	3.5-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0	9.0-12.0	10.5-12.0
1	2.0-12.0	3.0-12.0	3.5-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0	9.0-12.0	10.0-12.0
2	2.0-12.0	3.0-12.0	3.5-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0	9.0-12.0	9.0-12.0
3	2.0-12.0	3.0-12.0	3.5-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0	9.0-12.0	
4	2.0-12.0	3.0-12.0	3.5-12.0	5.5-12.0	6.5-12.0		
5	2.0-10.1	3.0-10.1	3.5-10.1	5.0-10.1			
6	2.0-8.8	3.0-8.8	3.5-8.8				
7	2.0-7.8	2.5-7.8	3.0-7.8				
8	2.0-7.0	2.5-7.0					
9	2.0-6.5	2.5-6.5					
10	2.0-6.0	2.5-6.0					
15	2.0-4.4						
20	2.0-3.6						
25							

En el Cuadro 5 se muestra que para el riego de auxilio, tanto la pendiente como la longitud ejercen mayor restricción sobre los rangos de gastos adecuados en relación al riego de presiembra. El límite inferior de los rangos varía de 2.0 a 7.0 l s⁻¹ m⁻¹ entre los 50 y 150 m de longitud, y a partir de los 150 m no se detectaron

gastos adecuados. La pendiente máxima para que existan gastos adecuados disminuye con la longitud en mayor proporción con respecto al riego de presiembra. Como en el caso de la textura franco arenosa, estos efectos ocurrieron porque se consideraron láminas de riego menores en relación al riego de presiembra.

Cuadro 5. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos con textura franca, lámina de riego de 8-12 cm y coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15.

Caudal y velocidad de flujo (l s ⁻¹ m ⁻¹)							
Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
Gastos unitarios (l s ⁻¹ m ⁻¹)							
0	2.0-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0				
1	2.0-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0				
2	2.0-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0				
3	2.0-12.0	5.5-12.0	7.0-12.0				
4	2.0-12.0	5.5-12.0	6.5-12.0				
5	2.0-10.1	5.5-10.1					
6	2.0-8.8	5.5-8.8					
7	2.0-7.8						
8	2.0-7.0						
9	2.0-6.5						
10	2.0-6.0						
11							

Textura arcillosa. En los Cuadros 6 y 7 se presentan rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio, respectivamente, en suelos con textura arcillosa. La restricción impuesta por el incremento de la longitud sobre el gasto es moderada para el riego de presiembra, ya que el límite inferior de los gastos adecuados varía de 1.0 a 5.0 l s⁻¹ m⁻¹ a través de la longitud (Cuadro 6). Este efecto es causado

principalmente por la baja conductividad hidráulica de los suelos arcillosos. En cambio, el efecto restrictivo de la pendiente, por sí misma e interactuando con la longitud, sobre los rangos de gastos es considerable en este tipo de suelos. En consecuencia, la pendiente máxima con gastos adecuados disminuye de 20 a 2 cm/100m entre los 50 y 350 m de longitud.

Cuadro 6. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra suelos con textura arcillosa, lámina de riego de 12-16 cm y coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04.

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios ($\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$)						
0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.0-12.0	5.0-12.0
1	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.0-12.0	5.0-12.0
2	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.0-12.0	5.0-12.0
3	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	3.5-12.0	
4	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.5-12.0	3.0-12.0		
5	1.0-10.1	1.5-10.1	1.5-10.1	2.5-10.1			
6	1.0-8.8	1.5-8.8	1.5-8.8				
7	1.0-7.8	1.5-7.8					
8	1.0-7.0	1.5-7.0					
9	1.0-6.5	1.5-6.5					
10	1.0-6.0	1.5-6.0					
15	1.0-4.4						
20	1.0-3.6						
25							

El Cuadro 7 muestra los rangos de gastos eficientes para el riego de auxilio en suelos arcillosos. Como en otras texturas, la aplicación de láminas de riego menores en relación al riego de presiembra impacta de manera considerable los rangos de gastos adecuados. Los efectos restrictivos de la longitud y pendiente sobre

dichos rangos son similares a los observados para el riego de auxilio en suelos con textura franca. El límite inferior de los rangos varía de 1.0 a 7.0 $\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$ entre los 50 y 200 m de longitud, y a partir de los 200 m no se detectaron gastos adecuados.

Cuadro 7. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos de textura arcillosa, lámina de riego de 8-12 cm y coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15.

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios ($\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$)						
0	1.0-12.0	3.0-12.0	4.0-12.0	7.0-12.0			
1	1.0-12.0	3.0-12.0	4.0-12.0	7.0-12.0			
2	1.0-12.0	3.0-12.0	4.0-12.0	7.0-12.0			
3	1.0-12.0	3.0-12.0	4.0-12.0	6.5-12.0			
4	1.0-12.0	3.0-12.0	4.0-12.0				
5	1.0-10.1	3.0-10.1					
6	1.0-8.8	2.5-8.8					
7	1.0-7.8						
8	1.0-7.0						
9	1.0-6.5						
10	1.0-6.0						
12	0.5-5.2						
14	0.5-4.2						
15							

DISCUSIÓN

El esquema de simulación estocástica para describir el riego por gravedad presentado no tiene antecedentes en la literatura. Como era de esperarse, las funciones de distribución de dichos parámetros presentaron una mayor dispersión con relación a las obtenidas a partir de una base de datos de suelos regional (Catalán et al., 2009b). Consecuentemente, los rangos de gastos adecuados (eficiencia de aplicación y uniformidad del riego mayores al 80% al 95% de confianza) para los mismos escenarios (textura, longitud, pendiente, lámina de riego, rugosidad) resultaron más estrechos. El enfoque estocástico presentado resulta útil ante el considerable nivel de incertidumbre que conlleva la estimación, por medición directa o indirectamente, de la infiltración del agua en el suelo. También resulta útil aun en aproximaciones donde se estima la función de infiltración mediante el problema inverso, a partir de los datos de avance del frente de riego en campo (Elliott y Walker, 1982; Valiantzas et al., 2001; Mailapalli et al., 2008), especialmente en los tiempos largos más allá de la fase de avance cuando la infiltración se aproxima a la conductividad hidráulica del suelo saturado, parámetro con gran variabilidad espacial y nivel de incertidumbre. Las guías de riego presentadas mediante tablas son sólo una muestra de la capacidad del esquema de simulación propuesto. Los rangos de gastos

adecuados variarán para otros escenarios, niveles de eficiencia y confianza, así como para otros sistemas de riego.

CONCLUSIONES

Se amplió el ámbito de aplicación del esquema de simulación estocástica del riego por gravedad a escala global. Como se esperaba, los parámetros de infiltración medidos presentaron mayor dispersión con relación a los mismos estimados a escala regional. No obstante, se lograron definir rangos de gastos adecuados para diversos escenarios, mismos que resultaron más estrechos que los definidos a escala regional. El enfoque estocástico planteado para describir el proceso de infiltración en la simulación del riego por gravedad permite cuantificar y acotar, a escala global, el nivel de incertidumbre inducido por la variabilidad de dicho proceso sobre los índices de eficiencia predichos y el diseño de los sistemas de riego. El programa de cómputo desarrollado puede utilizarse como herramienta para evaluar y diseñar de manera eficiente y confiable el riego por melgas rectas cerradas bajo diversos escenarios y condiciones de interés práctico. Con una ejecución del programa se pueden simular y analizar miles de escenarios distintos, lo cual mediante pruebas de riego basadas en medición directa sería prácticamente imposible de realizar.

LITERATURA CITADA

- Bautista, E., Schlegel J.L., and Clemmens A.J. 2015. The SRFR 5 Modeling System for Surface Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142: 1-11. DOI: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000938.
- Brooks R. H. and Corey A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper 3*. Colorado State Univ., Fort Collins, CO. 27p.
- Catalán-Valencia E. A., Sánchez-Cohen I., Villa-Castorena M. M., Inzunza-Ibarra M.A., Román-López A. 2009a. SERG 1.0: Programa para simular estocásticamente y diseñar los sistemas de riego por gravedad. Guía de Usuario. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. 10p.
- Catalán-Valencia, E. A., Villa-Castorena M. M., Inzunza-Ibarra M. A., Román-López A., González-López M. L. 2009b. Modelación estocástica del riego por



- melgas rectas a escala regional. AGROFAZ 9 (3): 39-46.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2014a. Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco el Bajo. C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2014b. Estadísticas del Agua en México. Edición 2014. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.
- Elliott, R.L. and W.R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Trans ASAE 25(2):396–400.
- Mailapalli, D. R., W.W. Wallender, N.S. Raghuwanshi and R. Singh. 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. J Irrigation Drainage Eng 134(6):788–795.
- Philip J.R. 1957. The theory of infiltration (1). The infiltration equation and its solutions. Soil Science. 83: 345-347. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002>.
- Philip J.R. 1969. Theory of infiltration. Adv. Hydrosci. 5: 215–296. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6>.
- Rawls W. J., and Brakensiek D. L. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE 108: 166–171.
- Rubinstein R.Y. 1981. Simulation and the Monte Carlo method. John Wiley and sons Inc. New York. 278p.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.
- Soil Vision 2006. A Knowledge-Based Database System for Saturated/Unsaturated Soil Properties. User's Manual. Soil Vision Systems Ltd. Saskatoon, Saskatchewan, Canada. 214p.
- Strelkoff T. S. 1990. SRFR: A computer program for simulating flow in surface irrigation, furrows-basins and borders. WCL report #17, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ. 69p.
- Strelkoff T. S., Clemmens A. J., and Schmidt B. V. 1998. SRFR v.3.31. Computer program for simulating flow in surface irrigation: Furrows–basins–borders. U.S. Water Conservation Laboratory., Phoenix, AZ.
- United States Department of Agriculture (USDA). 1974. Border irrigation, National Engineering Handbook, Chapter 4, Sect.15. Soil Conservation Service. USDA. Washington D.C. 850p.
- Utah State University. 2003. SIRMOD III: Surface irrigation simulation, evaluation and design: User's guide and technical note. Utah State Univ., Logan.
- Walker W. 1998. SIRMOD-Surface Irrigation Modeling Software. Utah State University.
- Walker W. R., Prestwich C., and Spofford T. 2006. Development of the revised USDA-NRCS intake families for surface irrigation. Agricultural Water Management 85: 157-164.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.04.002>

10.5829/idosi.aejaes.2014.14.12.12461

Rashidi, M., Ahmadbeyki, A., & Hajiaghaei, A. 2014. Prediction of soil infiltration rate based on some physical properties of soil. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 14(12), 1359–1367. DOI:

Valiantzas JD, Aggelides S, Salsalou A (2001) Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agric Water Manag* 52:17–32.