

# Simulación del manejo del riego superficial bajo condiciones limitadas de agua

Juan Enciso

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Darrel Martin

Universidad de Nebraska, EUA

*La distribución uniforme del agua en un terreno regado con un sistema superficial dependerá, en buena medida, de la forma en que este sea manejado, principalmente, cuando el suministro del recurso es limitado. Con el fin de escoger las estrategias de riego que garanticen un alto grado de uniformidad en estas condiciones, se utilizó un modelo combinado de simulación que consiste en un modelo de infiltración, un modelo hidráulico de riego por superficie y un modelo de cultivo (CERES-MAIZE), con la intención de predecir el rendimiento promedio en un campo de maíz (zea mays). Para simular los cambios de infiltración debido al contenido de agua y a los agrietamientos de suelo, se desarrolló un modelo de infiltración en dos dimensiones. El modelo se probó con un caso de estudio de la parte oeste de Estados Unidos de América, que presenta un suelo areno-arcilloso. El modelo fue usado para desarrollar funciones de producción, que resultaron de simular diferentes estrategias de manejo del riego, bajo condiciones limitadas de agua.*

**Palabras clave:** riego superficial, escasez de agua, uniformidad de distribución, modelo combinado de simulación, rendimiento promedio, maíz.

## Introducción

El riego por surcos se utiliza en varias regiones del mundo, incluso en donde el agua es escasa, como en los distritos de riego cuyos canales no surten los volúmenes demandados o donde los acuíferos se están agotando. Por ello, además de los altos costos de la energía y su baja disponibilidad, los agricultores se han visto obligados a desarrollar estrategias de ahorro y conservación. En la actualidad se cuenta con programas nacionales para elevar la eficiencia del riego y la productividad, por medio de paquetes o recetas de riego en las que se indican sus láminas y número. Estas recomendaciones generales se podrían aplicar, para cada cultivo y tipo de suelo, mediante la simulación por computadora y por pruebas de campo.

El reto de simular el riego superficial bajo condiciones de escasez de agua, radica en la distribución no uniforme del agua de riego a lo largo y ancho del terreno durante el mismo riego, y de un riego para otro. Los objetivos de este trabajo son:

- Desarrollar un modelo de simulación del riego para un sistema de riego por surcos, manejado bajo condiciones de escasez de agua.
- Utilizar un modelo para simular un caso de estudio.

## Procedimiento

El desempeño de un sistema de riego por surcos, durante una temporada de cultivo, se simuló mediante la combinación de un modelo de infiltración de Green y Ampt en dos dimensiones (Enciso, 1992), con el modelo de riego por superficie de Rayej y Wallender (1987), y el modelo de cultivo CERES-MAIZE para predecir el contenido de agua del suelo durante la temporada del cultivo (ilustración 1). El modelo de infiltración seleccionado fue el de Fok (1984), modificado para considerar infiltración en grietas, y en suelos agrícolas estratificados, que consisten en una costra superficial (<5mm), la capa arable, y el subsuelo. La ecuación general de infiltración es:

$$D_{VOL} = \left[ 2Yx + Wz + \left( \frac{\pi}{2} \right) xz \right] b\Delta\theta + \left( \text{infiltración a través de agrietamientos} \right) \quad (1)$$

donde:

- $D_{VOL}$  = Volumen infiltrado acumulado ( $L^3$ )
- $Y$  = Tirante promedio del surco ( $L$ )
- $W$  = Ancho del surco ( $L$ )
- $b$  = Unidad de longitud del surco ( $L$ )
- $z$  = Profundidad de humedecimiento por debajo de la superficie del suelo, ( $L$ )
- $x$  = Humedecimiento lateral ( $L$ )
- $\theta$  = Contenido volumétrico de agua ( $L^3/L^3$ ).
- $\Delta\theta$  = Diferencia entre contenido de agua a saturación,  $\theta_s$ , e inicial,  $\theta_i$ , ( $L^3/L^3$ ).

En este estudio se incorporó el efecto de encostramiento superficial, de agrietamiento en la ecuación de la profundidad de humedecimiento  $z$  y en el humedecimiento lateral  $x$ . La ecuación desarrollada en este estudio puede aceptar la conductividad temporal de la costra superficial y la consolidación gradual de la capa arable. Una derivación más detallada y una verificación de la ecuación puede ser consultada en Enciso (1992). La lámina infiltrada acumulada,  $D$ , fue calculada con la siguiente fórmula:

cuando:  $z \leq (z_c + z_i)$

$$\frac{dD}{dt} = \left( \frac{B + z_c + h_b - Sav}{\frac{z_c}{K_c} + \frac{B}{K_i}} \right) \quad \text{donde: } B = \frac{D - z_c \Delta\theta_c}{\Delta\theta_i}$$

cuando:  $z > (z_c + z_i)$  (2)

$$\frac{dD}{dt} = \left( \frac{C + z_c + z_i + h_b - Sav}{\frac{z_c}{K_c} + \frac{z_i}{K_i} + \frac{C}{K_{su}}} \right) \quad \text{donde: } C = \frac{D - z_c \Delta\theta_c - z_i \Delta\theta_i}{\Delta\theta_{su}}$$

donde:

- $z_c$  = Profundidad de la costra superficial ( $L$ )
- $z_i$  = Profundidad de la capa arable ( $L$ )
- $K_c$  = Conductividad hidráulica saturada de la superficie del suelo ( $L/T$ )
- $K_i$  = Conductividad hidráulica saturada de la capa arable ( $L/T$ )
- $K_{su}$  = Conductividad hidráulica saturada del subsuelo ( $L/T$ )
- $\Delta\theta_i$  = Diferencia entre el contenido de agua a saturación del subsuelo,  $\theta_s$ , y el inicial,  $\theta_i$ , de la capa arable ( $L^3/L^3$ )

$\Delta\theta_{su}$  = Diferencia entre el contenido de agua a saturación del subsuelo,  $\theta_s$ , y el inicial,  $\theta_i$ , del subsuelo ( $L^3/L^3$ )

La relación entre la lámina infiltrada acumulada  $D$  y la profundidad de humedecimiento  $z$  para la capa arable y subsuelo puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$D = z_c \Delta\theta_c + (z - z_c) \Delta\theta_i \quad \text{por } z_c \leq z \leq (z_i + z_c) \quad (3)$$

$$D = z_c \Delta\theta_c + z_i \Delta\theta_i + (z - z_c - z_i) \Delta\theta_{su} \quad \text{por } z > (z_c + z_i)$$

La profundidad de humedecimiento  $z$  fue determinada de la lámina infiltrada acumulada (ecuación 3).

El humedecimiento lateral fue obtenido con la siguiente fórmula:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{h_b - Sav}{\left( \frac{z_c}{K_c} + \frac{x - x_c}{K_i} \right) \Delta\theta} \quad (4)$$

donde:

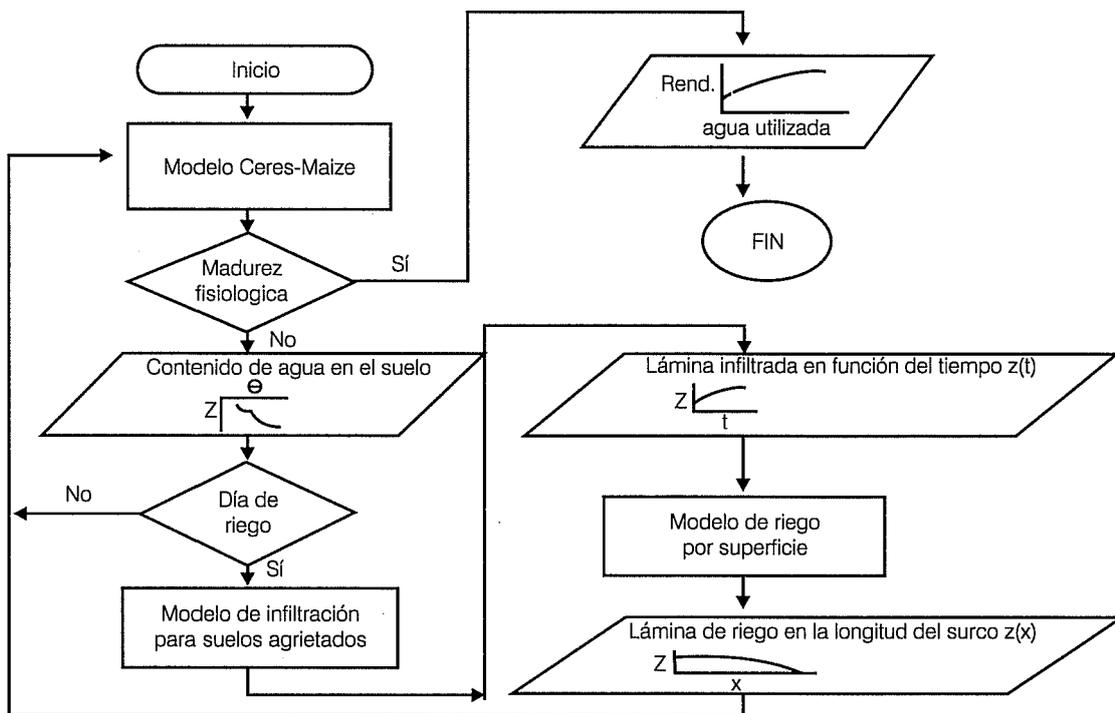
- $h_b$  = Tirante de agua ( $L$ )
- $Sav$  = Succión promedio del frente de humedad ( $Sav \leq 0$ ), ( $L$ )
- $dx$  = Longitud diferencial  $x$  ( $L$ )
- $dt$  = Tiempo de flujo diferencial ( $T$ )

La profundidad de humedecimiento y el humedecimiento lateral fue calculado con el método de Runge-Kutta. Las ecuaciones 2 y 4 pueden considerar características transitorias de la costra superficial y de la capa arable, tales como el sellado superficial, y la consolidación y subsidencia de la capa arable.

El sellado superficial se forma por el arrastre y deposición de sedimento en el fondo del surco. La consolidación y subsidencia de la capa arable son los asentamientos y cambios de densidad aparente causados por el peso del agua, y la tensión superficial sobre un suelo recién barbechado, que a su vez afectan la conductividad hidráulica saturada del suelo. La infiltración en las grietas fue simulada con la ecuación 4.

La infiltración en las paredes de las grietas fue determinada en incrementos de 2 cm para contabilizar diferencias en presión hidrostática. La infiltración en varias grietas fue estimada como la suma del volumen infiltrado en todas las grietas. Se asumió que la infiltración a través de las grietas termina, una vez que se junta el frente de humedad de grietas adyacentes. Después de esto, se asume que la infiltración a través de las grietas es vertical (Enciso, 1992).

1. Diagrama de flujo de un sistema de infiltración, riego y cultivo (CERES-MAIZE)



La simulación comienza con el modelo CERES-MAIZE (ilustración 1). El contenido de agua y el coeficiente de expansión lineal del suelo, fueron usados para simular el proceso de agrietamiento (Enciso, 1992).

Con base en un análisis de sensibilidad, se seleccionaron los valores que representaban el tamaño y la densidad de las grietas a lo largo del surco. El análisis de sensibilidad mostró que la infiltración no fue sensible a estos valores, por lo que se consideraron constantes durante la temporada de riego. Los parámetros que se utilizaron para simular el agrietamiento son: la profundidad de las grietas y el número de grietas por metro de longitud, cuya magnitud y número dependen del contenido de agua en el suelo.

El contenido de agua del suelo y el tamaño de las grietas, se usaron como datos de entrada en el modelo de infiltración, para predecir la lámina infiltrada como una función del tiempo. Debido a que el modelo de infiltración nos proporciona las láminas infiltradas a diferentes tiempos, fue necesario ajustar estos datos a la función de Kostiakov con el fin de ser manejados más fácilmente.

Los parámetros de Kostiakov son usados en el modelo de riego superficial de Rayej y Wallender (1987), para calcular la velocidad de avance del agua y la distribución de la infiltración a lo largo del surco. La longitud del surco se dividió en diez secciones. El mode-

lo CERES-MAIZE, se utilizó para simular la distribución de las láminas de agua en el perfil del suelo de cada sección del surco.

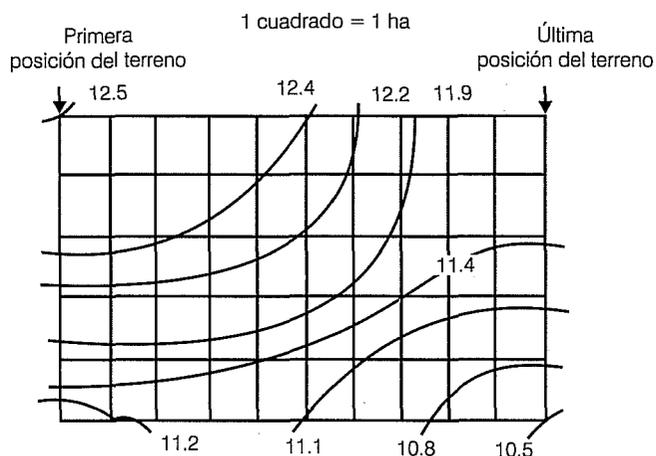
Si un riego adicional no es programado, el modelo CERES-MAIZE pronostica el rendimiento final de cada sección. Si un riego adicional está programado, la distribución no uniforme del agua del primer riego, se refleja en la distribución del contenido de agua del suelo. La variación en el contenido de agua provoca agrietamientos diferenciales a lo largo del surco, los cuales son considerados en el modelo de infiltración.

Los parámetros de las funciones de infiltración de cada subsección del surco, se utilizaron como datos de entrada en el modelo de riego superficial, para calcular la distribución de las láminas de riego. El sistema de modelos fue usado para simular el desempeño de un conjunto de surcos del sistema de riego. El proceso de simulación finaliza cuando el cultivo alcanza su madurez fisiológica. En la figura 2 se muestra la distribución de las isóneas de los rendimientos obtenidos al final de la temporada, como resultado de la simulación.

**Simulación experimental**

El objetivo de este trabajo fue el de simular el desempeño de varias estrategias de riego por surcos en con-

## 2. Isolíneas de rendimiento en $t\ ha^{-1}$



diciones de escasez en el suministro de agua. Las estrategias fueron:

- Retardar el primer riego de la temporada.
- Reducir el número de riegos.
- Aminorar los volúmenes de escurrimiento del terreno considerando un sistema de reúso y ajustando el gasto para avanzar el agua a diferentes distancias a lo largo del surco, lo cual se logró fijando un tiempo de corte de 12 horas.

Las estrategias fueron evaluadas con una función de producción en la que se relacionan los rendimientos con los volúmenes aplicados.

Retardar el primer riego de la temporada presenta la ventaja de que el suelo se recarga con la lluvia, la que se aprovecha para activar el crecimiento radicular y satisfacer los requerimientos de riego de los cultivos, de tal manera que el estrés hídrico no afecta severamente el rendimiento. Si estos volúmenes no fueran capturados por el suelo, se perderían por percolación profunda o por escurrimiento.

Alternativamente, al retardar el primer riego el contenido de agua del suelo se puede agotar, con el consecuente agrietamiento y aumento en la infiltración, lo que a su vez repercutirá en una distribución no uniforme del riego. Para evaluar este efecto, se simuló comenzar el primer riego de la temporada en los días: 180, 190, 195, 200, 205, 210 y 215.

Reducir el número de riegos por temporada puede tener el efecto de minimizar las pérdidas por evaporación o por percolación profunda, y ofrece la ventaja de que el último riego se puede cortar más pronto si existe suficiente agua en el suelo. Stegman (1983) mencionó que si se produce estrés hídrico en la parte final

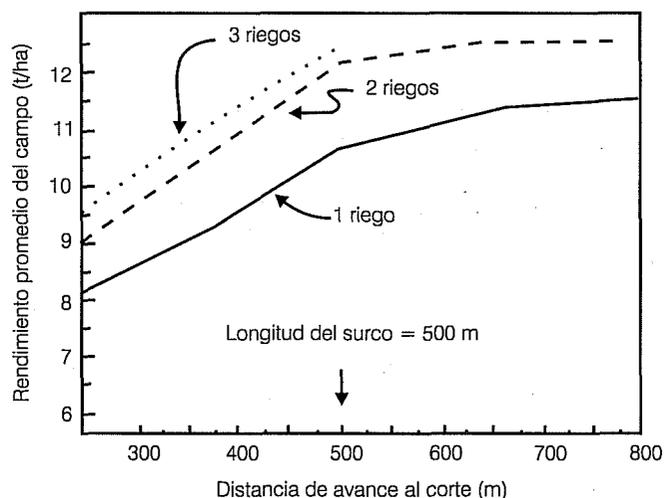
de la etapa de llenado del grano, el rendimiento se reduce mínimamente, ya que la planta continúa extrayendo el agua del suelo. Se simularon uno, dos y tres riegos, para simular este efecto.

Reducir el escurrimiento ofrece ventajas cuando se tiene riego deficitario. Se evaluaron diferentes estrategias para manejar el escurrimiento, variando el gasto para avanzar el agua a diversas distancias a lo largo del surco. Esta estrategia es análoga a la del sistema de riego limitado con temporal propuesta por Stewart (1981).

Se utilizó un tiempo de riego de 12 horas y se ajustó el gasto para conducir el agua a diferentes distancias a lo largo del surco. Las que son mayores a la longitud del surco representan estrategias que producen escurrimiento. Los diferentes gastos utilizados a lo largo y ancho del surco resultaron en diferencias en los volúmenes escurridos.

Los sistemas de reúso son una alternativa para el manejo del escurrimiento, en las zonas donde no existen drenes colectores superficiales o donde el escurrimiento no es permitido. Los sistemas de reúso son pilas de tierra ubicadas en la parte más baja del terreno utilizadas para recibir los escurrimientos del riego. Se simularon sistemas con y sin reúso, para las diferentes distancias de avance. Se consideró que 20% del escurrimiento se evaporó, sufrió percolación profunda u otras pérdidas en la pileta. El 80% restante se asumió como de reúso. Para comparar las estrategias, se consideró un caso de estudio que representa las condiciones típicas del oeste-central de Estados Unidos de América. Se escogió un año promedio de lluvia (1986), de un registro climático de 33 años, para la simulación.

## 3. Rendimiento promedio del terreno, cuando el primer riego inicia el día 180



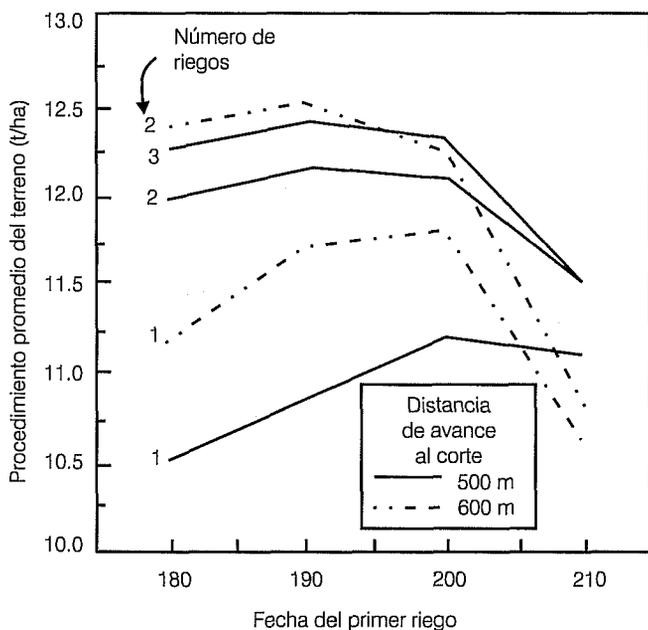
El terreno tiene 1000 m de largo y 500 m de ancho. El gasto del pozo es de 50 l/s, equivalente a 8.6 mm/día, que es representativo en el área. Se utilizó un tiempo de riego de 12 horas, que representa un tiempo típico y es difícil de cambiar debido a las costumbres del agricultor.

### Resultados

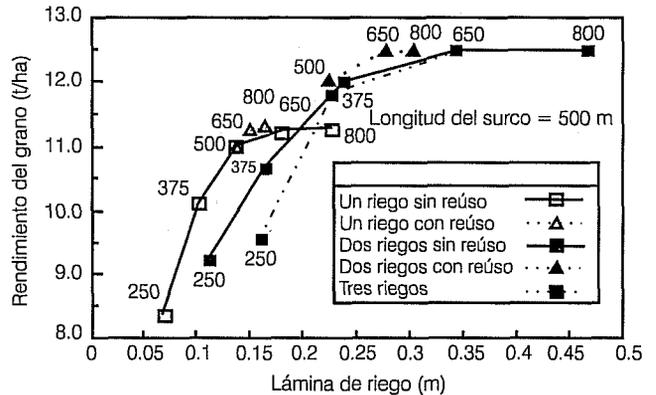
Los resultados de la simulación cuando se inicia el primer riego en el día 180, para diferentes distancias de avance y números de riegos se ilustran en la figura 3. Si se aplican dos riegos, el rendimiento se incrementa substancialmente por arriba al de un riego, para todas las estrategias de riego. Cuando se permite escurrimiento, el agua avanza mas allá del final del surco, y también el rendimiento promedio se incrementa.

Si el agua se avanza a una distancia hipotética de 800 m (la distancia real es 500 m), se produce casi el mismo o un poco más de rendimiento que si se avanzara a 650 m, ya que toma aproximadamente 25 días en regarse todo el terreno con la estrategia de avance a 800 m, comparado con veinte días para 650 m de avance. Con la estrategia de 800 m, como se tarda mucho tiempo en regar de un lado a otro del terreno, el estrés hídrico se acumula en el extremo del terreno reduciéndose el rendimiento en esa área, compensando el rendimiento adquirido por el riego de los primeros surcos.

#### 4. Rendimiento obtenido con diferentes estrategias de manejo del riego



#### 5. Efecto del número de riegos y estrategias de avance, en el agua utilizada y en el rendimiento, cuando el primer riego inicia el día 190



Sólo dos riegos fueron necesarios para maximizar el rendimiento, para las estrategias de avance de 650 y 800 m. Si el gasto se reducía para minimizar escurrimiento, un tercer riego era necesario para incrementar el rendimiento promedio. Obviamente, el mayor rendimiento no se obtuvo con las estrategias en las cuales el agua no alcanzaba el final del terreno.

El rendimiento promedio se aumentó al retardar el riego más allá del día 180, especialmente para un solo riego (figura 4). La fecha óptima de riego para un solo riego fue el día 200. En la figura 4, también se observa que el rendimiento decrece considerablemente cuando el caudal se ajusta para avanzar el agua a 650 m debido a que el riego se demora mucho, aplicándose después del día 200.

Este decrecimiento se debe al aumento de longitud y del tiempo requerido para alcanzar el último punto del terreno. Cuando el número de riegos se incrementa debido a que se adelanta la fecha de inicio del primer riego, la fecha óptima del primer riego es el día 190 para las estrategias de riegos múltiples. La estrategia de avance a 650 m produce un rendimiento promedio más alto que la estrategia de avance a 500 m, para uno y para dos riegos por año. (Al añadir un tercer riego, el rendimiento, se incrementa para todas las fechas, excepto para el día 210).

Para seleccionar la mejor estrategia de riego se requiere obtener una función producción del cultivo similar a la de la figura 5. Los números que están arriba de los símbolos representan la distancia avanzada al corte. La función de producción de la figura 5 nos puede ayudar a tomar decisiones al regar bajo condiciones de escasez de agua. Si existe una disponibilidad limitada de agua con una lámina menor a 10 cm, la mejor estrategia es regar sólo una vez, y avanzar el agua hasta una distancia de 375 m.

Si la lámina disponible de riego es menor a 15 cm, la estrategia óptima es regar una sola vez, avanzar el agua a 500 o 600 m. Para láminas disponibles de 25 cm, es preferible regar dos veces en lugar que tres, avanzar el agua a 500 m y reutilizar el escurrimiento. Para láminas mayores de 35 cm, la estrategia de regar dos veces y avanzar el agua hasta 650 m, produce los máximos rendimientos. Utilizar un sistema de reúso de escurrimientos resulta más benéfico para gastos mayores o para las estrategias de avanzar el agua a 650 y 800 m. Con el uso de un sistema de reutilización se puede ahorrar, aproximadamente, 5 cm de agua cuando el primer riego empieza el día 180.

Cuando existen condiciones limitadas de agua, se pueden utilizar modelos como los expuestos en este trabajo, para seleccionar entre diferentes estrategias de riego. El volumen de agua necesario para el año, se puede determinar antes de la temporada de riego, cuando existen condiciones limitadas de agua. El manejo de las estrategias necesarias para riego limitado, implica la distribución temporal y espacial del agua en el terreno, y la resultante distribución del rendimiento.

En algunos casos, lo óptimo es reducir el área de riego y plantar cultivos más tolerantes a la escasez de agua. Todas las desiciones dependen de los factores económicos y de los riesgos que desee adoptar el productor. La metodología desarrollada aquí, toma en consideración la respuesta física del cultivo a las diferentes estrategias simuladas. Sin embargo, es necesario trabajar aún más para incluir un análisis económico. También es necesario realizar más pruebas de campo de los modelos, en forma individual y combinada.

## Conclusiones

El modelo puede ser usado para simular la distribución no uniforme del agua a lo largo y ancho del surco.

El método puede ser usado para planificar actividades agrícolas, tales como generar recetas de riego y seleccionar cultivos, debido a que es posible simular la respuesta física del cultivo a la disponibilidad del agua, cuando se utilizan diferentes estrategias de manejo del riego.

La aplicación del modelo a un caso de estudio proporcionó algunas recomendaciones generales, tales como el momento para comenzar el primer riego, forma de manejar el escurrimiento, el momento para utilizar un sistema de reúso y el número de riegos a aplicar.

Recibido: enero, 1996  
Aprobado: febrero, 1996

## Referencias

- Enciso, J.M. 1992. An infiltration model for managing furrow irrigation with limited water supplies. Ph. D. Diss. University of Nebraska-Lincoln. Lincoln, NE. pages 1-187.
- Fok, Y.S. 1984. Two dimensional infiltration equation for furrow irrigation. ASCE. J. Irrig. and Drain. Div. ASCE 110 (2): 208-217.
- Jones, C.A., and J.R. Kiniry. 1986. CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development. College Station: Texas A&M University. Press. pages 1-40.
- Rayej, M., and W.W. Wallender. 1987. Furrow model with specified space intervals. Journal of the irrigation and drainage engineering ASCE. 113 (4): 536-548.
- Stegman E.C. 1983. Irrigation scheduling applied timing criteria. In: Advances in irrigation. Vol. 2. (1st edition). ed. D. Hillel. 1-30. Academic Press.
- Stewart, B.A., D.A. Dusek and J.T. Musik. 1981. A management system for the conjunctive use of rainfall and limited irrigation of graded furrows. Soil Sci. Soc. Am. J. 45(2): 413-419.

## Abstract

Enciso J. and Martin D. "Simulation of Surface Irrigation Strategies with Limited Water Supplies". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XII. Num. 1, pages 41-46, January-April, 1997.

The distribution of irrigation water across a field can dramatically affect management of furrow irrigation systems as water supplies become limiting. To assess management strategies for deficit irrigation with a furrow system we used a set of simulation models to determine the average corn yield for the field. We combined an infiltration model, a surface irrigation model and a crop model (CERES-MAIZE) to predict the yield along and across the field. A two dimensional Green and Ampt infiltration model was developed to simulate infiltration changes due to soil water content and cracking. A case study for western Nebraska for a Cozad silt loam soil with and without cracks was used to illustrate development of production functions resulting from management strategies for a limited irrigation water supply. It was concluded that the infiltration model was necessary to simulate deficit irrigation and that the system of models can be used to develop farm management recommendations.

**Key words:** Surface irrigation, water shortage, distribution uniformity, combined simulation model, average yield, maize.