

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO “

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DEL RIEGO POR MELGAS RECTAS A
ESCALA GLOBAL

POR:

NERI ALBERTO REYES PASTRANA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO

DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Torreón, Coahuila, México.

MARZO 2009.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO "

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DEL RIEGO POR MELGAS RECTAS A
ESCALA GLOBAL

POR:

NERI ALBERTO REYES PASTRANA

TESIS

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

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

ASESOR PRINCIPAL



INTERNO:

M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ


ASESOR PRINCIPAL



EXTERNO:

Ph. D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

ASESOR:



Ph. D. MA. MAGDALENA VILLA CASTORENA

ASESOR:

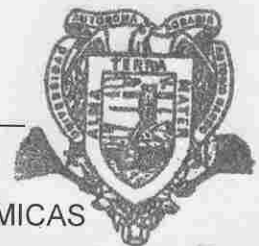


M.C. FEDERICO VEGA SOTELO



M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

MARZO 2009.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO "

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS DEL C. NERI ALERTO REYES PASTRANA QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

PRESIDENTE:



M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

VOCAL:



PH. D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

VOCAL:



M.C. FEDERICO VEGA SOTELO

VOCAL SUPLENTE:

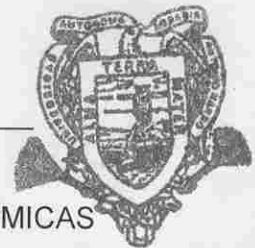


PH. D. VICENTE DE PAÚL ÁLVAREZ REYNA



M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

MARZO 2009.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

El presente trabajo de investigación se realizó en su totalidad en las instalaciones del Centro de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID – RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), de Gómez Palacio, Durango, bajo la dirección y asesoría del Ph. D. Ernesto Alonso Catalán Valencia. Forma parte del proyecto “Desarrollo de un sistema para diseñar eficientemente los sistemas de riego por gravedad de los sistemas producto del estado de Coahuila” financiado por el Fondo Mixto CONACYT-GOBIERNO DEL ESTADO DE COAHUILA (Clave: COAH-2006-C05-61792).

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mis padres Amelia Pastrana y Horacio Reyes por todo el apoyo que me dieron en la largo de mis estudios, ya que ellos me dijeron que la herencia más valiosa que un padre le puede dejar a su hijo es la educación y los valores que son los que crean los cimientos de nuestras vidas

Lo que amamos más profundamente.....es lo que nos forma y nos hace ser como persona(Goethe)

A la memoria de mi “mamu” que ella me enseñó grandes cosas, me enseñó como soñar y lograr que mis sueños se hagan realidad y que nunca deje de soñar por que cuando uno deja de soñar se le termina la vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud y bienestar para permitirme que culmine mis estudios

A mis hermanas Vanessa y Jesica por todos los momentos que hemos pasado juntos ya que ustedes siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas.

A mi tía Lupe por todo su apoyo incondicional que me dió a lo largo de toda mi carrera.

A mis amigos Miguel y Mario por todas las vivencias, los buenos momentos que pasamos y el apoyo que me dieron en todos estos años.

A mi novia victoria por todo este tiempo que ha estado conmigo y todos los momentos que hemos pasado juntos a lo largo de este tiempo.

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. M^a. 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.

A MI ALMA TERRA MATER:

Por brindarme los conocimientos necesarios para formarme como Profesionista. Ser alumna egresada de la UAAAN-UL es un privilegio y una gran satisfacción por eso y más.

Mis más sinceros agradecimientos.

ÌNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE BROOKS Y COREY.....	40
CUADRO 2. MATRICES DE COVARIANZA DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE RETENCIÓN BROOKS Y COREY POR TIPO DE SUELO.	41
CUADRO 3. 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	42
CUADRO 4. 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	43
CUADRO 5. 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	44
CUADRO 6. 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.....	45
CUADRO 7. 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	46
CUADRO 8. 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.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DEL CENID-RASPA.....	32
FIGURA 2. BASE DE DATOS SOILVISION.....	34
FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO	39

RESUMEN

La modelación es una herramienta valiosa para diseñar eficientemente los sistemas de riego por gravedad. Los parámetros que afectan la infiltración del agua en el suelo rara vez se determinan por medición directa por ser una tarea laboriosa e incierta debido a la gran variabilidad espacial y temporal que exhiben tales parámetros. En consecuencia, la infiltración generalmente se describe determinísticamente, asumiendo parámetros promedio para cada tipo de suelo según su textura, aunque se trata de un fenómeno esencialmente aleatorio. Como una alternativa a este enfoque, en este estudio se aplica un esquema estocástico para describir la infiltración y simular el riego por melgas rectas. Con este esquema se logra cuantificar probabilísticamente el nivel de incertidumbre inducido por la variabilidad espacial de la infiltración sobre los índices de desempeño (eficiencia) de los sistemas de riego. Por lo tanto, el diseño de los mismos puede ser, además de eficiente, confiable. El objetivo fue ampliar el ámbito de aplicación del esquema desde una escala regional previamente aplicada, hasta una escala global, a partir del uso de una base de datos de suelos internacional para caracterizar la variabilidad espacial de los parámetros de infiltración. El esquema se aplicó para definir rangos de gastos adecuados para diferentes escenarios (tipo o textura de suelo, longitud, pendiente, lámina de riego) en el sistema de riego por melgas rectas cerradas. Estos gastos predicen niveles de eficiencia de aplicación y uniformidad del riego superiores al 80% con un 95% de confiabilidad.

Palabras Clave: simulación estocástica del riego en melgas rectas, diseño del riego por gravedad, nivel de incertidumbre inducido por la infiltración, eficiencia.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO ESPECIAL	4
DEDICATORIAS	5
AGRADECIMIENTOS	6
ÌNDICE DE CUADROS	7
ÌNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CONTENIDO.....	10
I. INTRODUCCIÓN	12
II. JUSTIFICACIÓN	14
III. ANTECEDENTES	16
IV. OBJETIVOS.....	17
V. HIPÓTESIS.....	17
VI. REVISIÓN DE LITERATURA	18
6.1 DESCRIPCIÓN DEL RIEGO POR GRAVEDAD	18
6.2 EVOLUCIÓN DEL RIEGO POR GRAVEDAD	19
6.3 SIMULACIÓN DEL RIEGO POR GRAVEDAD	20
6.4 DESCRIPCIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES	21
6.4.1 Lámina de riego (L_r).....	21
6.4.2 Pendiente del terreno (S_0)	22
6.4.3 Coeficiente de rugosidad (n).....	22
6.4.4 Parámetros de infiltración	24
6.4.4.1 Estimación indirecta de parámetros de infiltración.....	25
6.4.5 Longitud	27
6.4.6 Gasto o caudal.....	28
6.4.7 Tiempo de riego	28
6.5 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE.....	28
6.5.1 Simulación Monte Carlo.....	29
6.5.2. Generación aleatoria de variables	30
6.5.3. Generación aleatoria de variables correlacionadas	30
6.5.4. Numero de simulaciones	31
VII. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
7.1 UBICACIÓN DEL ESTUDIO	32
7.2 METODOLOGÍA GENERAL	33
7.3 ÁMBITO DE APLICACIÓN	33
7.4 SIMULACIÓN DEL RIEGO.....	35
7.5 DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA.....	35
7.5.1 Caracterización de la variabilidad espacial de la infiltración	36
7.5.2 Programa de cómputo	36
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
8.1 FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RETENCIÓN.....	40

8.2 MATRICES DE COVARIANZA DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE INFILTRACIÓN	41
8.3 RANGOS DE GASTOS ADECUADOS	41
8.3.1 Textura franco arenosa.....	42
8.3.2 Textura franca.....	44
8.3.3 Textura arcillosa	46
8.4 ESCALA GLOBAL VS ESCALA REGIONAL	48
IX. CONCLUSIONES	49
X. LITERATURA CITADA	50

I. INTRODUCCIÓN

México es en su mayoría un país árido o semiárido (en un 56%), el 67% de las lluvias ocurren en los meses de junio a septiembre. El 50% de la superficie la tienen los estados del norte y ahí llueve tan sólo el 25% del total, en contraste, en los estados del sur-sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco) llueve el 49.6%. En todo el país llueven un promedio de 711 mm de agua cada año, los cuales corresponden a un volumen de 1,511 kilómetros cúbicos, el equivalente a una piscina de un kilómetro de profundidad del tamaño del Distrito Federal. El 72% (1,084 km³) de esa agua se evapora.

En México llueve cada vez menos. Desde 1994 a la fecha ha llovido menos del promedio histórico anterior. En la clasificación mundial, México está considerado como un país con disponibilidad baja de agua. Los países más ricos en disponibilidad de agua son Canadá y Brasil.

Actualmente en México se utilizan alrededor de 72 mil millones de metros cúbicos de agua al año, del cual al sector agrícola se le destina el 77%. El 100% del agua utilizada en la agricultura proviene de agua subterránea con un 32% y el 68% restante proviene de agua superficial (CNA, 2004). En la actualidad hay 653 acuíferos subterráneos, 102 proveen el 57% del agua subterránea y son sobre explotados, 17 presentan problemas de intrusión salina por su cercanía con el mar, y 13 muestran problemas de aguas salobres y salinización de suelos (CNA, 2004). 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 que haya una sobre explotación de los acuíferos que se encuentran en estos distritos de riego.

La mayor producción agropecuaria de nuestro país se encuentra en zonas con menor disponibilidad de agua donde también se concentran las zonas de riego. La agricultura de riego se practica en menos del 30% de la superficie total cultivada a nivel nacional, sin embargo, 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 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

En los últimos años, la baja disponibilidad de agua en las presas y la sobreexplotación de los acuíferos, sugiere que se creen nuevas técnicas o métodos para el mejor aprovechamiento del recurso agua. Existen varias estrategias para lograr esto, dentro de las cuales destaca la tecnificación del riego, cuyo propósito es implementar técnicas y métodos más racionales y cuantitativos para diseñar, construir y manejar los sistemas de riego.

En el diseño de los sistemas de riego existen variables que determinan su funcionamiento como son longitud, pendiente, rugosidad, gasto, etc. Estas deben ajustarse mediante un análisis hidráulico para lograr máxima eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, debido a la complejidad de este análisis, el diseño rara vez se realiza o actualiza, ya que los usuarios solo construyen y operan sus sistemas de riego con base en su experiencia, lo que conlleva a los bajos niveles de eficiencia que por lo regular se observan en la mayoría de las zonas de riego del país.

Un mejoramiento a nivel parcelario no solo requiere de nuevas técnicas si no que el usuario aprenda a utilizar estas técnicas. Los avances más significativos se han logrado en el refinamiento de estas técnicas, sin embargo donde realmente son necesarias (a nivel parcelario) en donde se tiene el mayor rezago, esto es debido a la capacitación y entrenamiento de estas técnicas por parte de los usuarios. 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.

La velocidad de infiltración del agua en el suelo es una variable clave en el análisis hidráulico de los sistemas de riego por gravedad. Las propiedades y características físicas del suelo que determinan esta variable varían en tiempo y

espacio, lo cual complica su medición 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.

En este estudio se propone un procedimiento para simular el riego por gravedad de manera estocástica o probabilística. Este tipo de simulación permite 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 la infiltración. Por lo tanto, se pretende desarrollar una herramienta para que el diseño de los sistemas de riego se realice de manera eficiente y confiable.

III. ANTECEDENTES

En una tesis de licenciatura de la UAAAN Unidad Laguna, Sebastian (2006) presentó el esquema de simulación estocástica aquí propuesto. El ámbito de aplicación de este esquema fue regional, ya que la caracterización de la variabilidad espacial de los parámetros de infiltración se realizó utilizando una base de datos de suelos de la Región Lagunera.

En el presente estudio se analiza la posibilidad de ampliar el ámbito de aplicación del esquema de simulación a una escala global. Para esto se utilizó una base de datos internacional con información de suelos de 33 países distintos con México incluido. Por tratarse de mediciones directas de las propiedades hidráulicas de los suelos, se espera una mayor dispersión de los datos en relación con la base de datos regional.

IV. OBJETIVOS

Ampliar a escala global el ámbito de aplicación de un esquema de simulación estocástica del riego por melgas rectas como herramienta para diseñar de manera eficiente y confiable los sistemas de riego.

V. 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, a escala global, el efecto de la variabilidad espacial de dicho proceso sobre la eficiencia de riego.

VI. REVISIÓN DE LITERATURA

6.1 Descripción del riego por gravedad

El riego por gravedad comprende los métodos de riego en los cuales la conducción del agua, desde el sistema de distribución (canales ó tuberías) hasta cualquier punto de la parcela, se realiza directamente sobre la superficie del suelo. Todos estos métodos de riego tienen en común que la energía necesaria para el movimiento del agua se logra por la utilización de la diferencia de altura del terreno, por lo cual se llaman por gravedad. El agua se aplica al terreno en la zona más alta y desde allí fluye hacia las más bajas, disminuyendo el flujo a medida que se infiltra en el suelo.

El riego por gravedad se ha utilizado desde épocas remotas por el hombre, y actualmente, a pesar de los avances tecnológicos, ocupa la mayor superficie regada en muchos lugares de la tierra. Como característica distintiva del riego por gravedad se requiere que el terreno presente superficie uniforme y pendientes suaves, a fin de obtener una adecuada y homogénea distribución del agua, así como evitar escurrimiento excesivo y erosión del suelo (FAO, 1974).

En un evento de riego por gravedad se distinguen cuatro fases:

- a) Avance: esta fase consiste en la aplicación de agua a una superficie y el avance del frente de la corriente hasta que ésta alcanza el extremo final de la superficie regada.
- b) Almacenamiento: fase que inicia cuando el frente de agua alcanza el extremo final de la superficie de riego y concluye cuando se suspende la aplicación del riego.

c) Consumo: esta fase 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).

6.2 Evolución del riego por gravedad

El riego por gravedad es la técnica de riego más antigua y que más ampliamente ha aplicado el hombre a nivel mundial. Para superar las limitaciones que tradicionalmente ha tenido esta técnica de riego como son pérdidas de agua por percolación profunda y escurrimiento superficial y situarla al nivel de otras técnicas de riego de elevado desarrollo tecnológico (riego por aspersión y localizado), se deben mejorar al máximo posible el diseño y la operación de los sistemas de riego (FAO, 1974).

La tecnificación del riego por gravedad se ha enfocado en gran medida a la modelación matemática para evaluar y mejorar el funcionamiento hidráulico de los sistemas de riego. Mediante la construcción de modelos es posible analizar diferentes condiciones de operación como la selección del gasto y el tiempo de riego que garanticen mayor uniformidad y eficiencia de aplicación del agua (FAO, 1974).

6.3 Simulación del riego por gravedad

El funcionamiento hidráulico del riego por gravedad depende de algunas variables como: velocidad de infiltración del agua en el suelo, tipo de flujo, tamaño de la unidad de riego, pendiente del terreno, forma de las unidades de riego, y rugosidad de la superficie del suelo. Otras variables son definidas por el proyectista como: tiempo de riego, longitud de surco, espaciamiento entre surcos, gasto o caudal y lámina aplicada. Para lograr un buen diseño de riego se deben considerar estas variables y sus interacciones (GARCÍA, E. 1970) con la finalidad de optimizar los parámetros antes mencionados y economizar tiempo y dinero.

ELLIOTT et al. (1983) sugieren el uso de la simulación para describir el comportamiento hidráulico de las fases del riego por gravedad. Para tal efecto, la modelación matemática del riego por superficie como un proceso hidráulico de escurrimiento sobre un medio poroso se ha simulado por modelos con un amplio grado de complejidad y precisión (BASSETT, 1972; STRELKOFF Y KATOPODES, 1977; RAYEJ Y WALLENDER, 1985; STRELKOFF, 1990; WALLENDER Y RAYEJ, 1990)

Los modelos anteriores simulan el avance del agua y la recesión de la misma a lo largo de la superficie de riego. Predicen los volúmenes de agua infiltrado, escurrido o percolado, así como los índices de eficiencia que califican el desempeño del sistema de riego. Los modelos más comunes en orden creciente de complejidad son: balance volumétrico, onda cinemática, cero inercia e hidrodinámico. Los modelos: hidrodinámico, cero inercia y onda cinemática se basan en la solución numérica de ecuaciones diferenciales de

conservación de masa y energía, y por ser más completos, predicen mejor el proceso de riego por superficie (BAUTISTA Y WALLENDER, 1992).

Dos de los modelos más completos son el modelo "SIRMOD" (UTAH STATE UNIVERSITY, 1989), y del modelo "SRFR" (STRELKOFF, 1990).

6.4 Descripción y estimación de parámetros y variables

A continuación se describen los parámetros y variables consideradas en la simulación del riego por gravedad.

6.4.1 Lámina de riego (Lr)

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):

$$Lr = ADT(FAM)Pr \quad (1)$$

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.

6.4.2 Pendiente del terreno (S_0)

Se puede definir la pendiente del terreno en un punto dado como el ángulo que forma el plano horizontal con el plano tangente a la superficie del terreno en ese punto. Es en definitiva, la inclinación o desnivel del suelo. En lugar de expresarla como un ángulo, es más práctico representar la pendiente del terreno en porcentaje. Esto se obtiene multiplicando por 100 la tangente del ángulo que define el desnivel del suelo. La dirección de máxima pendiente es aquella que seguiría una gota de agua al deslizarse sobre el terreno.

La pendiente afecta el 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.

6.4.3 Coeficiente de rugosidad (n)

Expresa el efecto de retarda miento que sobre el flujo de agua ejercen los granos del material que forman el perímetro mojado. Su valor depende del tamaño y forma de dichos granos ya que en general, los granos finos resultan en un valor relativamente bajo de n y los granos gruesos dan lugar a un valor alto. El valor de n es muy variable y depende de una cantidad de factores.

No hay un método exacto para estimar un valor de n . Para ingenieros veteranos, esto significa el ejercicio de un profundo juicio de ingeniería y experiencia; para novatos, puede ser no más de una adivinanza, y diferentes individuos obtendrán resultados diferentes.

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 , Normalmente se utiliza la ecuación de Manning para estimar S_f :

$$S_f = \frac{q \frac{n}{C_d}}{\frac{10}{y^3}} \quad (2)$$

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, 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 aproximados para diferentes condiciones de 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 la velocidad del flujo de agua, 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 (V_{max}) que fluctúa entre 8 y 13 m/min, dependiendo de la estabilidad del suelo. El gasto

máximo (q_{\max}) según la ecuación de Manning para el caso del riego por melgas con sección hidráulica rectangular se estima como:

$$q_{\max} = V_{\max}^{1.67} \frac{n}{60 S_0^{0.5}} \quad (3)$$

Donde V_{\max} y q_{\max} se expresan en m s^{-1} y $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivamente.

6.4.4 Parámetros de infiltración

La infiltración es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo. Es un proceso de gran importancia económica, vista por el ingeniero como un proceso de pérdida y por el agricultor como una ganancia. Del agua infiltrada se proveen casi todas las plantas terrestres y muchos animales; alimenta al agua subterránea y a la vez a la mayoría de las corrientes en el período de estiaje; reduce las inundaciones y la erosión del suelo. 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.

En el proceso de infiltración se pueden distinguir tres fases:

a) *Intercambio*. Se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.

b) *Transmisión*. Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.

c) *Circulación*. Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo. Consecuentemente, afecta también al avance, recesión y uniformidad del riego.

Se han desarrollado varios 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).

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), la cual considera "familias de funciones de infiltración". Cada familia se representa por valores típicos de los parámetros 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.

6.4.4.1 Estimación indirecta de parámetros de infiltración

Uno de los procedimientos alternativos para modelar la infiltración es mediante el uso de ecuaciones físicas donde los 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):

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

donde φ = porosidad total del suelo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_r = contenido de humedad residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), 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}):

$$\varphi = 1 - \frac{d_a}{d_r} \quad (5)$$

A partir de los parámetros de la función de retención pueden estimarse los parámetros de funciones de infiltración físicamente fundamentadas como la de PHILLIP (1957):

$$I = St^{1/2} + At \quad (6)$$

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) es un parámetro que describe los efectos gravitacionales, prevalecientes al final de dicho fenómeno.

PHILLIP (1969) propuso la siguiente expresión para estimar la sorbilidad:

$$S = \sqrt{-2 K_s h_f (\theta_s - \theta_0)} \quad (7)$$

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), θ_s = contenido de humedad del suelo a saturación ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) 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.

El valor de h_f puede estimarse como (RAWLS, W.J., AND D.L. BRAKENSIEK. 1982):

$$h_f = \frac{2\lambda + 3}{2\lambda + 2} \left(\frac{h_b}{2} \right) \quad (8)$$

Por su parte, A puede estimarse como:

$$A = \frac{2}{3} K_s \quad (9)$$

6.4.5 Longitud

La longitud es una variable que determina la distancia que tiene que recorrer el flujo de agua sobre la superficie del terreno. Dependiendo de otras variables como la pendiente, lamina de riego, rugosidad, entre otras, existe una longitud óptima que maximiza la uniformidad del riego y minimiza las pérdidas de agua. Una longitud demasiado grande retarda el avance del agua, lo cual deriva una aplicación excesiva y no uniforme del riego. Por el contrario, una longitud pequeña incrementa los costos de producción debido a la reducción de la superficie de cultivo y al mayor número de vueltas de la maquinaria causados por el aumento en el número de canales, drenes y caminos de acceso.

6.4.6 Gasto o caudal

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

6.4.7 Tiempo de riego

Es el periodo de tiempo durante el cual se aplica el gasto a cada unidad de riego. Se estima con base en el gasto y el volumen de agua por aplicar, el cual a su vez depende de la lámina y superficie de riego. 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 percolación profunda que reducen la eficiencia del riego.

6.5 Análisis de incertidumbre

Es una técnica utilizada para estimar el nivel de incertidumbre causado por la propagación de los errores en 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).

En el presente estudio se analiza la última fuente de error antes mencionada. Se trata de cuantificar el 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 cuantificación del riesgo se realiza con base a probabilidad, para lo cual se requiere caracterizar la variabilidad de parámetros a partir de sus funciones de distribución probabilísticas. Un método común para realizar este análisis es la simulación Monte Carlo.

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

6.5.2. 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:

$$x = \mu + \sigma r \quad (10)$$

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):

$$r = \left[\sqrt{-2 \ln(\text{rnd}_1)} \cos[2\pi(\text{rnd}_2)] \right] \quad (11)$$

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

6.5.3. Generación aleatoria de variables correlacionadas

Es importante que se consideren 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 , luego se calcula la media y la desviación estándar de la variable y , ambas condicionadas dado el valor de x :

$$E(Y | X) = \mu_Y + \rho \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (X - \mu_X) \quad (12)$$

$$\sigma(Y | X) = \sigma_Y \sqrt{1 - \rho^2} \quad (13)$$

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 , utilizando su media y varianza condicionadas. Para generar más de dos variables aleatorias correlacionadas se debe determinar primero la matriz de covarianza.

6.5.4. 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%):

$$n = \frac{t^2 S_x^2}{e} \quad (14)$$

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 ($n=30$, $t=1.96$).

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Ubicación del estudio

El estudio se realizó en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP, el 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).

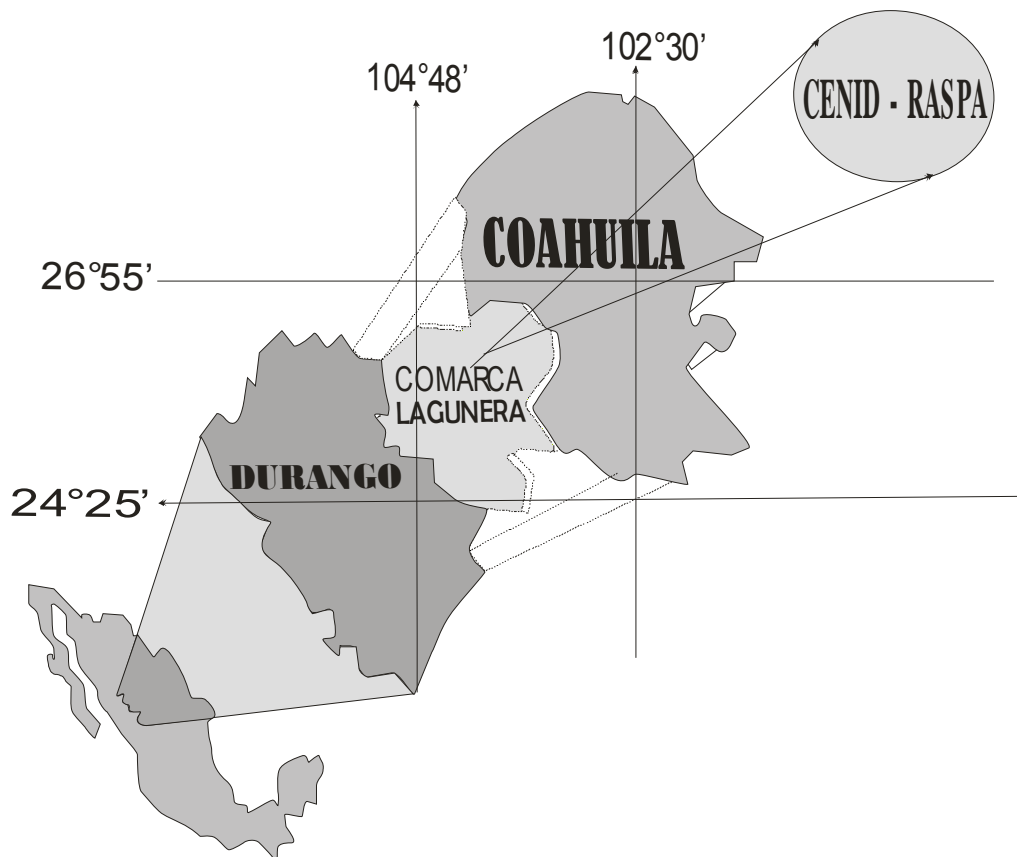


Figura 1. Localización del CENID-RASPA

7.2 Metodología general

La metodología a seguir se basa en la aplicación de dos técnicas para desarrollar el esquema de simulación estocástica: (1) La simulación como una herramienta para diseñar el riego por gravedad, partiendo del nivel de eficiencia predicho por un modelo en función de las variables y parámetros que determinan el funcionamiento del sistema y (2) El análisis de incertidumbre con el método Monte Carlo para cuantificar probabilísticamente el riesgo inducido por la variabilidad espacial de los parámetros de la función de infiltración sobre el diseño y la eficiencia del sistema de riego

7.3 Ámbito de aplicación

La aplicación del esquema de simulación estocástica propuesto en el presente trabajo se puede aplicar en diversas escalas como pueden ser a nivel de finca, módulo de riego, distrito de riego o región. Sólo se debe caracterizar la variabilidad de los parámetros de infiltración en la escala espacial correspondiente.

Como se mencionó en el capítulo de antecedentes. En este estudio se planteó la posibilidad de aumentar el ámbito de aplicación del esquema a escala global, ya que en un estudio previo se hizo a nivel regional. En dicho estudio se aplicó una función PTF ("PEDOTRANSFER FUNCTION": RAWLS Y BRAKENSIEK, 1982) 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.

Para ampliar el ámbito de aplicación a escala global se adquirió el sistema SOILVISION (A Knowledge-Based Database System For Saturated/Unsaturated Soil Properties), del cual se extrajo una base de datos

de 6,000 suelos de 33 países distintos (México incluido) con los parámetros de las propiedades hidráulicas medidas directamente en campo o en laboratorios de diversas instituciones como centros de investigación y universidades (Figura 2).

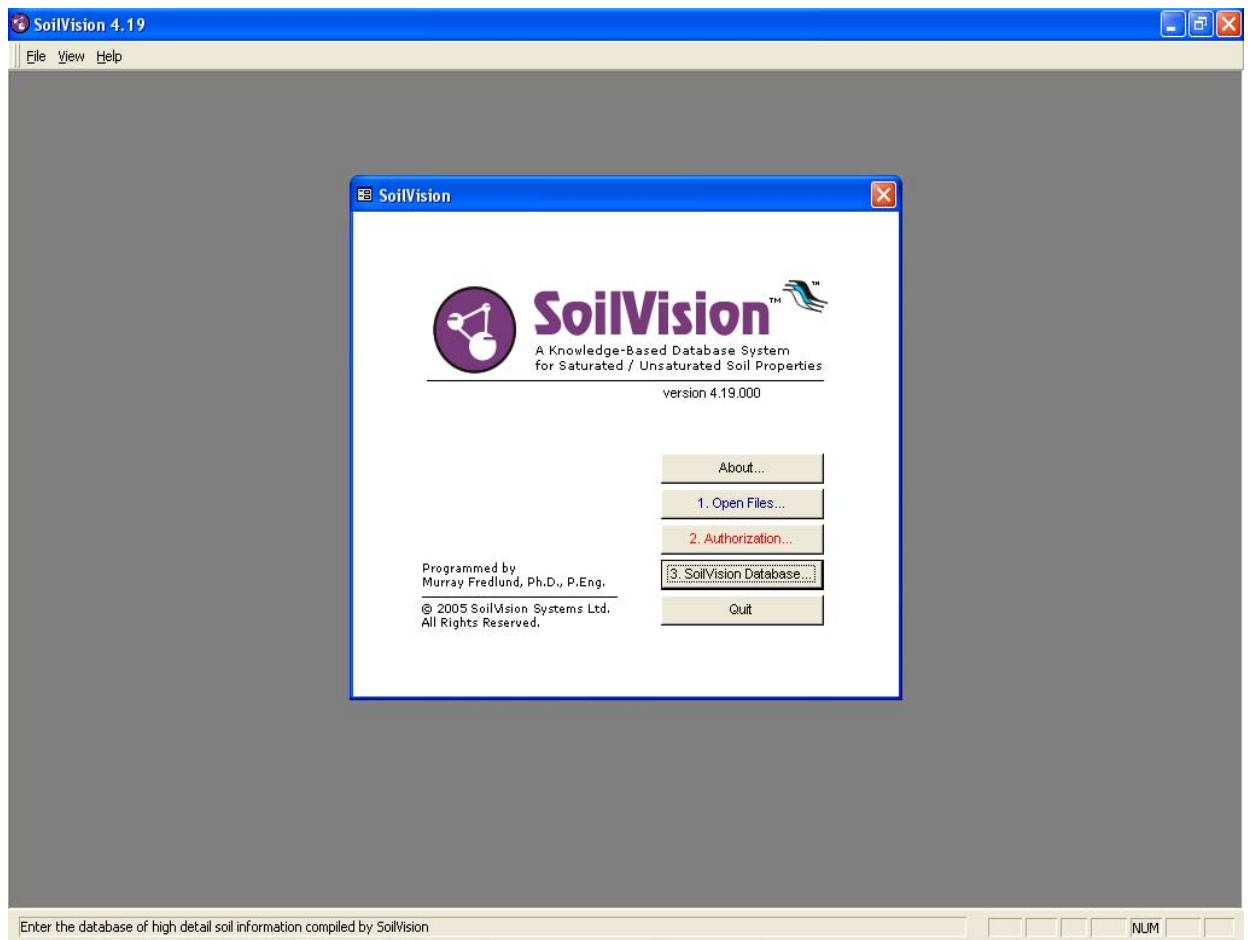


FIGURA 2. Base de datos SOILVISION

Se espera, a diferencia de los parámetros estimados, que los parámetros medidos exhiban mayor variabilidad o dispersión dentro de cada tipo de suelo, por lo cual se evaluará el impacto de dicha variación sobre los índices de eficiencia y uniformidad simulados por el modelo SRFR.

7.4 Simulación del riego

Se utilizó el modelo SRFR, uno de los más completos, debido a que permite la ejecución de corridas múltiples por lotes. Las variables y parámetros requeridos para alimentar la simulación 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 que son arrojadas son la eficiencia de aplicación (E_a) y coeficiente de uniformidad (C_u), ambos expresados en por ciento:

$$E_a = 100 \frac{Lr L}{0.06 q t_r} \quad (15)$$

$$C_u = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |z_i - z_{med}|}{N} \right) \quad (16)$$

donde Lr = lámina de riego (m), L = longitud (m), q = gasto unitario ($\text{l s}^{-1} \text{m}^{-1}$) y t_r = tiempo de riego (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.

7.5 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.

7.5.1 Caracterización de la variabilidad espacial de la infiltración

Para realizar la simulación estocástica del riego por melgas se caracterizó, de manera indirecta, la variabilidad de los parámetros de infiltración en los suelos de la región lagunera. Primeramente se obtuvieron las funciones de distribución de los parámetros de la ecuación de retención de Brooks y Corey (Ec. 4) para cada tipo de suelo según su textura. El ajuste a las funciones se realizó con el paquete SOIL VISION. A partir de la generación aleatoria de los parámetros de la función de retención se estimaron, para cada escenario simulado, los parámetros de la función de infiltración de Phillip (Ec. 6)

7.5.2 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 el 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 SRF_R 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 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 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. (3). La Figura 3 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.

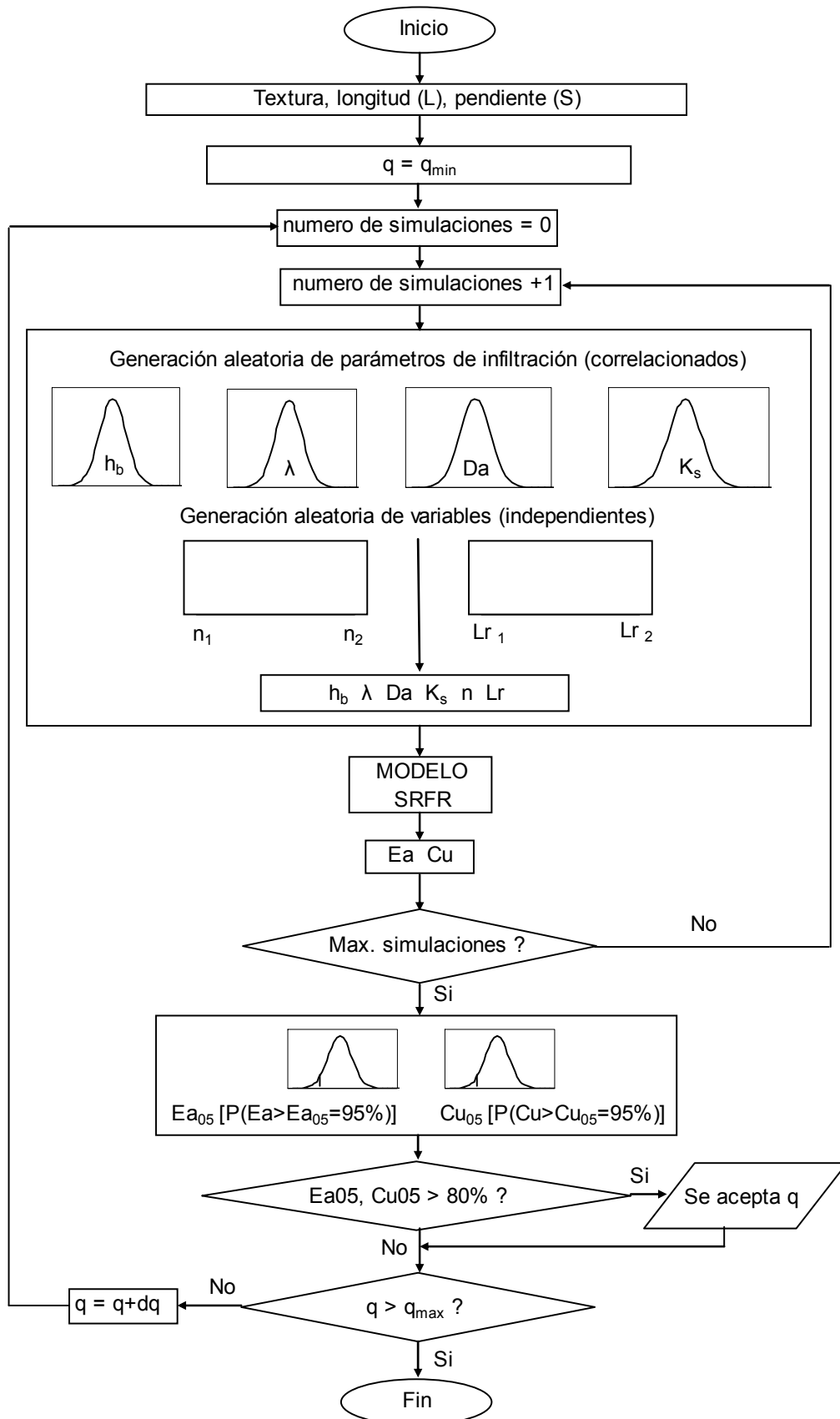


Figura 3. Diagrama de flujo del programa de cómputo

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Funciones de distribución de parámetros de retención

En el Cuadro 1 se muestran las funciones de distribución de los parámetros de la función de retención de Brooks y Corey (Ec. 4) para cada tipo de suelo o textura. Estos son: la presión por entrada de aire “bubbling pressure” (h_b) y el índice de la distribución de los poros del suelo por tamaño (λ). También se consideraron la densidad aparente (D_a) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s). 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 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 la ecuación de Brooks y Corey.

Textura	h_b (KPa)	λ	D_a (Kg m ⁻³)	K_s (cm)
Arenoso	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 arenoso	0.3515(0.5385)	-1.6091(0.6156)	1420.78(135.37)	-11.6196(0.6342)
Franco	0.9035(0.7857)	-1.6853(0.3328)	1412.47(119.14)	-12.8606(0.5740)
Franco limoso	1.0648(0.6644)	-1.5401(0.3411)	1331.77(118.51)	-12.5594(0.8754)
Limoso	2.0488(0.4038)	-1.0722(0.5115)	1480.88(50.55)	-15.0824(0.2282)
Franco arcillo arenoso	1.0876(0.5500)	-1.5721(0.3513)	1573.76(69.22)	-12.9837(0.7072)
Franco arcilloso	1.4745(0.7141)	-1.7374(0.3779)	1394.33(98.96)	-14.6116(0.5724)
Franco arcillo limoso	1.2539(0.5916)	-1.9639(0.3599)	1404.28(85.88)	-14.5614(0.6656)
Arcillo arenoso	1.4420(0.4676)	-2.0563(0.3855)	1503.38(69.36)	-14.9584(0.1126)
Arcillo limoso	1.3160(0.6424)	-2.2083(0.4131)	1348.52(84.17)	-14.4171(0.3331)
Arcilloso	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

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

En el Cuadro 2 se muestran las matrices de covarianza de los parámetros de la función de retención de Brooks y Corey, los cuales se obtuvieron al aplicar el análisis de covarianza entre los valores de dichos parámetros agrupados por textura. Solamente se presentan las tres texturas utilizadas para ejemplificar la aplicación del procedimiento motivo de este estudio.

Cuadro 2. Matrices de covarianza de los parámetros de la función de retención Brooks y Corey por tipo de suelo.

	hb (KPa)	λ	Da (Kg m ⁻³)	Ks (cm)
Suelo franco arenoso				
hb (KPa)	2.9710	0.6219	23.3798	-2.1331
λ	0.6219	0.5180	2.5512	0.2836
Da (Kg m ⁻³)	23.3798	2.5512	80699.9893	37.5109
Ks (cm)	-2.1331	0.2836	37.5109	15.2927
Suelo franco				
hb (KPa)	6.0479	0.8927	-18.7420	0.4625
λ	0.8927	0.3450	-35.2434	-0.1229
Da (Kg m ⁻³)	-18.7420	-35.2434	62418.1510	-246.6801
Ks (cm)	0.4625	-0.1229	-246.6801	8.5598
Suelo arcilloso				
hb (KPa)	4.8021	0.7124	77.9280	-0.2829
λ	0.7124	0.4564	-22.0820	0.1135
Da (Kg m ⁻³)	77.9280	-22.0820	42117.4173	-164.4903
Ks (cm)	-0.2829	0.1135	-164.4903	0.4921

8.3 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 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).

8.3.1 Textura franco arenosa

En los Cuadros 3 y 4 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 3). El límite inferior de los rangos aumenta a razón de $2.0 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 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. 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 3. 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	350
	Gastos unitarios ($\text{l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$)						
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 3), 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 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.

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 4). Esto se manifiesta en rangos de gastos más estrechos, ya que se requieren un mínimo de $6.5 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 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 4. 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)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	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							

8.3.2 Textura franca

Los Cuadros 5 y 6 muestran rangos de gastos adecuados para los riegos de presiembra y auxilio, respectivamente, en suelos con textura franca. En el Cuadro 5 que pertenece al riego de presiembra, se puede observar que los 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 l s⁻¹ 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 5. 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)	Longitud (m)						
	50	100	150	200	250	300	350
	Gastos unitarios (l s ⁻¹ 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 6 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 6. 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

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							

8.3.3 Textura arcillosa

En los Cuadros 7 y 8 se presentan los 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 7). 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 7. 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 (l s ⁻¹ 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 8 muestra los rangos de gastos eficientes para el riego de auxilio en suelos arcillosos. Como en las otras texturas, la aplicación de láminas de riego menores en relación al riego de presiembra impacta de manera considerable a 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 l s⁻¹ m⁻¹ entre los 50 y 200 m de longitud, y a partir de los 200 m no se detectaron gastos adecuados.

Cuadro 8. 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 (l s ⁻¹ 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							

8.4 Escala global vs escala regional

El esquema de simulación estocástica para describir el riego por melgas rectas presentado refleja la variabilidad espacial, a escala global, de las propiedades hidráulicas de los suelos que determinan la velocidad de infiltración. 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 (SEBASTIAN, 2006). 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.

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. Lo relevante es que el ámbito de aplicación del esquema es a nivel global.

IX. CONCLUSIONES

Se logró ampliar el ámbito de aplicación del esquema de simulación estocástica del riego por melgas rectas a escala global.

Como se esperaba, los parámetros de infiltración medidos a escala global presentaron mayor dispersión con relación a los mismos estimados a escala regional. No obstante, se lograron definir rangos de gastos adecuados para diversos escenarios.

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 espacial de dicho proceso sobre los índices de eficiencia predichos y el diseño de los sistemas de riego.

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

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, puede adaptarse para otros sistemas de riego por gravedad.

X. LITERATURA CITADA

- Bassett, D.L. 1972. Mathematical model of water advance in border irrigation. Transactions of the ASAE, 15: 992-995.
- Bautista, E., and W.W. Wallender. 1992. Hydrodynamic model with specified space steps. J. Irrig. and Drain. Eng., ASCE, 118: 450-465.
- Brooks, R.H., and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- CNA. 2004. 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 Koppen (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration (1). The infiltration equation and its solutions. Soil Sci. 83: 345-347.
- Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. Adv. Hydrosci. 5: 215–296.
- 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.
- Sebastian, M. 2006. Simulación estocástica del riego por gravedad, UAAAN-UL, Torreón, Coahuila, Mexico. 1-41p
- 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.
- 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.