

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DEL RIEGO POR GRAVEDAD

POR

MARTINI SEBASTIAN PEÑAIRA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

MARZO 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

SIMULACION ESTOCÁSTICA DEL RIEGO POR GRAVEDAD

POR

MARTINI SEBASTIAN PEÑAIRA

TESIS

**QUE SE SOMETE ALA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR, COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

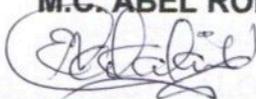
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

ASESOR PRINCIPAL:



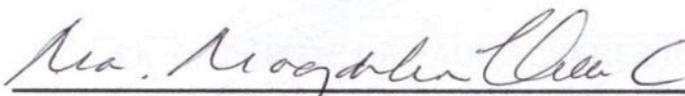
M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

ASESOR:



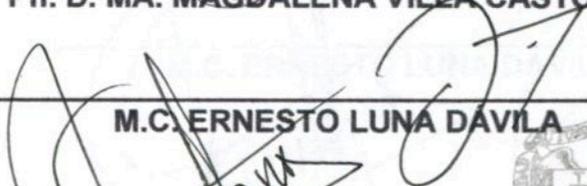
Ph. D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

ASESOR:



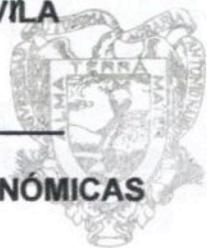
Ph. D. MA. MAGDALENA VILLA CASTORENA

ASESOR:



M.C. ERNESTO LUNA DAVILA

M.C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

MARZO 2006

00042

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

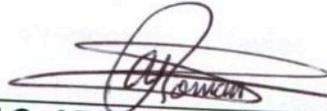
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**TESIS DEL C. MARTINI SEBASTIAN PEÑAIRA QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

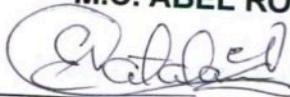
APROBADA POR:

PRESIDENTE:



M.C. ABEL ROMAN LÓPEZ

VOCAL:



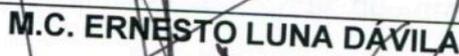
Ph. D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

VOCAL:



Ph. D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

VOCAL SUPLENTE:



M.C. ERNESTO LUNA DAVILA



M.C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

**Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas**

MARZO 2006

DEDICATORIA

A dios:

Por concederme la oportunidad de lograr una meta más y por tantas cosas buenas que me ha brindado en la vida.

A mi mamá:

Por todo el apoyo que me brindó en mis estudios, que a pesar de los momentos difíciles me pudo dar un abrazo y decirme que todo estaba bien a pesar de los problemas en la casa.

A mis hermanos:

Verónica, Cipriano, Crescencia

Gracias por su apoyo y por estar conmigo en los momentos más difíciles, que gracias a ellos logré dar un paso más en la escalera de la vida.

A mis sobrinos:

Teresa, Crescencia, Elidia, Martina, Wenceslao, Javier, Abad, Daniel, Guadalupe, Beatriz, Verónica, Juan Manuel, Héctor, Oscar, Cecilia.

A mis amigos:

Rogelio Rojas, Eugenio, Herminio, Nicolás, Juan, Silvino, Esaú, Jaime, Éver, Liliana, Ángel.

Por las vivencias compartidas y por su amistad.

A mi amiga:

Juana Inés

Por estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, que gracias a ella pude salir adelante.

A mis compañeros:

Héctor, José Carlos, Jesús Antonio, Domitilo, Sergio Alberto, Oscar, Amín, Aimer, Genaro.

Por ser mis compañeros de la carrera.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo estatal de ciencia y tecnología (COECyT) por su apoyo a través del programa de becas-tesis para que fuera posible la realización del presente trabajo.

A mi alma mater por la formación recibida.

Al CENID-RASPA por permitirme realizar el trabajo en sus instalaciones.

Al Ph D. Ernesto Alonso Catalán Valencia por ser mi asesor y darme su tiempo y apoyo para poder realizar esta tesis.

A la Ph D. Ma. Magdalena Villa Castorena por su apoyo en la revisión de esta tesis.

Al M.C. Abel Román López por su ayuda como asesor y por sus consejos como maestro dentro de la universidad.

Al M.C. Ernesto Luna Dávila por su ayuda como asesor y como maestro.

Al Ph D. Vicente De Paúl Álvarez Reyna por su apoyo en la revisión de la tesis y por sus consejos.

Al M.C Federico Vega por su apoyo incondicional y por sus consejos durante mi estancia en esta universidad.

Al M.C. Carlos Efrén Ramírez por sus consejos y apoyo incondicional durante mi estancia dentro de la universidad.

A todos los maestros del departamento de riego y drenaje por su apoyo en mi formación como Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Funciones PDF para estimar el contenido de humedad correspondiente a diez valores del potencial mátrico del suelo.....	28
Cuadro 2. Funciones de distribución de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt para los suelos de la región lagunera.....	33
Cuadro 3. Matrices de la covarianza de los parámetros de la función de infiltración de Green y Ampt por tipo de suelo.....	34
Cuadro 4. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos de textura franco arenosa, lámina de riego de 10-14 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04...	36
Cuadro 5. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos de textura franco arenosa, lámina de riego de 6-10 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15.....	37
Cuadro 6. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos de textura franca, lámina de riego de 12-16 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04.....	38
Cuadro 7. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos de textura franca, lámina de riego de 8-12 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15.....	39
Cuadro 8. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos de textura arcillosa, lámina de riego de 12-16 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04.....	40
Cuadro 9. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos de textura arcillosa, lámina de riego de 8-12 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Comarca Lagunera.....	24
Figura 2. Diagrama de flujo del programa de cómputo.....	32

RESUMEN

La baja disponibilidad de agua en las presas del país en los últimos años y la consecuente sobreexplotación de los acuíferos urgen al establecimiento de estrategias para un mayor control en la administración de los recursos hídricos. Entre estas estrategias destaca la tecnificación del riego que implica la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos que permitan ejercer un mayor control de esta importante práctica agrícola. 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 espacial de la infiltración sobre los índices de eficiencia y el diseño de los sistemas de riego por gravedad. El método se basa en la aplicación de un esquema de simulación estocástica que combina la simulación del riego con el método Monte Carlo. El método se aplicó para definir rangos de gastos adecuados en el sistema de riego por melgas rectas cerradas para el caso de los suelos de la región lagunera. Estos rangos de gastos garantizan una eficiencia de aplicación y uniformidad del riego superior al 80% en un 95% de los casos (95% de probabilidad).

Palabras clave: eficiencia de riego, modelos de simulación, método Monte Carlo, funciones PDF.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
INDICE DE FIGURAS.....	iii
INDICE DE CUADROS.....	iv
RESUMEN.....	v
CONTENIDO.....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	3
III. OBJETIVO.....	6
IV. HIPÓTESIS.....	6
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
5.1 Descripción del riego por gravedad.....	7
5.2 Evolución del riego por gravedad.....	8
5.3 Simulación del riego por gravedad.....	8
5.3.1 Estimación de los parámetros del sistema.....	10
5.3.1.1 Lámina de riego (L_r).....	10
5.3.1.2 Pendiente del terreno (S_0).....	11
5.3.1.3 Coeficiente de rugosidad (n).....	11
5.3.1.4 Parámetros de infiltración.....	12
5.3.1.5 Estimación indirecta de los parámetros de la función de infiltración..	14
5.3.1.6 Estimación indirecta de las propiedades hidráulicas del suelo.....	16
5.3.2. Estimación de las variables del sistema.....	17

5.3.2.1. Longitud.....	17
5.3.2.2. Gasto o caudal	18
5.3.2.3. Tiempo de riego	18
5.4. Aplicación del análisis de incertidumbre	18
5.4.1. La simulación Monte Carlo	19
5.4.2. Generación aleatoria de variables.....	20
5.4.3. Generación aleatoria de variables correlacionadas.....	21
5.4.4. Numero de simulaciones	21
5.5 Aplicación de la simulación estocástica en diferentes disciplinas	22
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	24
6.1 Ubicación del estudio	24
6.2 Metodología general	25
6.3 Ámbito de aplicación	25
6.4 Simulación del riego.....	26
6.5 Descripción del esquema de simulación estocástica	27
6.5.1 Caracterización de la variabilidad espacial de la infiltración.....	27
6.5.2 Programa de cómputo	29
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
7.1 Funciones de distribución de los parámetros de infiltración.....	33
7.2 Matrices de covarianza de los parámetros de la función de infiltración	34
7.3 Rangos de gastos adecuados para los suelos de la región lagunera	35
7.3.1 Rangos de gastos adecuados para suelos de textura franco arenosa .	35
7.3.2 Rangos de gastos adecuados para suelos de textura franca.....	37

7.3.3 Rangos de gastos adecuados para suelos de textura arcillosa.....	40
VIII. CONCLUSIONES	42
IX. LITERATURA CITADA	43

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad media de agua en nuestro país es de 4,547 m³ por habitante por año, cifra considerada baja en comparación con otros países como Canadá donde se dispone de 91,000 m³ por habitante por año. De acuerdo a la tasa de incremento poblacional y aumento de la demanda de agua, se espera que para el año 2025 la disponibilidad de agua se reduzca a 3,822 m³ por habitante por año (CNA, 2004). En el territorio nacional también se observan disparidades considerables en esta variable, ya que la disponibilidad de agua promedio en el sureste es siete veces mayor a la de la zona centro y norte donde se concentra el mayor número de habitantes y zonas de riego. También se tiene un gradiente importante en el grado de presión sobre el recurso hídrico: fuerte presión en la zona norte donde se usa 40% del agua disponible, presión media en la zona centro con 30% y presión baja en la zona sur menor al 10% (CNA, 2004).

Actualmente se utilizan en México 72 mil millones de metros cúbicos de agua al año, de los cuales el 77% se destina al sector agrícola. El 32% del agua utilizada en la agricultura proviene de agua subterránea y el 68% restante de agua superficial (CNA, 2004). De los 653 acuíferos subterráneos existentes, 102 proveen el 57% del agua subterránea y están siendo sobre explotados, 17 presentan problemas de intrusión salina por su cercanía con el mar, y 13 muestran problemas de salinización de suelo y agua salobre (CNA, 2004). Por otra parte, la disponibilidad de agua en las presas varía año con año, siendo los distritos de riego del centro y norte del país los más afectados por la sequía, lo cual origina mayor presión sobre el agua subterránea.

La producción agropecuaria del país se concentra en zonas con menor disponibilidad de agua donde también se concentran las zonas de riego. Aunque la agricultura de riego se practica en menos del 30% de la superficie total cultivada a nivel nacional, aporta más del 50% del valor de la producción. Uno de los retos más importantes en materia del riego es la recuperación o reducción de las fugas de agua. Se estima que los distritos de riego operan con un nivel de eficiencia global por debajo del 40%, lo cual significa que el 60% del volumen de agua total disponible se pierde durante la conducción y distribución del agua. Para dar respuesta a los retos del sector hídrico se requiere no solo invertir en la operación y mantenimiento de la infraestructura de riego sino elevar también la eficiencia técnica y operativa de sus sistemas (CNA, 2004).

II. JUSTIFICACIÓN

La baja disponibilidad de agua en las presas del país en los últimos años y la consecuente sobreexplotación de los acuíferos urgen al establecimiento de estrategias para un mayor control en la administración de los recursos hídricos. Entre estas estrategias destaca la tecnificación del riego que implica la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos que permitan ejercer un mayor control de esta importante práctica agrícola. A nivel parcelario destacan las técnicas para diseñar, construir y manejar los sistemas de riego.

El diseño de un sistema de riego consiste en seleccionar, mediante un análisis hidráulico, las variables que determinan su funcionamiento tales como el gasto, longitud, pendiente, tiempo de aplicación, etc., con el propósito de lograr máxima eficiencia y productividad en el uso del agua. Sin embargo, debido a la complejidad de este análisis, los sistemas de riego rara vez se diseñan, sólo se construyen y operan en base a la experiencia de los usuarios. Esto, aunado a los problemas que se originan durante el manejo de los sistemas de riego han sido las causas principales de los bajos niveles de eficiencia generalmente observados en el riego por gravedad.

El mejoramiento del riego parcelario a través del diseño no solo requiere del refinamiento de técnicas sino de la transferencia y adopción de estas técnicas por el usuario. En este sentido, los avances tecnológicos más significativos se han logrado en el refinamiento de las técnicas, con el desarrollo de modelos de simulación para predecir y analizar el funcionamiento de los sistemas de riego. En cambio, la transferencia y uso de las técnicas por el usuario

es la etapa donde han ocurrido los mayores rezagos. Esto quizá debido al nivel de capacitación y entrenamiento requerido por parte de los usuarios para utilizar dichas técnicas. En este contexto, cualquier acción de investigación o transferencia de tecnología orientada a facilitar o promover una mayor tecnificación del riego parcelario se justifica plenamente.

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 precisa e induce un considerable nivel de incertidumbre a las tareas de diseñar y operar adecuadamente el riego por gravedad. Para tratar de solventar esto normalmente se asume una función de infiltración representativa de un tipo de suelo caracterizado en base a su granulometría o textura. Sin embargo, el uso de una ecuación de infiltración promedio implica la aplicación forzada de un enfoque de análisis determinístico a un proceso esencialmente aleatorio o estocástico.

Este estudio propone un procedimiento que incorpora a la simulación del riego por gravedad la alternativa de simular estocásticamente el proceso de infiltración para cuantificar y acotar el riesgo de diseñar ineficientemente un sistema de riego debido a la incertidumbre inducida por variabilidad espacial de las propiedades del suelo que determinan dicho proceso. Con esto se pretende diseñar de manera eficiente y segura los sistemas de riego para cualquier escenario de interés práctico; donde cada escenario estará definido por el comportamiento estadístico de los parámetros de infiltración según el tipo de

suelo y los valores o rangos de valores de los parámetros y variables del sistema sobre los cuales el diseñador tiene un menor control. Por su parte, las recomendaciones irán orientadas a establecer los valores o rangos de valores de las variables del sistema más controlables para lograr una alta eficiencia del riego con un riesgo mínimo.

III. OBJETIVO

Desarrollar un método que permita cuantificar y acotar el nivel de incertidumbre inducido por la variabilidad espacial de la infiltración sobre los índices de eficiencia y el diseño de los sistemas de riego por gravedad.

IV. HIPÓTESIS

Es posible lograr un mayor grado de certidumbre en el diseño del riego por gravedad si a la modelación del riego parcelario se le incorpora un enfoque estocástico para describir el proceso de infiltración que permita tomar en cuenta el efecto de la variabilidad espacial de dicho proceso sobre la eficiencia de riego.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Descripción del riego por gravedad

El riego por gravedad consiste en la inundación controlada de la superficie del terreno la cual se divide en unidades de riego limitadas por bordos que restringen el flujo lateral del agua. Existen dos características generales que distinguen al riego por gravedad: a) el flujo de agua tiene una superficie libre que responde al gradiente gravitacional; y b) la superficie del terreno sirve como medio de transporte y distribución del agua (FAO, 1974). En un evento de riego por gravedad se distinguen cuatro fases:

- a) Avance: periodo que inicia con la aplicación del gasto y finaliza cuando el frente del agua alcanza el extremo final de la superficie de riego.
- b) Almacenamiento: inicia cuando el frente de agua alcanza el extremo final de la superficie de riego y termina cuando cesa el gasto.
- c) Consumo: inicia cuando se suspende el gasto y finaliza cuando alguna parte de la superficie de riego queda expuesta al aire; durante esta fase disminuye el almacenamiento por efecto de la infiltración o por escurrimiento.
- d) Recesión: se caracteriza por una exposición progresiva de la superficie de riego al aire; idealmente comienza cuando reaparece expuesta la superficie del suelo en el extremo inicial de la superficie de riego, continua hacia el extremo final de dicha superficie a medida que el agua se infiltra o escurre, y termina cuando el agua almacenada en el extremo final se absorbe completamente (Walker, 1987).

5.2 Evolución del riego por gravedad

Aun cuando los orígenes del riego por gravedad se remontan a varios miles de años atrás, los avances más significativos en relación a esta práctica han ocurrido en las últimas décadas. Los niveles de mecanización y tecnificación en la preparación del terreno y establecimiento de los sistemas de riego se han incrementado especialmente en los países desarrollados. Uno de los avances más significativos ha sido la aplicación de la computación y el uso de calculadoras programables para facilitar el diseño y la operación de los sistemas de riego. Con estas herramientas se logra una mayor comprensión de los procesos hidráulicos involucrados en un tiempo menor. Con base en esto es posible optimizar el diseño y manejo del sistema de riego considerando múltiples opciones y condiciones (FAO, 1974).

5.3 Simulación del riego por gravedad

Implica la reproducción del funcionamiento hidráulico del sistema de riego, a partir de las ecuaciones básicas que lo describen. El flujo hidráulico superficial, no permanente y variado, que caracteriza al riego por gravedad es descrito por las ecuaciones de Saint Venant:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + y \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} = -i(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_0 - i(x, t) \frac{V}{gy} = 0 \quad (2)$$

Donde:

V = velocidad media del escurrimiento [LT^{-1}]

y = tirante o carga del agua sobre la superficie del suelo [L]

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

S_f = pendiente de fricción (de la línea de energía en escurrimiento uniforme)

S_0 = pendiente topográfica longitudinal de la melga

g = aceleración de la gravedad [LT^{-2}]

t = tiempo [T]

x = distancia [L]

Impulsados por el desarrollo de computadoras de alta velocidad ocurrido a partir de la década de los setentas, diversos investigadores desarrollaron algunos modelos de simulación del riego por gravedad basados en la solución numérica de las Ecs (1) y (2) ya sea en su forma completa, o bien, en algunas formas simplificadas de las mismas (Bassett, 1972; Kincaid et al., 1972; Sakkas y Strelkoff, 1974; Bassett y Fitzsimmons, 1976; Strelkoff y Katopodes, 1977; Rayej y Wallender, 1985; Strelkoff, 1990; Wallender y Rayej, 1990; Bautista y Wallender, 1992).

Dos de los modelos más completos son el modelo "SIRMOD" (Utah State University, 1989), y del modelo "SRFR" (Strelkoff, 1990) los cuales aceptan como datos de entrada los parámetros y variables del sistema de riego (lámina de riego, pendiente, rugosidad, infiltración, gasto, longitud y tiempo de riego) y predicen la distribución del volumen de agua infiltrado a través del área irrigada, así como los

índices de eficiencia y uniformidad del riego como principales variables de salida. Un aspecto clave en la simulación de los sistemas de riego por gravedad es la estimación de los parámetros y variables de dichos sistemas.

5.3.1 Estimación de los parámetros del sistema

Enseguida se describen los parámetros del sistema de riego sobre los cuales el diseñador tiene un menor control:

5.3.1.1 Lámina de riego (L_r)

Representa la cantidad de agua por aplicar (cm) en cada riego para sostener un desarrollo normal y rendimiento satisfactorio del cultivo, misma que debe almacenarse en el suelo, en la profundidad ocupada por las raíces de las plantas (Pr):

$$L_r = ADT(FAM)Pr \quad (3)$$

donde ADT es el agua disponible total (cm m^{-1}) y representa a la cantidad de agua que el suelo puede almacenar cuando incrementa su contenido de humedad desde un valor de referencia conocido como "punto de marchitez permanente" (PMP) hasta otro conocido como "capacidad de campo" (CC). Dichos valores de referencia delimitan la cantidad de agua que el cultivo puede aprovechar. El factor FAM es una fracción que indica el abatimiento máximo permisible de ADT, es decir, la fracción máxima de ADT que puede abatirse entre dos riegos sucesivos

5.3.1.2 Pendiente del terreno (S_0)

Se refiere a la pendiente promedio del terreno en la dirección del riego ($m\ m^{-1}$). Influye sobre la velocidad del flujo de agua, ya que en la Ec. (2) representa un parámetro importante para cuantificar la componente horizontal de la fuerza debida al peso del agua en la dirección del flujo. Afecta por lo tanto al avance, recesión y uniformidad del riego. Es una cantidad fácil de medir y se asume como un valor constante a través de cierta longitud, aunque presenta algunas variaciones debidas al micro-relieve del terreno que pueden llegar a afectar a la uniformidad del riego.

5.3.1.3 Coeficiente de rugosidad (n)

Se utiliza para cuantificar el efecto de resistencia al flujo de agua causado por las irregularidades de la superficie irrigada debidas al grado de preparación del terreno, presencia del cultivo y residuos de cosecha. Afecta a la pendiente de fricción caracterizada por el término S_f en la Ec. (2), la cual describe a la componente horizontal de la fuerza de arrastre que se opone al flujo de agua en el sentido contrario a la dirección del riego. Normalmente se utiliza la ecuación de Manning para estimar S_f :

$$S_f = \frac{q \left(\frac{n}{C_d} \right)^2}{y^3} \quad (4)$$

donde q = gasto unitario ($m^3\ s^{-1}\ m^{-1}$); n = coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{1/6}$); C_d = constante dimensional ($1\ m^{1/2}\ s^{-1}$); y = tirante de flujo (m).

El valor de n puede estimarse con la Ec (4), midiendo el gasto (q), el tirante máximo en la cabecera de la unidad de riego (y), la pendiente S_0 , y asumiendo que $S_f=S_0$ bajo condiciones de flujo uniforme. También puede estimarse por calibración, o bien, por medio de tablas de valores reportados en la literatura. En estas tablas se presentan valores asociados a diferentes condiciones del terreno y cultivo; por ejemplo, un valor de 0.03 corresponde a un suelo sin cultivo, barbechado y rastreado, mientras que un valor de 0.15 corresponde a un cultivo de cobertura total, como pudiera ser un pasto.

Como en el caso de la pendiente, la rugosidad del terreno afecta a la velocidad del flujo de agua, al avance, recesión y uniformidad del riego. Junto con la pendiente, determina el gasto máximo no erosivo en un sistema de riego por gravedad, correspondiente a una velocidad máxima del flujo de agua que fluctúa entre 8 y 13 m/min, dependiendo de la estabilidad del suelo. El gasto máximo según la ecuación de Manning para el caso del riego por melgas con sección hidráulica rectangular sería:

$$q_{\max} = \left(V_{\max}^{1.67} \frac{n}{60S_0^{0.5}} \right)^{1.5} \quad (5)$$

con V_{\max} y q_{\max} expresados en $m\ s^{-1}$ y $m^3\ s^{-1}$, respectivamente.

5.3.1.4 Parámetros de infiltración

La infiltración es un parámetro importante en el riego por gravedad que afecta la cantidad y velocidad con que el agua penetra en el suelo.

Consecuentemente, afecta también al avance, recesión y uniformidad del riego. Se han desarrollado diversos modelos matemáticos para describir este proceso, los cuales se clasifican como: (1) aquellos basados en la solución numérica de la ecuación general del flujo unidimensional del agua en un medio poroso, (ecuación de Richard's); (2) soluciones analíticas de la ecuación de Richard's (Philip, 1957); (3) modelos físicamente fundamentados (Green y Ampt, 1911); (4) ecuaciones empíricas (Kostiakov, 1932; Lewis and Milne, 1938; USDA, 1974).

Las ecuaciones empíricas han sido las más utilizadas en aplicaciones relativas al riego por gravedad debido a su simplicidad y que no requieren del conocimiento previo de las propiedades físicas del suelo. Tal es el caso de la ecuación de Kostiakov modificada:

$$I = kt^a + f_0 t \quad (6)$$

donde I es la infiltración acumulada (cm); t es el tiempo (h); k , a y f_0 son los parámetros de la ecuación obtenidos regularmente mediante el ajuste estadístico de los datos de I vs t colectados en pruebas de infiltración realizadas en campo. Aun cuando estos parámetros carecen de significado físico, sus valores reflejan los efectos de las propiedades del suelo que determinan el proceso de infiltración. Sin embargo, estos valores no pueden ajustarse ante el cambio de algunas condiciones que afectan considerablemente dicho proceso como el contenido de humedad del suelo.

La estimación de los parámetros de infiltración por medición directa es una tarea costosa e incierta, debido a la variación espacial y temporal de las propiedades y características físicas del suelo que los afectan. Ante esto se aplican procedimientos generalizadores como la clasificación de suelos por infiltración realizada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1974), según la cual se establecieron “familias de funciones de infiltración”. Cada familia es representada por valores típicos de los parámetros de la Ec. (6) y se asocia con un tipo de suelo de acuerdo a su textura. Sin embargo, estas familias no reflejan la dispersión de los parámetros que ocurren dentro de cada categoría o tipo de suelo, por lo tanto, tampoco reflejan los posibles efectos de esta dispersión sobre la eficiencia y uniformidad del riego.

5.3.1.5 Estimación indirecta de los parámetros de la función de infiltración

Un procedimiento alternativo para modelar la infiltración es mediante el uso de ecuaciones físicas cuyos parámetros se estimen a partir de la estimación previa de las propiedades hidráulicas del suelo como la función de retención, o sea, la relación entre el potencial mátrico (h :cm) y contenido volumétrico de agua (θ :cm³/cm³), (Brooks y Corey, 1964):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right) = \left(\frac{h_b}{h} \right)^\lambda \quad (7)$$

donde ϕ = porosidad total del suelo (cm³ cm⁻³), θ_r = contenido de humedad residual (cm³ cm⁻³), h_b = presión por entrada de aire “bubbling pressure” (cm) y λ =

índice de la distribución de los poros del suelo por tamaño. A menudo se asume que $\theta_r=0$ y $\varphi=\theta_s$, siendo θ_s el contenido de humedad a saturación. Por su parte, la porosidad se relaciona con la densidad aparente (d_a : g cm⁻³) y la densidad de sólidos o densidad real del suelo (d_r : g cm⁻³):

$$\varphi = 1 - \frac{d_a}{d_r} \quad (8)$$

A partir de los parámetros de la Ec. (8) pueden estimarse los parámetros de la ecuación de infiltración de Green y Ampt (1911):

$$I = \varphi_d h_f \ln\left(1 + \frac{I}{\varphi_d h_f}\right) + Kt \quad (9)$$

con

$$\varphi_d = \varphi_e - \theta_0 \quad (10)$$

$$\varphi_e = \varphi - \theta_r \quad (11)$$

donde φ_d = porosidad disponible (cm³ cm⁻³), h_f = potencial mátrico del frente de humedecimiento (cm), K = conductividad hidráulica (cm h⁻¹), φ_e = porosidad efectiva (cm³ cm⁻³), y θ_0 = contenido de humedad inicial (cm³ cm⁻³). Los valores de h_f y K pueden estimarse como:

$$h_r = \frac{2\lambda + 3}{2\lambda + 2} \left(\frac{h_b}{2} \right) \quad (12)$$

$$K = \frac{1}{2} K_s \quad (13)$$

con

$$K_s = \mu \frac{\phi_e^2}{h_b^2} \left[\frac{\lambda^2}{(\lambda + 1)(\lambda + 2)} \right] \quad (14)$$

donde μ es un factor que depende de la gravedad y de varias constantes del fluido, igual a 21.0 ó 75,600 para K_s estimada en cm/seg ó cm/h, según sea el caso (Brutsaert, 1967).

5.3.1.6 Estimación indirecta de las propiedades hidráulicas del suelo

La modelación de procesos hidrológicos como retención, infiltración y transporte de agua a través del suelo requiere de valores fácilmente accesibles y representativos de los parámetros de las propiedades hidráulicas del suelo (Ec. 7). La medición directa de tales parámetros es una tarea lenta y costosa, razón por la cual rara vez se dispone de dicha información. Es por esto que se han desarrollado algunos modelos para predecir la función de retención a partir de propiedades del suelo más fácilmente medibles y disponibles. El análisis de amplias bases de datos medidos en laboratorio y campo han permitido, en las últimas décadas, el establecimiento de relaciones funcionales denominadas "Pedotransfer functions" (PTF) para predecir la función de retención en función

de datos básicos del suelo como la distribución de sus partículas por tamaño o textura, contenido de materia orgánica y densidad aparente (Bouma, 1989).

Algunas funciones PTF estiman el contenido de humedad para ciertos potenciales mátricos predefinidos utilizando regresión múltiple (Gupta y Larson, 1979; Rawls y Brakensiek, 1982) y redes neuronales artificiales (Pachepsky, et al., 1996); otras estiman directamente los parámetros de la función de retención con regresión múltiple (Vereecken et al., 1989; Minasny et al., 1999) y redes neuronales artificiales (Pachepsky et al., 1996; Schaap y Leij, 1998); un tercer grupo de funciones utilizan modelos conceptuales de la física del fenómeno de retención de agua (Ayra y Paris, 1981; Haverkamp y Parlange, 1986).

5.3.2. Estimación de las variables del sistema

Las variables del sistema que a continuación se describen, son aquellas sobre las que el diseñador tiene un mayor grado de control:

5.3.2.1. Longitud

La longitud de las unidades de riego es una variable que determina la distancia de recorrido del flujo de agua sobre la superficie del terreno. Dependiendo de los valores fijados para los parámetros y el resto de las variables del sistema, existe una longitud óptima que maximiza la uniformidad del riego y minimiza las pérdidas de agua. Una longitud muy grande retarda el avance del agua, lo cual promueve una aplicación excesiva y no uniforme del riego. Por otra parte, una longitud pequeña produce efectos económicos adversos debido al

mayor número de vueltas de la maquinaria y reducción de la superficie de cultivo por el aumento en el número de canales, drenes y caminos de acceso.

5.3.2.2. Gasto o caudal

El gasto es la cantidad de agua aplicada por unidad de tiempo. Afecta principalmente la velocidad de avance del agua, la eficiencia y uniformidad del riego. Se expresa también como gasto unitario, es decir, como el gasto aplicado por unidad de ancho del terreno. Generalmente se restringe a un rango de valores delimitados por un valor máximo que no erosione el suelo, y un valor mínimo que cubra la superficie del terreno.

5.3.2.3. Tiempo de riego

Es el intervalo de tiempo durante el cual se aplica el gasto o caudal. Normalmente se define en base al gasto y lámina de riego requerida. Cuando el tiempo de riego se prolonga más allá del necesario para aplicar la lámina de riego requerida por el cultivo, entonces se producen pérdidas de agua por precolación profunda que reducen la eficiencia del riego.

5.4. Aplicación del análisis de incertidumbre

Este tipo de análisis se fundamenta en una serie de principios y procedimientos para estimar la incertidumbre debida a la propagación de los errores, asociada a las predicciones de un modelo. Una de las principales fuentes de incertidumbre tiene su origen en los propios modelos por ser estos una abstracción o representación aproximada de la realidad, con algunas suposiciones

y simplificaciones incorporadas. Otra fuente de incertidumbre se origina en los parámetros del modelo, ya sea por su estimación imprecisa o falta de información, así como por su dificultad para representar la variabilidad del sistema (Mc Kay et al., 1997).

Es la última fuente de error antes mencionada la que se analiza en el presente estudio, ya que se considera el posible error inducido por la variabilidad espacial de los parámetros de la función de infiltración, dentro de una zona geográfica y tipo de suelo, sobre la eficiencia y uniformidad del riego predichos con un modelo de simulación. La probabilidad es la mejor forma de evaluar el nivel de incertidumbre o riesgo. Una técnica para incluir la incertidumbre en la evaluación de riesgo es representando las incertidumbres en los parámetros del modelo con distribuciones de probabilidad. Un método común para realizar este análisis es la simulación Monte Carlo.

5.4.1. La simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es una técnica cuantitativa para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio o probabilístico de sistemas reales. Para aplicar esta técnica se debe primero crear o disponer de un modelo del sistema que se pretende analizar, identificando las variables aleatorias (variables de entrada) que determinan su comportamiento global. Luego se realiza un experimento consistente en: (1) generar muestras aleatorias de valores de cada una de dichas variables, y (2) registrar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Después de repetir el experimento se tendrá un cierto número de observaciones de las variables de salida, mismas que podrán ser

analizadas estadísticamente a partir de sus funciones de distribución para entender mejor el comportamiento del sistema analizado. Como requisito de esta técnica se deben conocer previamente las funciones de distribución de cada una de las variables y los parámetros de entrada.

5.4.2. Generación aleatoria de variables

Los parámetros de las ecuaciones de infiltración y retención generalmente se ajustan a las funciones de distribución normal y lognormal. Para generar los valores aleatorios de una variable normalmente distribuida se utiliza la siguiente expresión:

$$x = \mu + \sigma r \quad (15)$$

donde x es el valor de la variable por estimar, μ es la media, σ la desviación estándar, y r es una desviación aleatoria normalizada con media cero y varianza unitaria estimada como (Rubinstein, 1981):

$$r = [-2\ln(\text{rnd}_1)]^{0.5} \text{Cos}[2\pi(\text{rnd}_2)] \quad (16)$$

donde rnd_1 y rnd_2 son dos números aleatorios con valores entre cero y uno generados de una distribución uniforme.

5.4.3. Generación aleatoria de variables correlacionadas

Es importante que en la simulación Monte Carlo se considere la correlación entre variables, ya que de no hacerlo se generarían muestras de datos con valores improbables de dichas variables. Un procedimiento para generar dos variables correlacionadas (x, y), consiste en generar primero la variable x , con las Ecs (15) y (16); luego se calcula la media y la desviación estándar de la variable y , ambas condicionadas dado el valor de x :

$$E(Y | X) = \mu_Y + \rho \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (X - \mu_X) \quad (17)$$

$$\sigma(Y | X) = \sigma_Y \sqrt{1 - \rho^2} \quad (18)$$

donde $E(y | x)$ es la media de y condicionada al valor de x ; $\sigma(y | x)$ la desviación estándar de y igualmente condicionada; μ_Y y μ_X son las medias de y y x ; σ_Y y σ_X las desviaciones estándar de y y x ; ρ el coeficiente de correlación entre y y x . Una vez calculado lo anterior se estima el valor de y con las Ecs (15) y (16), utilizando su media y varianza condicionadas. Para generar más de dos variables aleatorias correlacionadas se debe determinar primero la matriz de covarianza.

5.4.4. Numero de simulaciones

La estimación del número de simulaciones se basa en el teorema del límite central en lo relativo al tamaño de muestra mínimo (n) para mantener un error máximo (intervalo de confianza del 95%):

$$n = \left[\frac{t^2 S_x}{e} \right]^2 \quad (1)$$

donde t es un valor crítico de la distribución t de student, e es la mitad de la amplitud del intervalo de confianza (error máximo permitido) y S_x es la desviación estándar preliminar de la variable respuesta de interés. Para estimar este último estadístico se necesita realizar por lo menos 30 simulaciones o corridas de programa previas ($n=30$, $t=1.96$).

5.5 Aplicación de la simulación estocástica en diferentes disciplinas

La simulación estocástica ha sido muy utilizada por especialistas de diversas disciplinas para analizar la ocurrencia de fenómenos aleatorios, especialmente en áreas donde el costo de la experimentación es muy alto. Así por ejemplo, en hidrología se ha aplicado en el análisis de series de tiempo de variables hidrológicas para evaluar y pronosticar la ocurrencia de eventos tales como aguaceros, escurrimientos y niveles de embalse en las presas. Con este tipo de análisis se diseñan las obras hidráulicas, pronosticando los periodos de retorno de los eventos considerados (Hipel, 1994).

En el área de conservación de suelos y calidad de agua, Bonilla et al. (1999) aplicaron la simulación estocástica para predecir los flujos de agua y el transporte de solutos en los suelos considerando la variabilidad espacial propia del suelo. Similarmente, Parsons y Muñoz-Carpena, (1999) desarrollaron un modelo para predecir el flujo de agua y el transporte de nitratos hacia los acuíferos con el propósito de evaluar la contaminación en una zona de riego. En ingeniería

ambiental se aplicó un esquema de simulación estocástica para predecir la migración de elementos radioactivos desde un basurero nuclear (Capilla et al., 1998).

En ingeniería de la construcción se aplicó la simulación estocástica para predecir costos y niveles de productividad en proyectos de construcción (Halpin, 1977). En esta misma disciplina se desarrolló un método para estimar el tiempo de construcción y la probabilidad de culminación de una obra civil (Lee, 2005). Por otra parte, en ciencia animal se propuso un método de simulación estocástica para evaluar estrategias de selección de hatos de ganado bovino utilizando parámetros genéticos, económicos y de manejo (Montaldo et al., 2003). De manera similar se desarrolló un procedimiento para estimar la capturabilidad y el reclutamiento del calamar gigante del golfo de California (Morales y Neváres, 2002).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del estudio

El presente estudio se realizó en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP, localizado en el margen derecho del canal principal Sacramento km 6.5 en Gómez Palacio, Durango. El presente estudio cubre los suelos de la Región Lagunera, la cual se ubica entre los paralelos $24^{\circ} 25'$ y $26^{\circ} 55'$ de latitud Norte y los meridianos $102^{\circ} 30'$ y $104^{\circ} 48'$ de longitud oeste, con una altura media de 1,123 m sobre el nivel del mar (Figura 1). El clima de la región es seco y caliente con temperatura media anual de 22°C y precipitación media anual de 230 mm. El período libre de heladas se ubica entre abril y octubre (García, 1970).

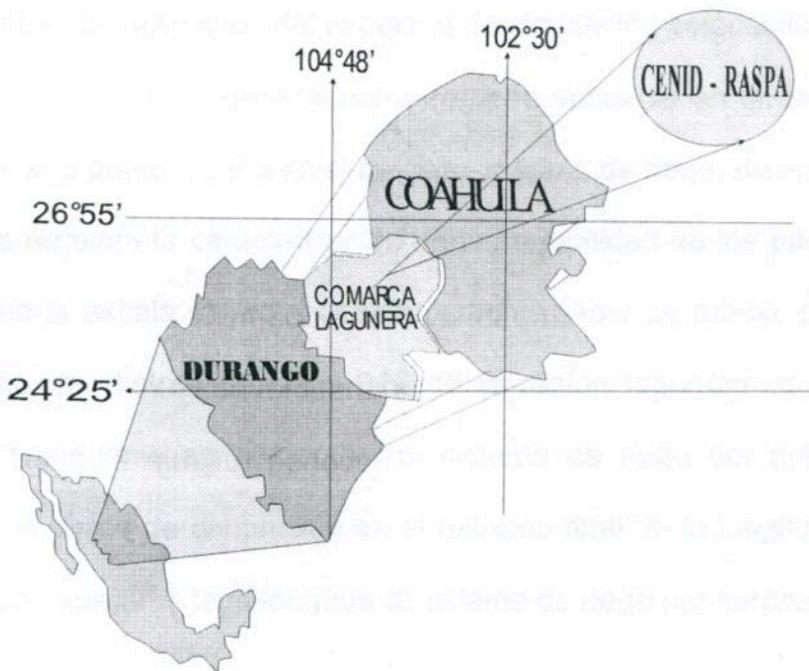


Figura 1. Localización de la Comarca Lagunera.

6.2 Metodología general

La metodología general se basó en el desarrollo de un esquema de simulación estocástica que se combina dos técnicas: (1) La simulación como herramienta para diseñar el riego por gravedad, a partir del nivel de eficiencia predicho por un modelo en función de los parámetros y variables que determinan el funcionamiento del sistema de riego y (2) El análisis de incertidumbre con el método de simulación estocástica Monte Carlo para cuantificar, en base a probabilidad, la incertidumbre inducida por la variabilidad espacial de los parámetros de la función de infiltración sobre la eficiencia del sistema de riego y su diseño.

6.3 Ámbito de aplicación

El ámbito de aplicación del esquema de simulación estocástica propuesto en el presente estudio es general porque puede aplicarse en diversas escalas espaciales como pueden ser a nivel de finca, módulo de riego, distrito de riego o región. Sólo requiere la caracterización de la variabilidad de los parámetros de infiltración en la escala espacial correspondiente. Aquí se aplicó, por ejemplo, para el caso del distrito de riego 017 de la región lagunera de Coahuila y Durango. El esquema se enfocó en el sistema de riego por melgas rectas cerradas (con bordo de contención en el extremo final de la longitud de riego), aunque puede aplicarse también para el sistema de riego por surcos.

6.4 Simulación del riego

Se utilizó el modelo SRFR, uno de los dos modelos más completos referidos en el capítulo previo, debido a que permite la ejecución de corridas múltiples por lotes. Los parámetros y variables de entrada requeridos por el modelo 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 de los cuales se consideraron la eficiencia de aplicación (E_a) y coeficiente de uniformidad (C_u), ambos expresados en por ciento:

$$E_a = 100 \left(\frac{LrL}{0.06qt_r} \right) \quad (20)$$

$$C_u = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |z_i - z_{med}|}{N} \right) \quad (21)$$

donde Lr = 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 numero total de sitios considerados.

6.5 Descripción del esquema de simulación estocástica

A diferencia del enfoque tradicional determinístico empleado para simular el riego por gravedad, con el esquema estocástico o aleatorio propuesto se analizó cómo la incertidumbre en las variables aleatorias de entrada al modelo se propagó hacia la incertidumbre en las variables de salida.

6.5.1 Caracterización de la variabilidad espacial de la infiltración

Para realizar la simulación estocástica del riego por melgas se caracterizó la variabilidad de los parámetros de infiltración en los suelos de la región lagunera. Por lo cual se ajustaron cada uno de los parámetros de la Ec. (9) a una función de distribución teórica con la prueba de Kolmogorov Smirnov ($\alpha=0.05$) utilizando el procedimiento UNIVARIATE del SAS (SAS Institute Inc. 1999). Primero se conjuntó una base de datos de los suelos de la región lagunera compuesta por 14,317 registros con datos de las propiedades físicas básicas del suelo determinadas durante 30 años en el laboratorio de análisis de suelos y aguas del CENID RASPA. Para cada uno de estos registros se estimaron indirectamente los parámetros de infiltración (Ecs 8-14) a partir de la función de retención (Ec. 7).

Debido a que la función de retención de humedad por el suelo es una determinación poco frecuente, ésta se estimó indirectamente para cada registro de la base de datos utilizando las funciones PTF de Rawls y Brakensiek (1982) presentadas en el Cuadro 1. Primero se estimaron los contenidos de humedad (θ) correspondientes a 10 valores del potencial métrico del suelo predefinidos

Cuadro 1. Funciones PDF para estimar el contenido de humedad correspondiente a diez valores del potencial mátrico del suelo.

H (cm)	Intercepto	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Mat. Org. (%)	Dens. Ap. (g cm ⁻³)	CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)	R ²
-102	0.4118	-0.0030		0.0023	0.0317			0.41	0.81
	0.4103	0.0031			0.0260		1.34	-0.51	0.81
	0.0619	-0.0002			-0.0067				0.95
-204	0.3121	-0.0024		0.0032	0.0314			0.61	0.86
	0.3000	-0.0024			0.0236		1.01	-0.06	0.89
	0.3019	-0.0002							0.99
-337	0.2576	-0.0020		0.0036	0.0299			0.72	0.87
	0.2391	-0.0019			0.0210				0.92
	0.2065	-0.0016		0.0040	0.0275			0.80	0.87
-612	0.1814	-0.0015			0.0178	-0.0091	0.66	0.39	0.94
	0.0136								0.99
-1020	0.0349		0.0014	0.0055	0.0251			0.85	0.87
	0.1417	-0.0012			0.0151		0.52	0.54	0.96
	-0.0034				0.0022				0.99
-2040	0.0281		0.0011		0.0220			0.90	0.86
	0.0986	0.0009		0.0054	0.0116		0.36	0.69	0.97
	-0.0043				0.0026				0.99
-4080	0.0238		0.0008	0.052	0.0190			0.93	0.84
	0.0649	-0.0006			0.0085		0.24	0.79	0.98
	-0.0038				0.0026				0.99
-7140	0.0216		0.0006	0.0050	0.0167			0.94	0.81
	0.0429	-0.0004			0.0062		0.16	0.86	0.98
	-0.0027				0.0024				0.99
-10200	0.0205		0.0005	0.0049	0.0154			0.95	0.81
	0.0309	-0.0003			0.0049		0.11	0.89	0.99
	-0.0019				0.0022				0.99
-15300	0.0260			0.0005	0.0158				0.80

(h), a partir de los contenidos de arena, arcilla, materia orgánica y los coeficientes de algunas de las funciones polinomiales presentadas en el Cuadro 1. Posteriormente se utilizaron los valores de θ vs h para obtener los parámetros de la función de retención (Ec. 7) mediante regresión lineal simple. Las funciones PTF mostradas en el Cuadro 1 fueron obtenidas con datos de retención medidos en 500 suelos (2,543 horizontes) de 18 estados de la unión americana (Rawls y Brakensiek, 1982).

Los registros con los parámetros de la función de infiltración obtenidos por regresión fueron reagrupados por tipo de suelo de acuerdo a su textura. Obteniéndose las funciones de distribución de cada parámetro para cada textura o tipo de suelo presente en la región.

6.5.2 Programa de cómputo

Como ya se describió en el capítulo previo, la simulación Monte Carlo exige la obtención de muestras de las variables aleatorias de entrada y la ejecución repetida del modelo para analizar el comportamiento del sistema ante diversos escenarios. En el caso de un sistema de riego por gravedad, un escenario se encuentra definido por un tipo de suelo caracterizado por su textura, lámina y gasto de riego por aplicar; así como longitud, pendiente y rugosidad del terreno. Las variables aleatorias son los parámetros de la función de infiltración y lo que se analiza es el desempeño del sistema de riego ante el cambio de estas variables.

Se codificó un programa de cómputo en FORTRAN para ejecutar la simulación Monte Carlo, el cual incluye rutinas para leer las variables de entrada, generar variables aleatorias, ejecutar el modelo SFRF y ajustar los índices de

eficiencia predichos a funciones de distribución teóricas. El programa se utilizó para seleccionar gastos adecuados para varios escenarios de interés práctico. Para probar cada gasto se realizaron 120 simulaciones manteniendo como constantes al tipo de suelo o textura, longitud y pendiente; variando los parámetros de infiltración en cada simulación, los cuales se generaron de las funciones de distribución previamente ajustadas para cada uno de ellos y para cada tipo de suelo.

La lámina de riego y coeficiente de rugosidad también se dejaron variar de manera aleatoria dentro de ciertos rangos típicos considerando funciones de distribución uniforme. En la definición de los rangos típicos de la lámina de riego se consideraron las capacidades de retención de agua promedio de cada tipo de suelo y también se consideró si se trataba de un riego de auxilio o presiembra. Los rangos típicos del coeficiente de rugosidad se definieron dentro de los valores extremos de 0.02 y 0.15 correspondientes a un suelo sin vegetación bien laborado y a una cubierta vegetal densa como puede ser un pasto. Los valores de estas variables probados en cada simulación se escogieron dentro de sus rangos típicos mediante la generación de dos variables aleatorias con distribución uniforme.

Para decidir si un gasto era adecuado o no, los 120 valores de eficiencia de aplicación y uniformidad del riego (E_a y C_u) resultantes se ajustaron primero a una función de distribución normal. Luego se determinaron los valores críticos E_{a05} [$P(E_a > E_{a05} = 95\%)$] y C_{u05} [$P(C_u > C_{u05} = 95\%)$], los cuales indicaban que el 95% de los valores de E_a y C_u son mayores que E_{a05} y C_{u05} . Finalmente, si E_{a05} y C_{u05} superaban el 80%, entonces el gasto era aceptado como adecuado.

El programa se generalizó para probar no solo uno sino varios gastos con el fin de determinar en una sola corrida el rango de gastos adecuados para un escenario específico. El rango de gastos unitarios probados varió de un valor 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 unitario máximo no erosivo estimado con la Ec. (5). La Figura 2 muestra el diagrama de flujo del programa de cómputo.

Con la ejecución repetida del programa se determinaron, a manera de ejemplo, rangos de gastos unitarios adecuados para el riego por melgas bajo distintos escenarios. Tales escenarios consideraron tres de los tipos de suelos más frecuentes en la región, correspondientes a las texturas arcillosa, franca y franca arenosa. También consideraron las láminas de riego y condiciones de rugosidad del terreno típicas para los riegos de presiembra y de auxilio en cada textura. Igualmente consideraron un rango de longitud de 50 a 350 m. Además de los gastos, también se pudieron definir los rangos adecuados de la pendiente del terreno.

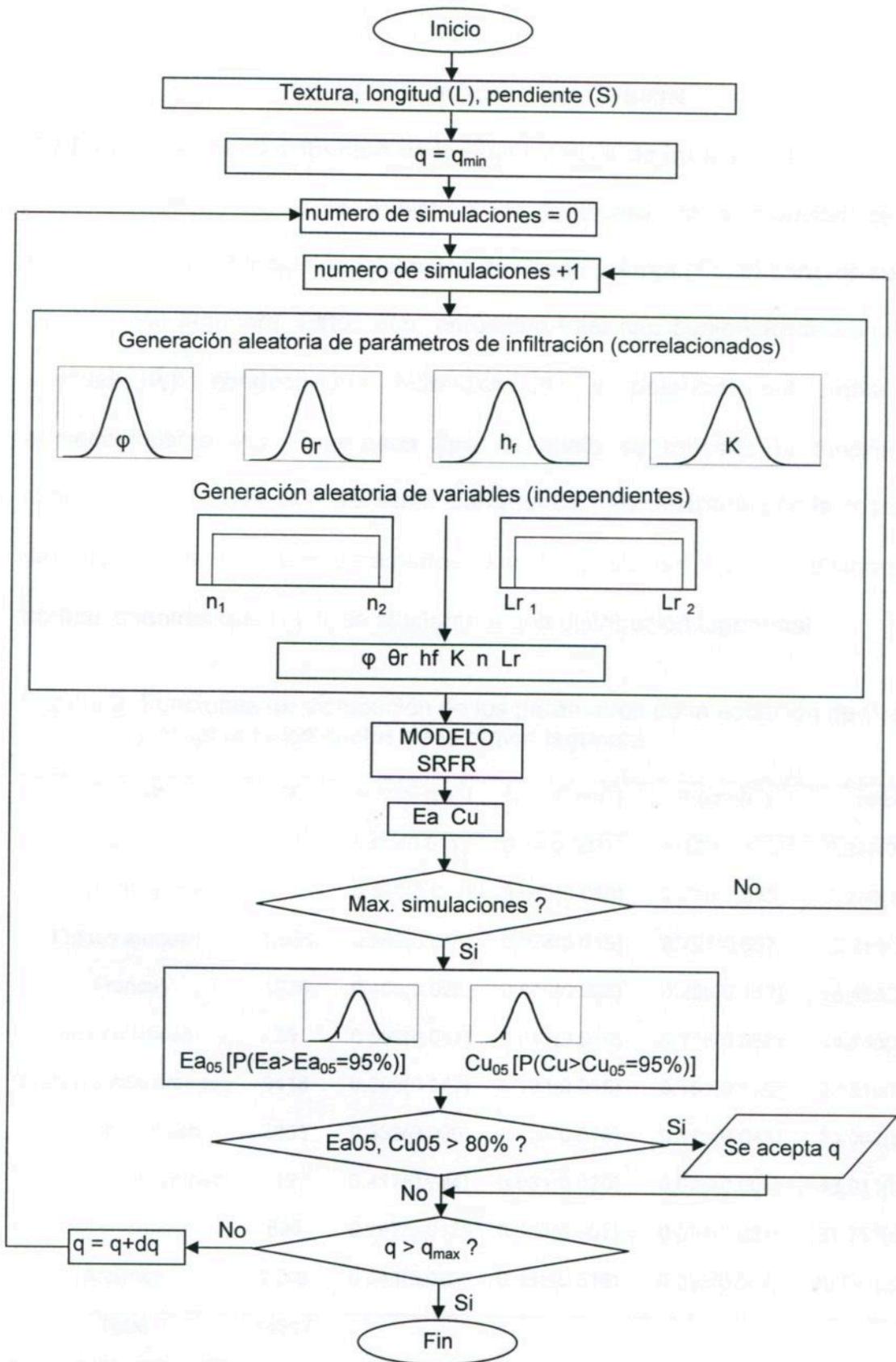


Figura 2. Diagrama de flujo del programa de cómputo

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Funciones de distribución de los parámetros de infiltración

En el Cuadro 2 se muestran las funciones de distribución de los parámetros de la función de infiltración de Green y Ampt (Ec. 9) para los suelos de la región lagunera. Estos son: porosidad total (ϕ), contenido de humedad residual (θ_r), conductividad hidráulica (K) y potencial del frente de humedecimiento (h_f). Para cada tipo de suelo se muestra la función de distribución de cada uno de estos parámetros caracterizada por la media y desviación estándar. Los parámetros ϕ y θ_r se ajustaron a una distribución normal, mientras que K y h_f se ajustaron a una distribución lognormal.

Cuadro 2. Funciones de distribución de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt para los suelos de la región lagunera.

Textura	N	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	K (cm h ⁻¹)	h_f (cm)
Arenoso	76	0.379(0.011) [†]	0.44(0.007) [†]	5.420(1.476) [‡]	5.247(0.924) [‡]
Areno francosa	207	0.370(0.012)	0.061(0.010)	2.716(1.083)	7.280(1.829)
Franco arenoso	1,936	0.363(0.018)	0.078(0.016)	0.721(0.567)	13.215(3.325)
Franco	1926	0.403(0.022)	0.076(0.022)	0.266(0.117)	18.493(3.455)
Franco limoso	29	0.552(0.017)	0.011(0.015)	0.718(0.353)	14.730(3.212)
Franco arcillo arenoso	3418	0.308(0.017)	0.124(0.015)	0.151(0.170)	22.519(5.925)
Franco arcilloso	2883	0.353(0.020)	0.135(0.018)	0.113(0.043)	23.382(5.282)
Franco arcillo limoso	19	0.417(0.024)	0.081(0.020)	0.025(0.008)	48.911(5.791)
Arcillo arenoso	895	0.267(0.012)	0.164(0.007)	0.031(0.021)	31.715(6.098)
Arcilloso	2928	0.346(0.022)	0.168(0.016)	0.093(0.067)	28.597(22.631)
Total	14317				

Valores entre paréntesis expresan la desviación estándar
Antilogaritmo del logaritmo de la media y la desviación estándar

7.2 Matrices de covarianza de los parámetros de la función de infiltración

En el Cuadro 3 se muestran las matrices de covarianza de los parámetros de la función de infiltración de Green y Ampt por tipo de suelo, los cuales se obtuvieron al aplicar el análisis de covarianza entre los valores de dichos parámetros agrupados por textura. En este análisis se utilizaron los datos de h_f y K transformados. Solamente se presentan las tres texturas utilizadas para ejemplificar la aplicación del procedimiento motivo de este estudio.

Cuadro 3. Matrices de la covarianza de los parámetros de la función de infiltración de Green y Ampt por tipo de suelo

	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	h_f (cm)	K (cm h ⁻¹)
Suelo franco arenoso				
ϕ (cm ³ cm ⁻³)	0.00031	-0.00016	0.001773	-0.0054
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	-0.00016	0.000272	0.000648	-0.0016
h_f (cm)	0.001773	0.000648	0.040842	-0.10383
K (cm h ⁻¹)	-0.0054	-0.0016	-0.10383	0.284992
Suelo franco				
ϕ (cm ³ cm ⁻³)	0.000221	-0.00016	0.000218	-0.00108
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	-0.00016	0.000469	0.002345	-0.00472
h_f (cm)	0.000218	0.002345	0.019462	-0.04389
K (cm h ⁻¹)	-0.00108	-0.00472	-0.04389	0.100907
Suelo arcilloso				
ϕ (cm ³ cm ⁻³)	0.000597	-0.00021	0.005955	-0.01281
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	-0.00021	0.000263	-0.00199	0.004339
h_f (cm)	0.005955	-0.00199	0.068048	-0.15033
K (cm h ⁻¹)	-0.01281	0.004339	-0.15033	0.350744

7.3 Rangos de gastos adecuados para los suelos de la región lagunera

En los Cuadros 4-9 se presentan los rangos de gastos unitarios adecuados para el diseño eficiente y confiable del riego por melgas en los suelos con textura franca arenosa, franca y arcillosa de la región lagunera. Los valores comprendidos en cada rango de gastos garantizan una eficiencia de aplicación y uniformidad del riego superior al 80% en un 95% de los casos (95% de probabilidad).

7.3.1 Rangos de gastos adecuados para suelos de textura franco arenosa

Los Cuadros 4 y 5 muestran los rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio respectivamente, en suelos con textura franco arenosa. En el Cuadro 4 se puede observar que para el riego de presiembra, los rangos de gastos se estrechan a medida que la longitud aumenta. El límite inferior de los rangos aumenta a razón de $1.0 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 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. Este efecto se debe principalmente a la alta conductividad hidráulica de este tipo de suelos, la cual exige gastos mayores a medida que la longitud del terreno aumenta.

Continuando con el riego de presiembra (Cuadro 4), los rangos de gastos se mantienen casi constantes entre el límite inferior y 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. Esto se debe principalmente a que, en el sistema de riego por melgas cerradas 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.

Cuadro 4. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos de textura franco arenosa, lámina de riego de 10-14 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios ($l\ s^{-1}\ m^{-1}$)						
0	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.5-12.0	5.5-12.0	6.5-12.0	10-12.0
1	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.5-12.0	5.5-12.0	6.5-12.0	10-12.0
2	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.5-12.0	5.5-12.0	6.0-12.0	
3	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.5-12.0	5.0-12.0		
4	1.5-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.5-12.0			
5	1.5-10.0	2.5-10.0	3.5-10				
6	1.5-8.8	2.5-8.8	3.5-8.8				
7	1.5-7.8	2.5-7.8					
8	1.5-7.1	2.0-7.1					
9	1.5-6.5						
10	1.5-6.0						
11	1.5-5.6						
12	1.5-5.2						
13	1.5-4.9						
14	1.5-4.7						
15	1.5-4.4						
16	1.5-4.2						
17	1.5-4.0						

En el Cuadro 5 se muestra que para el riego de auxilio, tanto la pendiente como la longitud ejercen una mayor restricción sobre los rangos de gastos adecuados en relación al riego de presiembra. El límite inferior de estos rangos aumenta con la longitud a razón de $2.5\ l\ s^{-1}\ m^{-1}$ por cada 50 m hasta los 150 m y no se tienen gastos adecuados para longitudes mayores a este valor.

La pendiente máxima para que existan gastos adecuados disminuye con la longitud en una mayor proporción en relación al riego de presiembra. 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 de textura franco arenosa, lámina de riego de 6-10 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios ($l\ s^{-1}\ m^{-1}$)						
0	2.0-12.0	4.5-12.0	6.5-12.0				
1	2.0-12.0	4.5-12.0	6.5-12.0				
2	2.0-12.0	4.5-12.0					
3	2.0-12.0	4.5-12.0					
4	2.0-12.0	4.5-12.0					
5	1.5-10.0	4.0-10.0					
6	1.5-8.8	4.0-8.8					
7	1.5-7.8						
8	1.5-7.1						
9	1.5-6.5						
10	1.5-6.0						
11	1.5-4.6						

7.3.2 Rangos de gastos adecuados para suelos de textura franca

Los Cuadros 6 y 7 muestran los rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio, respectivamente, en suelos con textura franca. En el Cuadro 6 se puede notar que para el riego de presiembra, los rangos de gastos se estrechan a medida que la longitud aumenta pero en una menor proporción a lo ocurrido para el riego de presiembra en los suelos de textura franco arenosa. El límite inferior de los rangos se incrementa con la longitud en

solamente $1.5 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ por cada 50 m en todo el rango de longitud estudiado. La menor conductividad hidráulica de este tipo de suelos en relación con suelos de textura franco arenosa permite una mayor longitud del terreno. En cambio, 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 6. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos de textura franca, lámina de riego de 12-16 cm y un 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	0.5-12.0	1.0-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	2.0-12.0
1	0.5-12.0	1.0-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	2.0-12.0
2	0.5-12.0	1.0-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	2.0-12.0
3	0.5-12.0	1.0-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	2.0-12.0
4	0.5-12.0	1.0-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0		
5	0.5-10.0	1.0-10.0	1.0-10.0	1.5-10.0			
6	0.5-8.8	1.0-8.8	1.0-8.8				
7	0.5-7.8	1.0-7.8	1.0-7.8				
8	0.5-7.0	1.0-7.0					
9	0.5-6.5	1.0-6.5					
10	0.5-6.0	1.0-5.5					
11	0.5-5.6						
12	0.5-5.2						
13	0.5-4.9						
14	0.5-4.7						
15	0.5-4.4						
16	0.5-4.2						
17	0.5-4.0						
18	0.5-3.9						
19	0.5-3.7						
20	0.5-3.6						

En el Cuadro 7 se muestra que para el riego de auxilio, tanto la pendiente como la longitud ejercen una mayor restricción sobre los rangos de gastos adecuados en relación al riego de presiembra. El límite inferior de estos rangos aumenta con la longitud a razón de $0.5 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ por cada 50 m hasta los 200 m y en $1.0 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ por cada 50 m después de dicha longitud. La pendiente máxima para que existan gastos adecuados disminuye con la longitud en una mayor proporción en relación 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 7. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos de textura franca, lámina de riego de 8-12 cm y un 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	0.5-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	3.0-12.0	3.5-12.0	5.0-12.0
1	0.5-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	2.5-12.0	3.5-12.0	4.5-12.0
2	0.5-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	2.0-12.0	2.5-12.0	3.0-12.0	4.0-12.0
3	0.5-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0	1.5-12.0	2.5-12.0		
4	0.5-12.0	1.0-12.0	1.5-12.0				
5	0.5-10.0	1.0-10.0	1.0-10.0				
6	0.5-8.8	1.0-8.8					
7	0.5-7.8	1.0-7.3					
8	0.5-7.0						
9	0.5-6.5						
10	0.5-6.0						
11	0.5-5.6						
12	0.5-5.2						
13	0.5-4.9						
14	0.5-4.7						

7.3.3 Rangos de gastos adecuados para suelos de textura arcillosa

En los Cuadros 8 y 9 se presentan los rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio, respectivamente, en suelos con textura arcillosa. En ambos casos, la restricción ejercida por el incremento de la longitud sobre los rangos de gastos eficientes es mínima debido a 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 adecuados se mantiene aún en este tipo de suelos.

Cuadro 8. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de presiembra en suelos de textura arcillosa, lámina de riego de 12-16 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.02-0.04

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios ($l\ s^{-1}\ m^{-1}$)						
0	0.5-12	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12
1	0.5-12	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12
2	0.5-12	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12
3	0.5-12	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12
4	0.5-12	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12	1.0-12
5	0.5-10	0.5-10	0.5-10	1.0-10			
6	0.5-8.8	0.5-8.8	0.5-8.8				
7	0.5-7.8	0.5-7.8					
8	0.5-7.0	0.5-7.0					
9	0.5-6.5	0.5-6.5					
10	0.5-6.0	0.5-4.5					
11	0.5-5.6						
12	0.5-5.2						
13	0.5-4.9						
14	0.5-4.7						
15	0.5-4.4						
16	0.5-4.2						
17	0.5-4.0						
18	0.5-3.9						
19	0.5-3.7						
20	0.5-3.6						

Cuadro 9. Rangos de gastos unitarios adecuados para el riego de auxilio en suelos de textura arcillosa, lámina de riego de 8-12 cm y un coeficiente de rugosidad de 0.04-0.15

Pendiente (cm/100m)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios ($l\ s^{-1}\ m^{-1}$)						
0	0.5-12.0	1.0-12.0	0.5-12.0	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12
1	0.5-12.0	1.0-12.0	0.5-12.0	0.5-12	0.5-12	1.0-12	1.0-12
2	0.5-12.0	1.0-12.0	0.5-12.0	0.5-12	0.5-12	1.0-12	
3	0.5-12.0	1.0-12.0	0.5-12.0	0.5-12			
4	0.5-12.0	1.0-12.0	0.5-12.0				
5	0.5-10.0	0.5-10.0					
6	0.5-8.8	0.5-8.8					
7	0.5-7.8	0.5-7.8					
8	0.5-7.0						
9	0.5-6.5						
10	0.5-6.0						
11	0.5-5.6						
12	0.5-5.2						
13	0.5-4.9						

VIII. CONCLUSIONES

Un enfoque estocástico como el aquí planteado para describir el proceso de infiltración en la simulación del riego por gravedad permite cuantificar y acotar el nivel de incertidumbre inducido por la variabilidad espacial de dicho proceso sobre los índices de eficiencia predichos y el diseño de los sistemas de riego.

El esquema de simulación estocástica aquí propuesto puede aplicarse a diversas escalas espaciales como pueden ser a nivel de finca, módulo de riego, distrito de riego o región. Caracterizando la variabilidad de los parámetros de infiltración en la escala espacial correspondiente

Los rangos de gastos adecuados presentados como resultados pueden utilizarse como guías para diseñar de manera eficiente y confiable el riego por melgas rectas cerradas en suelos de textura franco arenosa, franco y arcillosa de la región lagunera.

El programa de cómputo desarrollado puede utilizarse directamente como herramienta para diseñar el riego por melgas rectas bajo diversos escenarios y condiciones de interés práctico.

Con modificaciones leves, el programa puede adaptarse para el sistema de riego por surcos.

También puede utilizarse para ampliar los resultados tabulares aquí presentados para otros tipos de suelos y condiciones.

IX. LITERATURA CITADA

- Arya, L.M. and J.F. Paris. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1023-1030.
- Bassett, D.L. 1972. Mathematical model of water advance in border irrigation. *Transactions of the ASAE*, 15: 992-995.
- Bassett, D.L., and D.W. Fitzsimmons. 1976. Simulating overland flow in border irrigation. *Transactions of the ASAE*, 19: 666-671
- Bautista, E., and W.W. Wallender. 1992. Hydrodynamic model with specified space steps. *J. Irrig. and Drain. Eng.*, ASCE, 118: 450-465.
- Bonilla, C., J. Muñoz, and M. Vauclin. 1999. Opus simulation of water dynamics and nitrate transport in a field plot. *Ecological Modell.* 122: 69-80
- Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9: 177-213.
- Brooks, R.H., and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper 3*. Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Brutsaert, W. 1967. Some methods of calculating unsaturated permeability. *Trans. Am. Soc. Agri. Engin.* 10: 400-404.
- Capilla J.E., J. Rodrigo, and J.J. Gómez. 1998. Worth of secondary data compared to piezometric data for the probabilistic assessment of radionuclide migration. *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 12: 171-190.
- CNA. 2005. Comunicados de prensa 048-050. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- FAO. 1974. Surface irrigation, by L.J. Booher. *Agricultural Development Paper* 95. Rome. 160p.
- García, E. 1970. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía de la UNAM, para la Comisión de Estudios del Territorio Nacional. 235 p.
- Gupta, S.C., and W.E. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Res. Res.* 15: 1633-1635.

- Green, W.H., and C.A. Ampt. 1911. Studies on Soil Physics I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science IV (Part I)*: 1-24.
- Haverkamp, R. and J.Y. Parlange. 1986. Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science* 142: 325-339.
- Kincaid, D.C., D.F. Heermann, and E.G Kruse. 1972. Hydrodynamics of border irrigation. *Transactions of the ASAE*, 15: 674-680.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans. Com. Int. Soc. Soil Sci. 6th Moscow A*: 17-21.
- Halpin, D.W. 1977. CYCLONE: a method for modeling job site processes. *Journal of Construction Division* 103: 489-499.
- Hipel, K.W. 1994. Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering. Kluwer Academic Publishers. Boston MA.
- Lee, D.E. 2005. Probability of project completion using Stochastic Project Scheduling Simulation (SPSS). *Journal of Construction, Engineering & Management* 131: 310-318.
- Lewis, M. R., and W. E. Milne. 1938. Analysis of border irrigation. *Transactions of the ASAE*. 19: 267-272.
- Mc Kay, M.D., J. R. Wendelberger, and J. D. Morrison. 1997. Model uncertainty in stochastic simulation models. Working paper. Los Alamos National Laboratory. Los Álamos, New México.
- Minasny, B., A.B. McBratney, and K.L. Bristow. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma* 93: 225-253.
- Montaldo, H.H., J.F. Keown, L.D van Vleck and C.P van Tassell. 2003. Evaluación económica de estrategias de selección de sementales Holstein para hatos en Italia, México, Holanda y Estados Unidos utilizando simulación estocástica. *Veterinaria México* 34: 179-201.
- Morales, B.E. y M.O. Neváres. 2002. Estimación estocástica de la capturabilidad y el reclutamiento de calamar gigante *Dosidicus gigas* (D'Orbigny, 1835) del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas* 28: 193-204.

- Pachepsky, Y.A., D. Timlin, and G. Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 727-733.
- Parsons, J.E. y R. Muñoz-Carpena. 1999. GLEAMS modeling of nitrate transport and fate in a bananas subtropical agrosystem. Paper of ASAE No. 99-2216. ASAE: St. Joseph.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration (1). The infiltration equation and its solutions. *Soil Sci.* 83: 345-347.
- Rayej, M., and W.W. Wallender. 1985. Furrow irrigation simulation time reduction. *J. Irrig. and Drain. Eng., ASCE*, 111: 134-146.
- Rawls, W.J., and D.L. Brakensiek. 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 Willey and sons Inc.
- Sakkas, J. G., and T. Strelkoff. 1974. Hydrodynamics of surface irrigation-advance phase. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE*, 100: 31-48.
- SAS Institute Inc. 1999. *SAS/STAT User's guide, Version 6, Fourth edition Volume 2*.
- Schaap, M.G., and F.J. Leij. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil Tillage Res.* 47: 37-42.
- Strelkoff, T., and Katopodes, N.D. 1977. Border irrigation hydraulics with zero-inertia. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE*, 103: 325-342.
- Strelkoff, T. 1990. SRFR: A computer program for simulating flow in surface irrigation, furrows-basins and borders. WCL report #17, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.
- USDA, 1974. Border irrigation, *National Engineering Handbook*, Chapter 4, Sect.15. Soil Conservation Service. USDA. Washington D.C.
- Utah State University. 1989. SIRMOD: Surface Irrigation Simulation Software User's Guide. Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389-403.

Walker, W.R. and G.V.Scogerboe. 1987. Surface Irrigation: theory and practice. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 386p.

Wallender, W.W., and M. Rayej, 1990. Shooting method for Saint-Venant equations of furrow irrigation. J. Irrig. and Drain. Eng., ASCE, 116: 114-22.