

# CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO APLICADO EN EL RIEGO TECNIFICADO POR GRAVEDAD

## CALIBRATION OF AN HYDROLOGY MODEL APPLIED IN THE TECHNOLOGY IRRIGATION BY GRAVITY

Laurencio Rosano-Méndez<sup>1</sup>, Luis Rendón-Pimentel<sup>2</sup>, Pedro Pacheco-Hernández<sup>3</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>4</sup>, Jesús Chávez-Morales<sup>5</sup> y Humberto Vaquera-Huerta<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Especialidad de Postgrado en Hidrociencias, IRENAT. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. <sup>2</sup>Gerencia General de Distritos de Riego. Comisión Nacional del Agua. México, D. F. (Irendon@sgo.cna.gob.mx). <sup>3</sup>Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Progreso, Morelos. (ppacheco@tlaloc.imta.mx). <sup>4</sup>Especialidad de Postgrado en Edafología, IRENAT. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. (jetchev@colpos.mx). <sup>5</sup>Delegación en el Distrito Federal. Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Ganadería, Pesca y Alimentación. México, D. F. (df\_deleg@sagar.gob.mx). <sup>6</sup>Especialidad de Postgrado en Estadística, ISEI. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México.

### RESUMEN

El uso racional del agua de riego y de los fertilizantes es fundamental para mejorar el ingreso de los productores y proteger el ambiente. La aplicación de fertilizantes y el agua es una alternativa tecnológica de reciente incorporación destinada a mejorar los rendimientos de los cultivos, ahorrar agua y energía eléctrica, así como reducir los costos de operación de los equipos de bombeo. Este estudio tuvo como propósitos comparar la tecnología de riego tradicional (P) con una metodología tecnificada (T) y medir la respuesta de la producción de maíz (*Zea mays*) a la aplicación de nitrógeno en forma tradicional y en fertirriego. El experimento se desarrolló en el módulo 2 del Distrito de Riego (DR076), en el Valle del Carrizo, Sinaloa, México. La tecnología denominada riego tradicional es la utilizada por los agricultores, y la tecnificada es una propuesta del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Se aplicó una lámina de riego (Lr) de presiembra de 108 mm en los tratamientos. Las láminas de riego en T se estimaron a través de un Sistema Computacional de Pronóstico en Tiempo Real (SIRTRE) y las de P corresponden a las recomendadas por el DR 076. Para aplicar eficientemente los riegos de T se calibró *in situ* el Modelo Simulador de Riego por Gravedad (RIGRAV). El diseño experimental tuvo una aleatorización restringida, con dos factores: Dosis de fertilización nitrogenada y tecnologías de riego. El primero incluyó cuatro niveles: testigo sin fertilizantes ( $N_1=0$  kg N ha<sup>-1</sup>), fertilización tradicional ( $N_2=240$  kg N ha<sup>-1</sup>), una dosis estimada con base en rendimientos potenciales ( $N_3=400$  kg N ha<sup>-1</sup>) y una superior a  $N_3$  ( $N_4=500$  kg N ha<sup>-1</sup>); y el segundo dos tecnologías de riego: tecnología de riego de los productores (P) y tecnología de riego tecnificado (T). En total se compararon ocho tratamientos. El efecto de las tecnologías de riego no fue significativo, pero T permitió ahorrar 37% de la lámina de riego total aplicada en P,

### ABSTRACT

The rational use of irrigation water and fertilizers is essential to improve farmer's income and to preserve the environment. The application of fertilizers along with irrigation water is a recently introduced technological alternative to traditional fertilization which is meant to improve crop yields, save water and electric energy, and also to reduce operation costs of water pumping equipments. The objective of the present research was to compare two irrigation technologies: traditional (P) and improved (T), and to measure the response of maize's yield (*Zea mays*) to nitrogen fertilizer applied in fertirrigation and in the traditional way. The experiment was carried out in module 2 of the Valle del Carrizo Irrigation District (DR 076), Sinaloa, Mexico. The so called traditional irrigation technology is the one used by farmers, and the improved one is a proposal made by the Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Before sowing, all experimental plots were irrigated with 108 mm water depth. The water depth in T was estimated by a forecast computational system in real time (SIRTRE) and in P they correspond to those recommended by the DR 076. The Surface Irrigation Simulation Model (RIGRAV) was calibrated *in situ* to efficiently irrigate all treatments. The experimental design had a restricted randomization, including two factors: Nitrogen fertilization rate and irrigation technologies. The first factor included four N levels: Control without fertilizer ( $N_1=0$  kg N ha<sup>-1</sup>), traditional fertilization ( $N_2=240$  kg N ha<sup>-1</sup>), an estimated rate based on potential yields ( $N_3=400$  kg N ha<sup>-1</sup>), and a rate above  $N_3$  ( $N_4=500$  kg N ha<sup>-1</sup>), and the second one significant two irrigation technologies: the one used by farmers (P) and a modernized irrigation technology (T). Eight treatments were compared. The effect of irrigation technology was not significant; however, with T, 37% less water was applied as compared to P, without yield decrements. Nitrogen fertilization significantly increased grain yield, but there were no differences between  $N_3$  and  $N_4$  treatments. Average maize yields with  $N_3$  and  $N_4$  were

sin provocar disminución en los rendimientos. La fertilización nitrogenada incrementó significativamente los rendimientos de grano, pero no hubo diferencia entre los tratamientos  $N_3$  y  $N_4$ . El rendimiento promedio de maíz con los tratamientos  $N_3$  y  $N_4$  fue  $11.6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de grano, 24% mayor que el obtenido con  $N_2$  y sustancialmente mayor ( $8.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) que con el tratamiento  $N_1$ .

**Palabras clave:** *Zea mays*, fertilización nitrogenada, fertirriego, modelo RIGRAV, modelo SIRTRE.

## INTRODUCCIÓN

La escasez de agua para riego es un problema en México y será mayor en los años venideros, en particular en las zonas de bombeo profundo. La disponibilidad del agua se ha reducido por la intensidad y duración de las sequías en los últimos años. El área de atención del presente trabajo es los distritos de riego del norte del país, caracterizados por la presencia permanente de sequía, y en los que urge aplicar tecnologías de riego y producción más eficientes.

Los sistemas en riego por gravedad operan con eficiencias de aplicación a nivel parcelario menores a 50%, lo cual reduce la superficie que se puede regar y sobreexplota los acuíferos del país (Aldama, 1998). La tecnificación de los sistemas de riego ofrece la posibilidad de incrementar la eficiencia y sostenibilidad (Rendón *et al.*, 1995). En el riego por gravedad se consideran cuatro fases (avance, almacenamiento, consumo y recesión) con dos tipos de escurrimiento (superficial y subterráneo), que pueden modelarse mediante el acoplamiento de las ecuaciones de Saint Venant (1871) y la de Richards (1931), introduciendo hipótesis simples como la de Lewis y Milne (1938), donde sus parámetros o variables pueden ser estimados mediante metodologías propuestas por autores como Rendón *et al.* (1997a). Una simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant, con la hipótesis de que el perfil del escurrimiento superficial permanece invariante y el gasto de riego fijo, es el modelo hidrológico de Lewis y Milne (1938) del riego por gravedad:

$$Qt = \bar{A}x_f + \int_0^{x_f} A_I(x,t)dx$$

con

$$A_I = \bar{p}l$$

donde  $Q$  es el gasto de riego [ $L^3T^{-1}$ ];  $t$  es el tiempo [ $T$ ];  $x$  es la distancia en el sentido del movimiento del agua [ $L$ ];  $\bar{A}$  es el área hidráulica media [ $L^2$ ];  $x_f$  es la posición del frente de avance [ $L$ ];  $A_I$  es el volumen infiltrado por unidad

$11.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ , 24% higher than that with  $N_2$  and much higher (an increment of  $8.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) than with  $N_1$ .

**Key words:** *Zea mays*, nitrogen fertilization, fertirrigation, RIGRAV model, SIRTRE model.

## INTRODUCTION

The shortage of irrigation water is a problem in México and it will get worse in the forthcoming years, particularly in areas where deep pumping is used. The availability of water has diminished due to the severe and long drought periods over the last years. This work focuses on the irrigation districts located in northern México, characterized by permanent droughts, and where the implementation of more efficient irrigation and production technologies is urgent.

Gravity irrigation systems operate with application efficiency rates, at plot level, below 50%, which reduces the surface that can be irrigated and overexploit the country's aquiferous (Aldama, 1998). The modernization of irrigation systems offers the possibility of increasing efficiency and sustainability (Rendón *et al.*, 1995). In irrigation by gravity, four phases are considered (advance, storage, consumption, and recession) with two kinds of runoffs (surface and underground), that can be modeled through the combination of equations by Saint Venant (1871) and Richards (1931), introducing simple hypotheses like that of Lewis and Milne (1938), in which their parameters or variables can be estimated through methodologies proposed by authors like Rendón *et al.* (1997a). A simplification of the equations by Saint Venant, with the hypothesis that the profile of surface runoff remains unchanged and the flow fix, is the hydrological model of Lewis and Milne (1938) for irrigation by gravity:

$$Qt = \bar{A}x_f + \int_0^{x_f} A_I(x,t)dx$$

with

$$A_I = \bar{p}l$$

where  $Q$  is the irrigation volume of flow [ $L^3T^{-1}$ ];  $t$  is time [ $T$ ];  $x$  is the distance in the direction of the water movement [ $L$ ];  $\bar{A}$  is the average hydraulic area [ $L^2$ ];  $x_f$  is the position of the front of advance [ $L$ ];  $A_I$  is the volume infiltrated by the furrow or row [ $L^2$ ];  $\bar{p}$  the average wetted perimeter [ $L$ ];  $l$  is the volume infiltrated by the furrow or row length unit and by wetted perimeter unit, that is, it has water depth units [ $L$ ]. Rendón *et al.* (1995) developed

de longitud de surco [ $L_2$ ];  $\bar{p}$  el perímetro mojado medio [L];  $I$  es el volumen infiltrado por unidad de longitud del surco o melga y por unidad de perímetro mojado, es decir, tiene unidades de lámina [L]. Rendón *et al.* (1995) elaboraron un programa de cómputo (RIGRAV) que resuelve numéricamente la ecuación anterior. Con dicho programa se determina el tiempo de riego (TR) y el gasto de riego unitario ( $q_0$ ), seleccionando el valor de la pendiente natural del terreno, la longitud del riego, el valor de la rugosidad ( $n$ ) de Manning y los valores de los parámetros de la función de infiltración (escurrimiento subterráneo). Rendón *et al.* (1991) utilizan la ecuación propuesta por Green y Ampt (1911):

$$I = Kst + \lambda \ln\left(1 + \frac{I}{\lambda}\right)$$

con  $\lambda = (h + h_p)(\theta_s - \theta_0)$ , conductividad hidráulica a saturación ( $K_s$ ), contenido volumétrico de agua inicial ( $\theta_0$ ), contenido volumétrico de agua a saturación ( $\theta_s$ ), y succión en el frente de humedecimiento ( $h_p$ ). El tiempo ( $t$ ) está definido de manera explícita en función de la lámina infiltrada ( $I$ ), y esta última está definida de manera implícita en función del tiempo. Así, para calcular la lámina infiltrada para un tiempo dado, es necesario proceder por tanteos, lo cual puede simplificarse utilizando un algoritmo eficiente. El parámetro  $\lambda$  puede actualizarse en función del tirante de agua ( $h$ ) sobre la superficie del suelo y  $\theta_0$  (Rendón *et al.*, 1997a).

Una alternativa para mejorar la eficiencia del riego es el riego presurizado, que utiliza tuberías de alta y baja presión para controlar adecuadamente el abastecimiento de agua y de nutrimentos a los cultivos (fertirrigación). En México se inició a principios de 1996 (FIRCO, 1999)<sup>7</sup> un programa de modernización de la irrigación que tiene tres objetivos principales: 1) Mejorar los ingresos de los agricultores mediante la reducción de costos y elevación de rendimientos; 2) Reducir las extracciones de los acuíferos; 3) Ahorrar energía eléctrica y reducir costos de operación de los equipos de bombeo. Este programa está estrechamente ligado a un programa nacional de fertirrigación.

En el DR 076 se estableció un sistema de riego de baja presión en 70 ha, considerando las características del suelo, pendientes y tamaño de las parcelas. El agua de riego se aplica mediante tuberías de compuertas.

El rendimiento promedio de trigo en las parcelas en que se adoptó la tecnología anterior fue  $5.6 \text{ t ha}^{-1}$ , similar a la que lograron los mejores agricultores del DR, pero con un ahorro de agua de 50% (Rendón *et al.*, 1997b).

a computer program (RIGRAV) that numerically solves the previous equation. With such program, irrigation time (TR) is determined, as well as the unitary water volume flow ( $q_0$ ), when appropriate values for the terrain natural slope, the length of irrigation, the Manning value of rugosity ( $n$ ), and the parameters of the infiltration function (underground runoff) are selected. Rendón *et al.* (1991) use the equation proposed by Green and Ampt (1911):

$$I = Kst + \lambda \ln\left(1 + \frac{I}{\lambda}\right)$$

with  $\lambda = (h + h_p)(\theta_s - \theta_0)$ , hydraulic conductivity to saturation ( $K_s$ ), volumetric content of initial water ( $\theta_0$ ), volumetric content of water to saturation ( $\theta_s$ ), and suction on the wetting front ( $h_p$ ). Time ( $t$ ) is explicitly defined in terms of the infiltrated water depth ( $I$ ), and the latter is implicitly defined in function of time. Thus, to calculate the infiltrated water depth at a given time, it is necessary to proceed by trial and error, which can be simplified by using an efficient algorithm. Parameter  $\lambda$  can be updated in terms of the water depth ( $h$ ) over the soil surface and  $\theta_0$  (Rendón *et al.*, 1997a).

An alternative for a more efficient irrigation system is pressurized irrigation, which uses high and low pressure pipes to adequately control water supply and crop nutrients (fertirrigation). A program to modernize the irrigation began in México in early 1996 (FIRCO, 1999)<sup>7</sup>, a program with three main goals: (1) To improve farmers' incomes through the reduction of costs and higher yields; (2) To reduce the extractions of water from aquiferous; (3) To save power and reduce operation costs of pumping equipment. This program is closely linked to a national fertirrigation program.

In the DR 076 a low pressure irrigation system in 70 ha was established taking in consideration: soil characteristics, slopes and the size of plots. Irrigation water is applied in this system through multi-outlet pipes.

The average yield of wheat in the plots in which the previous technology was employed was  $5.6 \text{ t ha}^{-1}$ , similar to that achieved by the best farmers of the DR, but with 50% less water (Rendón *et al.*, 1997b). The previous study states that the timely application of water, with a methodology based on the irrigation forecast in real time, would result in higher grain yields and economic benefits than the traditional system applied by farmers which is based on qualitative observations. However, a production increase would require to increment the nitrogen rates presently recommended, as the deficit of this element may cause physiological disorders that would affect the expected yields (Etchevers, 1997).

<sup>7</sup> FIRCO. Fideicomiso de Riesgo Compartido. 1999. <http://www.sagar.gob.mx/users/alianza/programa.htm# fertirrigación>.

En el trabajo anterior se postula que la aplicación de agua con oportunidad y a tiempo, con una metodología basada en el pronóstico del riego en tiempo real, resultaría en mayores rendimientos de grano y beneficios económicos, que con el esquema tradicional de los productores, basado en observaciones de carácter cualitativo. Sin embargo, el aumento de la producción requeriría aumentar las dosis de nitrógeno recomendadas actualmente, porque un déficit de este elemento puede causar trastornos fisiológicos que afectarían los rendimientos esperados (Etchevers, 1997).

La combinación de dosis de nitrógeno y agua con oportunidad y en la cantidad predicha por un modelo, produciría rendimientos más elevados y economía de uso. La tecnificación del riego por gravedad permite importantes ahorros de agua de la lámina de riego media total aplicada a los cultivos. Aunque los rendimientos obtenidos con riego tecnificado generalmente igualan y en algunos casos superan a los obtenidos con manejo tradicional, los agricultores no muestran interés porque el agua de riego no se cobra por volumen (Rendón *et al.*, 1997b). Una opción es ofrecer un paquete que incluya tecnologías que permitan mantener al mínimo los costos de producción e incrementar el ingreso neto, además de la tecnificación del riego por gravedad, el manejo apropiado de la fertilización a través del riego, el uso de variedades de alto rendimiento, y siembras de precisión (Rendón *et al.*, 1997b). El presente trabajo tuvo como propósito hacer un uso más eficiente del agua apoyado con el sistema SIRTRE y el modelo RIGRAV, y comparar la tecnología de riego tradicional con el riego tecnificado aplicando dosis crecientes de nitrógeno junto con el agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló de octubre de 1997 a junio de 1998 en el DR 076. El sitio se abastece de agua de riego mediante un sistema de baja presión con tuberías de compuertas. Se delimitaron ocho parcelas (de 15 m x 300 m), que se sembraron con maíz. Los tratamientos de riego fueron:

1) La tecnología de riego de los productores de la zona (P), que consiste en utilizar un criterio basado en la experiencia para determinar el momento del riego, al detectar el estrés manifestado por el cultivo y la resequedad en la parte superficial del suelo. El riego de P se hizo con tuberías con compuertas, sustituyendo el uso de sifones. El momento de aplicación de los riegos en P se definió aplicando el criterio de un productor de maíz; las láminas de riego medias (10 cm) fueron muy similares a las que se emplean en el DR 076.

2) La metodología de riego tecnificado (T) generada por el IMTA (1996) consistió en utilizar la red de tuberías de distribución de baja presión y aplicación del riego mediante tuberías de compuertas, a las que se adicionó un dispositivo inyector de fertilizante. Las láminas y el calendario de riego del cultivo se estimaron mediante el Sistema

The timely combination of nitrogen and water in the amounts predicted by a model would produce higher yields and water use economy. The modernization of irrigation by gravity allows the saving of large amounts of water having as reference the average water depth used in crops. Although the yields obtained with modern irrigation system generally equal, and in some cases exceed those obtained with a traditional system, farmers show no interest because irrigation water is not charged by volume (Rendón *et al.*, 1997b). An option for these farmers is to offer them a package including technologies that allow them to keep production costs at the lowest and to increase net income and, in addition, to modernize the technology of irrigation by gravity, the adequate use of fertilization through irrigation, the use of high yield varieties and precision sowing (Rendón *et al.*, 1997b). The present study had the purpose of achieving a more efficient use of water supported by the SIRTRE system and the RIGRAV model, and to compare the traditional irrigation technology with the modernized irrigation when increasing nitrogen rates are applied in the water.

## MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out from October 1997 to June 1998 in the DR 076. The site was irrigated by means of a low pressure system with multi-outlet pipes. Eight plots (15 m x 300 m) were established and sown with maize. The irrigation treatments were:

1) The actual irrigation technology (P), with is based on the experience of local farmers to determine the moment for irrigation and involves observing the level of stress shown by the crop and the moisture content in the soil surface. P irrigation was performed with multi-outlet pipes instead of siphons. The timing for water application was defined based on the criterion of a farmer that produces maize. Average water depths (10 cm) were very similar to those employed in DR 076.

2) The modernized irrigation methodology (T) was generated by the IMTA (1996), and consisted in using a low pressure distribution pipe network and the application of irrigation through multi-outlet pipes, to which a fertilizer injector device was attached. Water depths and crop irrigation schedule were estimated through the Forecast Computer System in Real Time (SIRTRE) (IMTA, 1996). The system is based on an hydric balance that integrates the characteristics of soil, crop and weather. Evapotranspiration (E<sub>to</sub>) is determined by the estimative Penman-Monteith's, method using the weather data registered through automated weather stations installed in the field. Such model estimates the water demand through an hydric balance, considering first soil humidity at field capacity (CC). Real evapotranspiration (E<sub>tr</sub>) is estimated daily based on E<sub>to</sub> and the crop coefficient (K<sub>c</sub>). The water depth required for irrigation was determined by measuring the cumulative evapotranspiration counting from the date of the last irrigation, value that was multiplied by the allowable water depletion factor in soil (F), according to the developmental stage

Computacional de Pronóstico en Tiempo Real (SIRTRE) (IMTA, 1996). El sistema se basa en un balance hídrico que integra las características del suelo, cultivo y clima. La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se determina por el método estimativo de Penman-Monteith utilizando los datos meteorológicos registrados mediante estaciones meteorológicas automatizadas instaladas en campo. Dicho modelo estima las demandas de agua por medio de un balance hídrico a partir de la humedad del suelo a capacidad de campo (CC). La evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) se estima diariamente con base en la ET<sub>o</sub> y el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). La lámina de requerimientos de riego se determinó contabilizando la evapotranspiración acumulada a partir de la fecha del último riego y se multiplicó por el factor de abatimiento de humedad permisible en el suelo (F), de acuerdo con la etapa de desarrollo en que se encuentra la planta. La humedad residual fácilmente aprovechable (HFA) se calcula de acuerdo con la humedad disponible y la profundidad de las raíces (Pr), para cada día. El momento de riego se determina mediante un balance que compara la ET<sub>r</sub> acumulada con la humedad residual (HR). Se debe regar cuando la ET<sub>r</sub> es mayor que HR.

Los gastos de riego óptimos para las láminas de riego definidas con el SIRTRE, se determinaron con el modelo de simulación del riego por gravedad (RIGRAV) descrito en la Introducción.

Los valores iniciales de los parámetros del suelo  $\theta_0$ ,  $\theta_s$ ,  $h_f$  y  $K_s$  se obtuvieron de la caracterización del suelo con fines de riego (Fuentes, 1997). Las muestras de suelo para esta caracterización fueron colectadas en la profundidad de 0 a 20 cm.

La dirección del riego fue en sentido de la máxima pendiente de la parcela, con una longitud (l) de 300 m, una pendiente longitudinal (S) de 0.33% y una anchura (a) de 15 m en los ocho tratamientos. La separación entre surcos (E) fue de 0.75 m trazándose veinte surcos en cada tratamiento.

Para calibrar el modelo RIGRAV *in situ* se midió el tiempo de avance y de recesión de la lámina de agua; durante el riego de presembrado, y el primero y segundo riegos de auxilio, para lo cual se colocaron banderines cada 20 m, desde el inicio del surco hasta el fin del mismo. El avance se midió desde el momento en que se derivó el agua al surco hasta la salida del mismo, registrándose el tiempo de llegada a cada uno de los puntos. La recesión se midió desde el momento en que se suspendió la entrada de agua al surco, registrándose los tiempos en que el tirante fue desapareciendo del surco en cada punto hasta el final del mismo. Con los datos anteriores se esquematizaron las curvas de avance y recesión; con la calibración de los valores de  $q_s$ ,  $K_s$ ,  $n$  y  $h_f$  se generaron las curvas de avance y recesión del modelo ajustadas a las curvas obtenidas en campo. La eficiencia de aplicación (E<sub>a</sub>) de las láminas de riego fue de 74 a 90%, la eficiencia de requerimiento de riego (E<sub>r</sub>) fue 100% y el coeficiente de uniformidad (CUC) varió de 74 a 98%. Los valores de contenido de humedad volumétrico proporcionados por el SIRTRE se verificaron con un sensor de humedad del tipo TDR (Time Domain Reflectometry).

Al momento de aplicar el riego en cada tratamiento, se hicieron aforos al inicio, a la mitad y al final de la tubería de compuertas. El gasto entregado al surco se determinó midiendo el volumen (v) a la salida de la compuerta dividido entre el tiempo (t) definido previamente. El volumen se midió colocando bolsas de plástico a la salida de las

of the plant. The readily usable residual soil moisture (HFA) is estimated for each day in accordance with the available soil moisture and the depth of rooting (Pr). The moment of irrigation is determined by means of a balance in which the accumulated E<sub>r</sub> is compared to the residual soil moisture (HR). Each time that E<sub>r</sub> is higher than HR, water must be applied.

The optimum volume flows for water depths defined by SIRTRE were calculated with the simulation model of irrigation by gravity (RIGRAV) described in the Introduction.

The initial values for the soil parameters  $\theta_0$ ,  $\theta_s$ ,  $h_f$ , and  $K_s$  were obtained from the description of the soil for irrigation purposes (Fuentes, 1997). Soil samples for this characterization were collected at the 0 to 20 cm depth.

The direction of irrigation followed the maximum slope of the plot, with a 300 m length (l), the longitudinal slope (S) and the plot width (a) were 0.33% and 15 m, for the eight treatments. The distance between furrows (E) was of 0.75 m, that is, 20 furrows per plot.

In order to calibrate the RIGRAV model *in situ*, the time of advance and recession of the water depth was measured during pre-planting irrigation and the first and second auxiliary irrigations. For this purpose, markers were placed at a 20 m distance from one another, along the furrow. Water front advance was measured from the moment in which the water entered the furrow up to the end of it, registering the time of arrival at each one of the markers. Recession was measured from the moment in which the entry of water to the furrow was suspended, registering the lapses in which the water depth began to disappear from the furrow in each marked point up to the end of it. With these data, advance and recession curves were drawn. With the calibration of  $q_s$ ,  $K_s$ ,  $n$  and  $h_f$ , advance and recession curves of the model were drawn and adjusted to the ones obtained in the field. The application efficiency (E<sub>a</sub>) of the irrigation water depths ranged from 74 to 90%, the efficiency of irrigation requirement (E<sub>r</sub>) was 100%, and the uniformity coefficient (CUC) ranged from 74 to 98%. The values of the volumetric soil moisture content provided by SIRTRE were verified with a TDR (Time Domain Reflectometry) soil moisture sensor.

Every time that irrigation water was applied to a treatment, the volume flows were measured at the beginning, middle and end portions of the multi-outlet pipes. The volume flow dispensed on the furrow was calculated by dividing the volume of water (v) measured at the exit point of the multi-outlet pipe by the time (T) previously defined. The water volume was measured by placing plastic bags at the exit of the multi-outlet pipes and immediately emptying the water in a container with a set volume.

Nitrogen fertilization treatments applied were: Control without fertilizer (N<sub>1</sub>), to compare yield increments due to fertilization. Traditional fertilization (N<sub>2</sub>), or the rate recommended by the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP, 1992) which is 240 kg ha<sup>-1</sup> nitrogen (1143 kg ha<sup>-1</sup> of granulated ammonium sulfate), splitted in two occasions (643 kg ha<sup>-1</sup> in the first application after grading, and 500 kg ha<sup>-1</sup> in the second application at sowing time). Estimated nitrogen rate (N<sub>3</sub>), based on a probable yield of 12 t ha<sup>-1</sup> of grain and a nitrogen contribution from soil of 40 kg ha<sup>-1</sup> which amounted to 400 kg ha<sup>-1</sup> N applied in the irrigation water as liquid

compuertas, vaciando inmediatamente el agua en un recipiente de volumen conocido.

Los tratamientos de fertilización nitrogenada fueron: Testigo sin fertilizante ( $N_1$ ), para comparar rendimientos por efecto de la fertilización. Fertilización tradicional ( $N_2$ ), se aplicó la dosis recomendada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP, 1992), de 240 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno (1143 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de amonio granulado) en dos fracciones (643 kg ha<sup>-1</sup> en la primera aplicación después del rastreo y 500 kg ha<sup>-1</sup> en la segunda aplicación al momento de la siembra). Dosis estimada ( $N_3$ ), que se calculó con base en un rendimiento probable de 12 t ha<sup>-1</sup> de grano y un aporte de nitrógeno del suelo de 40 kg ha<sup>-1</sup>; la cantidad estimada fue 400 kg N ha<sup>-1</sup> que se aplicó en el agua de riego como sulfato de amonio líquido (3584 L). Dosis máxima ( $N_4$ ), esta dosis (500 kg N ha<sup>-1</sup>) fue 25% superior a  $N_3$  y se aplicó en el agua de riego como sulfato de amonio líquido (4480 L). Estos tratamientos se combinaron con las tecnologías de riego P y T, dando origen a ocho tratamientos. El fertilizante de los tratamientos  $N_3$  y  $N_2$  se inyectó al agua, conectando el equipo de fertirrigación al sistema de baja presión, en el riego de presiembrado y en el primer y segundo riego de auxilio. La fertirrigación se hizo con un dispositivo inyector de fertilizante para redes de baja presión y aplicación del riego con tuberías de compuertas, el cual consta de un tanque fertilizador, un sistema regulador de carga constante y un calibrador.

El diseño experimental fue al azar con aleatorización restringida (determinada por la ubicación física de los hidrantes, lo que limitó las repeticiones aleatorias de los tratamientos), con dos factores: Dosis de fertilización y tecnologías de riego. El primero con cuatro niveles: Testigo sin fertilizante ( $N_1=0$  kg N ha<sup>-1</sup>), fertilización tradicional ( $N_2=240$  kg N ha<sup>-1</sup>), dosis estimada con base en los rendimientos potenciales ( $N_3=400$  kg N ha<sup>-1</sup>) y dosis superior a  $N_3$  ( $N_4=500$  kg N ha<sup>-1</sup>) y el segundo dos tecnologías de riego: Tecnología de riego de los productores (P) y tecnología de riego tecnificado (T), para un total de ocho tratamientos ( $N_1P$ ,  $N_2P$ ,  $N_3P$ ,  $N_4P$ ,  $N_1T$ ,  $N_2T$ ,  $N_3T$  y  $N_4T$ ). El arreglo fue factorial (4x2). En los tratamientos  $N_3P$ ,  $N_3T$ ,  $N_4P$  y  $N_4T$  se utilizó el dispositivo inyector de fertilizante indicado anteriormente.

Se consideraron como repeticiones las observaciones de unidades seleccionadas al azar dentro de cada parcela. Antes de la siembra y después del primer rastreo, en los ocho tratamientos se hizo una fertilización basal con 87 kg de superfosfato triple, (40 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ ). Las parcelas se sembraron con maíz 20 días después del riego de presiembrado (10 de noviembre de 1997) con sembradora de precisión. La variedad empleada fue Asgrow Jaguar, a razón de 106 400 semillas ha<sup>-1</sup>. El manejo se hizo de acuerdo con el paquete tecnológico recomendado por INIFAP (1992). La cosecha se realizó 194 días después de la siembra.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización del suelo con fines de riego propuesta por Fuentes (1997), proporcionó la información siguiente:  $\theta_0=0.23$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $\theta_s=0.44$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $\theta_{cc}=0.35$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $K_s=0.55$  cm hr<sup>-1</sup> y  $h_f=120$  cm. Con estos valores y con  $l=300$  m,  $S=33\%$ ,  $n=0.0375$  s m<sup>-1/3</sup> y

ammonium sulfate (3584 L). Highest nitrogen rate ( $N_4$ ), or 500 kg ha<sup>-1</sup> N, arbitrarily set 25% higher than  $N_3$ , and also applied in the irrigation water as liquid ammonium sulfate (4480 L). These treatments were combined with P and T irrigation technologies, generating eight treatments. The fertilizer of treatments  $N_3$  and  $N_4$  was injected to water by connecting the fertirrigation equipment to the low pressure irrigation system in the pre-planting irrigation and in the first and second auxiliary irrigation. The fertilizer injector for low pressure irrigation systems attached to the multi-outlet pipe irrigation, consists of a fertilizer tank, a regulating system for constant load, and a calibrator.

The experimental design was randomized with restricted randomization (determined by the physical location of hydrants, which limited the randomization of treatment replicates), including two factors: nitrogen fertilization rate and irrigation technologies. The first factor included four levels: Control without fertilizer ( $N_1=0$  kg ha<sup>-1</sup> N), traditional fertilization ( $N_2=240$  kg ha<sup>-1</sup> N), estimated nitrogen rate based on potential yields ( $N_3=400$  kg ha<sup>-1</sup> N), and a nitrogen rate higher than  $N_3$  ( $N_4=500$  kg ha<sup>-1</sup> N). The second factor included two irrigation technologies: The irrigation technology of farmers (P) and a modernized irrigation technology (T), for a total of eight treatments ( $N_1P$ ,  $N_2P$ ,  $N_3P$ ,  $N_4P$ ,  $N_1T$ ,  $N_2T$ ,  $N_3T$ , and  $N_4T$ ). The arrangement of treatments was a factorial 4x2. In  $N_3P$ ,  $N_3T$ ,  $N_4P$  and  $N_4T$  treatments, the indicated fertilizing injector device was used.

The observations of randomly selected units within each plot were considered as replications. Before sowing and after the first grading, a basal fertilization, with 87 kg of triple super phosphate (40 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>) was made in the eight treatments. Plots were sown with maize 20 days after pre-planting irrigation (November 10, 1997) with a precision planter. The variety used was Asgrow Jaguar, at 106 400 seeds ha<sup>-1</sup>. The management was carried out in accordance with the technological package recommended by INIFAP (1992). Harvest took place 194 days after sowing.

## RESULTS AND DISCUSSION

Soil's characterization for irrigation purposes proposed by Fuentes, (1997) provided the following information:  $\theta_0=0.23$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $\theta_s=0.44$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $\theta_{cc}=0.35$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $K_s=0.55$  cm hr<sup>-1</sup>, and  $h_f=120$  cm. With these values and with  $l=300$  m,  $S=33\%$ ,  $n=0.0375$  s m<sup>-1/3</sup> and the required water depth ( $L_r=10.8$  cm), pre-planting irrigation was applied. This information was provided to the RIGRAV model in order to determine the flow per furrow ( $Q_g$ ); by multiplying the unitary volume flow ( $q_0$ ) that was equal to 2.9 lps m<sup>-1</sup> by the distance between furrows,  $Q_g=2.2$  lps was obtained; the necessary irrigation time (TR) was 3.43 h, which results from dividing the volume by the volume flow; the highest values obtained were:  $E_a=0.9$ ,  $E_r=1.0$ , and  $CUC=0.98$ . The calibration of the RIGRAV model consisted in finding the values of  $K_s$  and  $h_f$  parameters, which allowed to represent the data for the advance and recession curves of pre-planting irrigation. This calibration was made only in the  $N_2T$  treatment. Table 1 shows calibration with RIGRAV. Advance and recession curves are shown in Figure 1.

**Cuadro 1. Calibración del RIGRAV.**  
**Table 1. RIGRAV calibration.**

Riego	Tratamiento	RIGRAV	l (m)	S (%)	q <sub>0</sub> (lps m <sup>-1</sup> )	θ <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	θ <sub>s</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	K <sub>s</sub> (cm h <sup>-1</sup> )	T	Lr (m)	n (s m <sup>-1</sup> )	h <sub>f</sub> (cm)	Lb (m)	TR (min)
P <sup>†</sup>	N <sub>2</sub> T	I <sup>‡</sup>	300	0.33	2.90	0.230	0.44	0.55	1	0.108	0.0375	120	0.120	206.00
		C <sup>§</sup>	300	0.33	2.90	0.230	0.492	0.73	1	0.108	0.0375	76	0.120	206.89
1er. Auxilio	N <sub>1</sub> T	I <sup>‡</sup>	300	0.33	3.00	0.228	0.492	0.73	1	0.057	0.0375	76	0.063	105.55
		C <sup>§</sup>	300	0.33	3.00	0.228	0.484	0.44	1	0.057	0.0380	73	0.063	105.50
2do. Auxilio	N <sub>4</sub> T	I <sup>‡</sup>	275	0.33	2.55	0.261	0.484	0.44	1	0.053	0.0380	73	0.059	104.24
		C <sup>§</sup>	275	0.33	2.55	0.261	0.484	0.43	1	0.053	0.0390	75	0.059	104.24
3er. Auxilio	N <sub>4</sub> T	I <sup>‡</sup>	280	0.33	2.50	0.269	0.484	0.43	1	0.054	0.0390	75	0.060	112.00
		C <sup>§</sup>	280	0.33	2.50	0.269	0.484	0.43	1	0.054	0.0390	75	0.060	112.00

<sup>†</sup> Presiembra ♦ Preplanting.

<sup>‡</sup> Información inicial ♦ Initial information.

<sup>§</sup> Calibración ♦ Calibration.

la lámina requerida (Lr=10.8 cm) se aplicó el riego de presiembra. Con esta información se alimentó el modelo RIGRAV para determinar el gasto de riego por surco (Qg); multiplicando el gasto unitario (q<sub>0</sub>), que fue igual a 2.9 lps m<sup>-1</sup> por la distancia entre surcos, se obtuvo Qg=2.2 lps, el tiempo de riego (TR) necesario fue 3.43 h que resulta de dividir el volumen entre el gasto; los valores máximos obtenidos fueron: Ea=0.9, Er=1.0 y el CUC=0.98. La calibración del modelo RIGRAV consistió en encontrar los valores de los parámetros K<sub>s</sub> y h<sub>f</sub> que permitieron representar los datos de las curvas de avance y recesión del riego de presiembra. Esta calibración se hizo sólo en el tratamiento N<sub>2</sub>T. En el Cuadro 1 se muestra la calibración con el RIGRAV. Las curvas de avance y recesión se ilustran en la Figura 1.

Los valores de K<sub>s</sub> y h<sub>f</sub> considerados inicialmente fueron 0.55 cm h<sup>-1</sup> y 120 cm respectivamente; sin embargo, estos valores se modificaron al ajustar las curvas de avance y recesión medidas en el campo, como se observa en el Cuadro 1. Esto se debió a que con la preparación del suelo se modificó su porosidad, por lo cual el K<sub>s</sub> aumentó de 0.55 a 0.73 cm h<sup>-1</sup>; el θ<sub>s</sub> de 0.44 a 0.492; y el h<sub>f</sub> disminuyó de 120 a 76 cm.

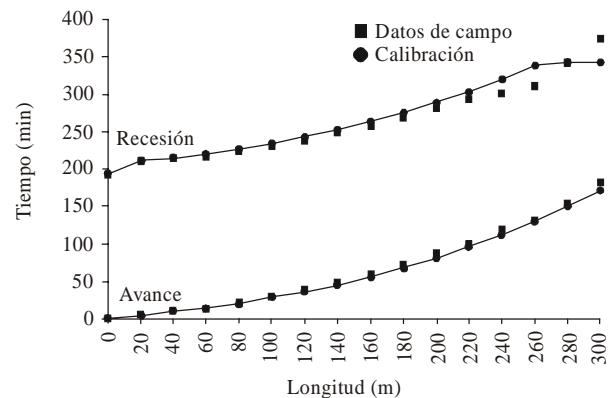
La calibración del modelo RIGRAV durante el primer riego de auxilio se hizo en el tratamiento N<sub>1</sub>T (Cuadro 1). Las curvas de avance y recesión de campo y ajustadas se muestran en la Figura 2.

Con los valores de K<sub>s</sub>, h<sub>f</sub> y θ<sub>s</sub> obtenidos en la calibración del riego de presiembra, se corrió el modelo RIGRAV para calcular el Qg que permitiera obtener los máximos valores de Ea, Er y CUC. El valor de la lámina de riego fue proporcionado por el modelo SIRTRE. El valor de K<sub>s</sub> en la presente calibración resultó un poco más de 61% del valor que se obtuvo en la calibración del riego de presiembra, y el valor de h<sub>f</sub> obtenido en esta calibración varió poco con respecto al de la calibración en el riego de

The K<sub>s</sub> and h<sub>f</sub> values considered initially were 0.55 cm h<sup>-1</sup> and 120 cm, respectively. However, these values were modified on adjusting the advance and recession curves measured in the field, as observed in Table 1. This was due to the fact that soil porosity changed as a result of its preparation, therefore K<sub>s</sub> increased from 0.55 to 0.73 cm h<sup>-1</sup>, θ<sub>s</sub> from 0.44 to 0.492, and h<sub>f</sub> dropped from 120 to 76 cm.

Calibration of the RIGRAV model during the first auxiliary irrigation was made with the N<sub>1</sub>T treatment (Table 1). The advance and recession curves in the field, as well as the fitted, are shown in Figure 2.

With K<sub>s</sub>, h<sub>f</sub> and θ<sub>s</sub> values obtained in the calibration of pre-planting irrigation, the RIGRAV model was used to calculate the Qg that would allow to obtain the highest values of Ea, Er, and CUC. The value of the water depth irrigation was provided by the SIRTRE model. K<sub>s</sub> value



**Figura 1. Curvas de avance y recesión en el riego de presiembra, tratamiento N<sub>2</sub>T. Parcela experimental de maíz, en el Valle del Carrizo, Sinaloa (ciclo O-I, 1997-1998).**

**Figure 1. Advance and recession curves in pre-planting irrigation, N<sub>2</sub>T treatment. Experimental maize plot, in the Valle del Carrizo, Sinaloa (F-W season, 1997-1998).**

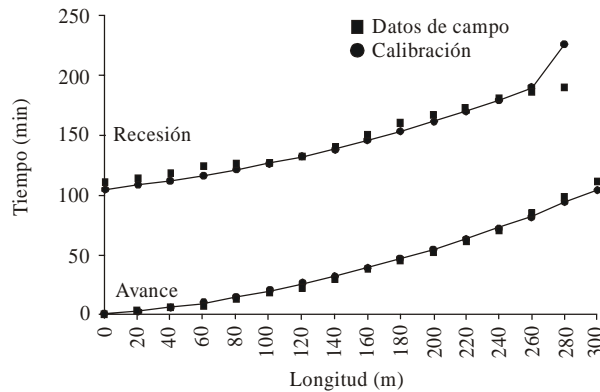


Figura 2. Curvas de avance y recesión en el primer riego de auxilio, tratamiento  $N_4T$ . Parcela experimental de maíz, en el Valle del Carrizo, Sinaloa (ciclo O-I, 1997-1998).

Figure 2. Advance and recession curves in the first auxiliary irrigation,  $N_4T$  treatment. Experimental maize plot in the Valle del Carrizo, Sinaloa (F-W season, 1997-1998).

presiembrera. Esto se debió probablemente a que la porosidad del suelo disminuyó por los reacomodos de los espacios porosos después del riego de presiembrera.

Con la aplicación del primer riego de auxilio el suelo comenzó a recuperar su porosidad normal, por consecuencia el  $K_s$  disminuyó de 0.73 a 0.44  $\text{cm h}^{-1}$ , el  $h_f$  disminuyó de 76 a 73 cm,  $\theta_s$  cambió de 0.492 a 0.484 y  $n$  de 0.0375 a 0.038.

La determinación del  $Q_g$  para el segundo auxilio se hizo corriendo nuevamente el modelo RIGRAV con los valores de  $K_s$ ,  $h_f$  y  $n$  obtenidos en la calibración del primer auxilio, para obtener los máximos valores de  $E_a$ ,  $E_r$  y CUC. Las curvas de avance y recesión correspondientes al segundo auxilio se obtuvieron con los datos medidos en el campo en el tratamiento  $N_4T$ . La calibración se presenta en el Cuadro 1, las curvas de avance y recesión de campo y ajustadas se muestran en la Figura 3.

En la calibración del segundo riego de auxilio los valores de  $K_s$  y  $h_f$  disminuyeron poco, el  $K_s$  pasó de 0.44 a 0.43  $\text{cm h}^{-1}$ ; y  $h_f$  de 73 a 75 cm, y mientras que  $n$  pasó de 0.038 a 0.039; esto se debió a que los cambios en la porosidad del suelo fueron mínimos.

El gasto por surco ( $Q_g$ ) para el tercer auxilio se obtuvo en el modelo RIGRAV con los valores de  $K_s$ ,  $h_f$  y  $n$  obtenidos en la calibración del segundo auxilio, para obtener los valores máximos de  $E_a$ ,  $E_r$  y CUC. Las curvas de avance y recesión correspondientes al tercer auxilio se obtuvieron con los datos medidos en el campo, la calibración se realizó en el tratamiento  $N_4T$  (Cuadro 1). Las curvas de avance y recesión de campo y ajustadas se muestran en la Figura 4.

La variación de los parámetros  $K_s$  y  $h_f$  en la calibración del tercer riego de auxilio fue muy similar a la del segundo, por lo que valores calibrados de  $K_s=0.43 \text{ cm h}^{-1}$ ,  $h_f=75 \text{ cm}$  y  $n$  igual 0.039 fueron aceptables. En este riego,

in the present calibration was a little above 61% of the value obtained in the calibration of pre-planting irrigation, and the  $h_f$  value obtained with this calibration did not vary much in relation to that registered in the calibration of pre-planting irrigation. This was probably due to the fact that soil porosity diminished as a result of the rearrangement of porous spaces after pre-planting irrigation.

With the application of the first auxiliary irrigation, soil began to recover its normal porosity, therefore  $K_s$  diminished from 0.73 to 0.44  $\text{cm h}^{-1}$ ,  $h_f$  decreased from 76 to 73 cm,  $\theta_s$  from 0.492 to 0.484, and  $n$  from 0.0375 to 0.038.

The determination of  $Q_g$  for the second auxiliary irrigation was made applying again the RIGRAV model with  $K_s$ ,  $h_f$  and  $n$  values obtained in the calibration with the first auxiliary irrigation, in order to obtain the maximum values of  $E_a$ ,  $E_r$ , and CUC. The advance and recession curves for the second auxiliary irrigation were obtained with the data registered in the field for the  $N_4T$  treatment. Calibration is shown in Table 1; the advance and recession curves in the field and the adjusted ones appear in Figure 3.

In the calibration of the second auxiliary irrigation,  $K_s$  and  $h_f$  values had a slight decrease.  $K_s$  went from 0.44 to 0.43  $\text{cm h}^{-1}$ , and  $h_f$  from 73 to 75 cm, while  $n$  increased from 0.038 to 0.039. This was because the changes in soil porosity were minimum.

The volume flow per furrow ( $Q_g$ ) for the third auxiliary irrigation was obtained in the RIGRAV model with  $K_s$ ,  $h_f$  and  $n$  values obtained in the calibration of the second auxiliary irrigation to reach the highest  $E_a$ ,  $E_r$ , and CUC values. The advance and recession curves for the third auxiliary irrigation were obtained with the data

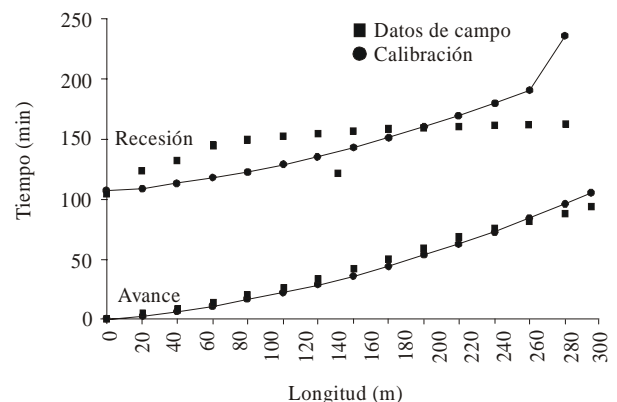
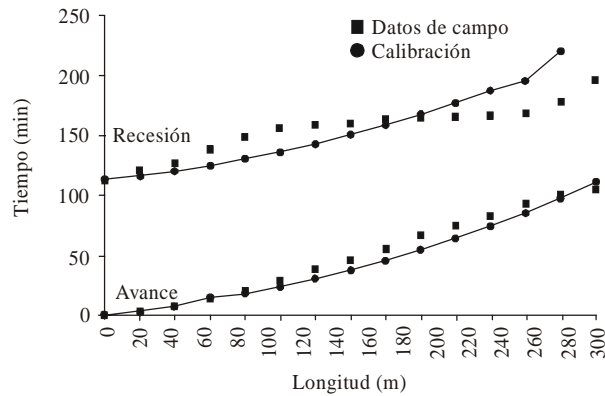


Figura 3. Curvas de avance y recesión en el segundo riego de auxilio, tratamiento  $N_4T$ . Parcela experimental de maíz, en el Valle del Carrizo, Sinaloa (ciclo O-I, 1997-1998).

Figure 3. Advance and recession curves in the second auxiliary irrigation,  $N_4T$  treatment. Experimental maize plot, in the Valle del Carrizo, Sinaloa (F-W season 1997-1998).





**Figura 4.** Curvas de avance y recesión en el tercer riego de auxilio, tratamiento N<sub>4</sub>T. Parcela demostrativa de maíz, en el Valle del Carrizo, Sinaloa (ciclo O-I, 1997-98).

**Figure 4.** Advance and recession curves in the third auxiliary irrigation, N<sub>4</sub>T treatment. Demonstration maize plot, in the Valle del Carrizo, Sinaloa (F-W season 1997-1998).

por el tamaño del cultivo y las condiciones de los surcos, se dificultó la medición precisa de las fases de riego, por lo que en los restantes riegos de auxilio ya no se midió el avance y la recesión.

La determinación del gasto unitario óptimo para los riegos de auxilio cuarto, quinto y sexto, se hizo con el modelo RIGRAV, proporcionando los valores de  $K_s$  y  $h_f$  obtenidos en el tercer riego de auxilio; los valores de lámina neta y el contenido de humedad inicial para cada riego fueron los valores reportados por el SIRTRE. En el Cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos aplicando la tecnología de riego tecnificado.

Durante el segundo riego de auxilio existió una variación en el gasto promedio de 2.4 a 2.8 lps m<sup>-1</sup>; por tal motivo se utilizó  $q_0$  igual a 2.55 lps m<sup>-1</sup>, que es el gasto promedio utilizado en la calibración. Los resultados obtenidos en la evaluación del riego (Ea y CUC), en los riegos de auxilio, cuarto, quinto y sexto fueron inferiores a 90%. Esto se debió a que en la calibración, al aumentar el gasto unitario, el valor de la Ea se incrementaba, sin

registered in the field, and calibration was made in the N<sub>4</sub>T treatment (Table 1). The advance and recession curves obtained in the field and the adjusted ones are shown in Figure 4.

The variation of  $K_s$  and  $h_f$  parameters in the calibration of the third auxiliary irrigation was very similar to that of the second one, therefore the calibrated values of  $K_s=0.43$  cm h<sup>-1</sup>,  $h_f=75$  cm, and  $n=0.039$  were acceptable. In this irrigation, because of the size of the crop and the conditions of furrows, it was difficult to carry out an accurate measurement of the irrigation phases, and for that reason in the remaining auxiliary irrigation applications, advance and recession were no longer measured.

The determination of the optimum unitary volume flow for the fourth, fifth and sixth irrigation was made with the RIGRAV model, providing the  $K_s$  and  $h_f$  values obtained in the third auxiliary irrigation. The values of the net water depth and the content of initial soil moisture for each irrigation were those reported by the SIRTRE model. Table 2 shows the results obtained by applying the modernized irrigation technology.

During the second auxiliary irrigation, the average volume flow varied from 2.4 to 2.8 lps m<sup>-1</sup>. For this reason  $q_0=2.55$  lps m<sup>-1</sup> was used, which is the average volume flow used in the calibration. The results obtained in the evaluation of irrigation (Ea and CUC), in the fourth, fifth, and sixth auxiliary irrigation applications were below 90%. This was because when increasing the unitary volume flow in the calibration, the Ea value increased, yet CUC tended to diminish, therefore with the calculated unitary volume flows, the values for Ea and CUC were acceptable (Table 2). With the purpose of evenly applying the water depth irrigation units in P, the unitary volume flow was estimated with the RIGRAV model, considering the  $K_s$  and  $h_f$  parameters calibrated in the modernized irrigation system and in accordance with the existing conditions ( $\theta_0, \theta_s, l, n, S$ , etc.). Irrigation efficiencies were very similar to those found by Rendón *et al.* (1997a),

**Cuadro 2. Resultados obtenidos en las calibraciones del riego tecnificado<sup>†</sup>.**  
**Table 2. Results obtained in the calibrations of modernized irrigation<sup>†</sup>.**

Riego	$K_s$	$h_f$	$q_0$ (lps m <sup>-1</sup> )	Ta (min)	Lr (m)	Lb (m)	TR (min)	Er	Ea	CUC
Presiembra	0.73	76	2.90	182.00	0.108	0.120	206.89	1.0	0.90	0.98
Primer	0.44	73	3.00	110.80	0.057	0.063	105.50	1.0	0.90	0.82
Segundo	0.43	75	2.55	93.66	0.053	0.059	104.24	1.0	0.89	0.82
Tercer	0.43	75	2.50	105.00	0.054	0.060	112.00	1.0	0.90	0.82
Cuarto	0.43	75	2.60	110.00	0.051	0.057	109.61	1.0	0.87	0.81
Quinto	0.43	75	2.60	90.00	0.046	0.051	98.07	1.0	0.81	0.79
Sexto	0.43	75	2.70	80.00	0.041	0.045	83.33	1.0	0.74	0.74

<sup>†</sup>  $K_s$  = Conductividad hidráulica;  $h_f$  = Succión en el frente de humedecimiento;  $q_0$  = Gasto unitario; Ta = Tiempo de avance; Lr = Lámina de riego; Lb = Lámina de riego bruta; TR = Tiempo de riego; Er = Eficiencia de riego; Ea = Eficiencia de aplicación; CUC = Coeficiente de uniformidad.

embargo, el CUC tendía a disminuir por lo que con los gastos unitarios calculados los valores indicados de  $E_a$  y CUC fueron aceptables (Cuadro 2). Con el propósito de aplicar uniformemente las láminas de riego en P, se determinó el gasto unitario con el modelo RIGRAV, considerando los parámetros  $K_s$  y  $h_f$  calibrados en el riego tecnificado y de acuerdo con las condiciones existentes ( $\theta_o$ ,  $\theta_s$ ,  $l$ ,  $n$ ,  $S$ , etc.). Las eficiencias de riego fueron muy similares a los encontrados por Rendón *et al.* (1997a), mientras que las de aplicación y uniformidad disminuyeron a medida que la lámina de riego fue disminuyendo.

Los resultados de la aplicación de los riegos de auxilio con tecnología tradicional se muestran en el Cuadro 3.

Para uniformar la aplicación de las láminas se hicieron aforos en distintas compuertas al momento de aplicar el riego, ajustando manualmente las compuertas o manipulando el hidrante para proporcionar el gasto por surco calculado previamente en cada uno de los riegos como se muestra en el Cuadro 3. La lámina de riego total aplicada en los tratamientos regados con la metodología de riego tecnificado fue de 45.4 cm, mientras que en los tratamientos en donde se utilizó el riego tradicional, la lámina de riego total fue de 72 cm. El ahorro obtenido con el riego tecnificado fue 37% ( $2660 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). Este ahorro permitiría adicionar el equivalente de 41.0 ha de maíz con riego tecnificado, a las 70 ha del sistema de baja presión, en la sección donde se estableció el experimento. El ahorro de agua fue similar al obtenido con el mismo sistema, en la parcela experimental de trigo establecida en el ciclo otoño-invierno 1995-1996, Valle del Carrizo, Sinaloa (Rendón *et al.*, 1997b).

En el Cuadro 4 se detalla la aplicación de los riegos de presembrado y de auxilio de cada tratamiento.

Los máximos rendimientos se obtuvieron en los tratamientos  $N_3$  y  $N_4$  los cuales no presentan un efecto significativo de la tecnología de riego, pero sí de la fertilización (Cuadro 5).

while those regarding application and uniformity diminished insofar as the water depth irrigation decreased.

The results of the auxiliary traditional irrigation applications are shown in Table 3.

In order to uniformize the application of water depths, water measurements were made in different outlets of the multi-outlet pipes at the moment of applying irrigation, manually adjusting the outlet and/or handling the hydrant to provide the volume flow per furrow previously calculated in each one of the irrigation applications, as shown in Table 3. The cumulative water depth applied in the treatments using the modernized irrigation methodology was 45.4 cm, while in those treatments in which traditional irrigation was used, the cumulative water depth was of 72 cm. The modernized irrigation system meant a water saving of 37% ( $2660 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). This saving could allow to add the equivalent of 41.0 ha of maize with modernized irrigation to the present 70 ha with the low pressure system, in the section where the experiment was set up. Water saving was similar to that obtained with

**Cuadro 3. Gastos unitarios de riego aplicados en los riegos de auxilio utilizando la tecnología de riego tradicional<sup>†</sup>.**

**Table 3. Unitary volume flows applied in auxiliary irrigation using the traditional technology<sup>†</sup>.**

Riego	$q_0$ (lps $\text{m}^{-1}$ )	TR (min)	Qg (lps/surco)	Lb (m)
Presiembra	2.90	206.80	2.18	0.12
Primer auxilio	2.20	227.00	1.60	0.10
Segundo auxilio	2.00	250.00	1.50	0.10
Tercer auxilio	1.90	263.00	1.42	0.10
Cuarto auxilio	1.90	263.00	1.42	0.10
Quinto auxilio	1.80	278.00	1.35	0.10
Sexto auxilio	1.65	303.00	1.24	0.10

<sup>†</sup>  $q_0$  = Gasto unitario; TR = Tiempo de riego; Qg = Gasto por surco; Lb = Lámina bruta.

**Cuadro 4. Tiempo de aplicación de los riegos y de la fertilización líquida.**

**Table 4. Irrigation and liquid fertilization application times.**

Tratamientos <sup>†</sup>	Presiembra <sup>‡</sup> (DAS)	Riegos de auxilio (DDS) <sup>§</sup>						Aplicación de la fertilización líquida (L)		
		1	2	3	4	5	6	Primera	Segunda	Tercera
$N_1T$	20	46	78	100	117	134	149			
$N_2T$	19	46	78	100	117	134	149			
$N_3T$	19	47	77	100	117	134	149	897	1100	1563
$N_4T$	19	47	77	100	117	134	149	822	1686	2016
$N_1P$	19	46	77	98	116	133	148			
$N_2P$	20	46	77	98	116	133	148			
$N_3P$	19	47	76	98	116	133	148	897	1100	1563
$N_4P$	19	47	76	98	116	133	148	822	1686	2016

<sup>†</sup>  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  y  $N_4$  = 0, 240, 400, 500 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N; P y T = Riego tradicional y tecnificado respectivamente.

<sup>‡</sup> DAS = Días antes de sembrar.

<sup>§</sup> DDS = Días después de sembrar.

**Cuadro 5. Rendimientos y volúmenes de agua aplicada en cada tratamiento.****Table 5. Yields and water volumes applied in each treatment.**

Tratamientos <sup>†</sup>	Rendimientos (Mg ha <sup>-1</sup> )		Volumen bruto (m <sup>3</sup> )	
	P <sup>¶</sup>	T <sup>§</sup>	P	T
N <sub>1</sub>	3.25 a <sup>b</sup>	3.00 a	7200	4540
N <sub>2</sub>	9.20 b	9.50 b	7200	4540
N <sub>3</sub>	11.75 c	11.60 c	7200	4540
N <sub>4</sub>	11.50 c	11.50 c	7200	4540

<sup>†</sup> N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub> y N<sub>4</sub> = 0, 240, 400 y 500 kg N ha<sup>-1</sup>.

<sup>¶</sup> Tecnología de riego tradicional.

<sup>§</sup> Tecnología de riego tecnificado.

<sup>b</sup> Las letras distintas en una misma columna denotan tratamientos significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

## CONCLUSIONES

La metodología de manejo del agua de riego tecnificado es una alternativa para los usuarios que cuentan con sistemas de baja presión o para aquellos que pudiesen adaptarlo a sus fuentes de abastecimiento, principalmente por el ahorro que representa en la aplicación de volúmenes de agua de riego y el ahorro en la aplicación de los fertilizantes sólidos.

La metodología de calibración del riego tecnificado permitió mostrar las bondades del SIRTRE y el RIGRAV en el ahorro de agua, siendo ésta una alternativa que pudiera utilizarse en otros Distritos y Unidades de Riego del país.

Al combinar las tecnologías de riego (tradicional y tecnificado) con las mismas dosis de nitrógeno, no se obtuvieron diferencias significativas, pero el rendimiento de los tratamientos con las dosis calculada mediante el empleo de un enfoque sistémico fue superior al de aquellos que recibieron las dosis tradicional.

El volumen ahorrado con riego tecnificado respecto a la tecnología tradicional, sin detrimento de los rendimientos, permitiría sembrar una superficie mayor. En caso de riego con agua bombeada de pozo profundo o de otra fuente, el riego tecnificado se traduce en ahorros significativos de energía y consecuentemente en reducción del costo del cultivo y la obtención de mayores utilidades.

## LITERATURA CITADA

- Aldama R. A. 1998. Investigación aplicada en los programas de tecnificación del riego. *In: Memorias*. 3er. Simposium Internacional de Fertirrigación. FIRCO. León, Guanajuato, México. pp: 9-16.
- Etchevers B., J. 1997. Evaluación del estado nutrimental del suelo y de los cultivos fertirrigados. *In: Memorias*. 2do. Simposium Internacional de Fertirrigación. FIRCO. Querétaro, Querétaro, México. pp: 51-60.
- Fuentes R., C. 1997. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. IMTA. Jiutepec, Morelos, México. pp: 1-3 a 1-12.

the same system in the experimental wheat plot established in the Fall-Winter season 1995-1996, in Valle del Carrizo, Sinaloa (Rendón *et al.*, 1997b).

Table 4 shows in detail the application of pre-planting and auxiliary irrigation for each treatment.

The highest yields were obtained in N<sub>3</sub> and N<sub>4</sub> treatments in which the irrigation technology did not have a significant effect; however the fertilization technology did affect maize's yields (Table 5).

## CONCLUSIONS

The methodology for the modernized irrigation water handling is an alternative for the users of low pressure systems or for those who might adapt them to their water supply sources, mainly because of saving in irrigation water and solid fertilizers.

The calibration methodology of modernized irrigation allowed to show the advantages of the SIRTRE and RIGRAV models in water saving, which could be an alternative to be used in other Districts and Irrigation Units in the country.

When combining irrigation technologies (traditional and modernized) with the same nitrogen rates, the differences between them were not significant, but treatment yields with the rate calculated through the use of a systemic approach was above that those who received the traditional nitrogen rates.

The water volume saved with modernized irrigation, compared to the traditional technology, without a decrease of yield, could allow to sow a larger surface. In the case of irrigation with water pumped from a deep well or another source, modernized irrigation could mean a significant saving of energy, and, therefore, a reduction of crop costs and higher earnings.

—End of the English version—



- Green W. A. and G. A. Ampt 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. 1992. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia de los campos experimentales del Sur de Sonora. Centro de Investigaciones del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora, México. pp: 91-106.
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1996. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Informe final del proyecto RD-9612 Pronóstico de Riego en Tiempo Real en el DR 076, Valle del Carrizo, Sinaloa, México.
- Lewis, M. R., and W. E. Milne. 1938. Analysis of border irrigation. *Transactions of the ASAE.* 19: 267-272.
- Rendón P., L., J. Ortiz R. y R. Acosta H. 1991. Efficient water use in irrigated wheat. *In: Proceedings of the 1991 National Conference on Irrigation and Drainage Engineering.* ASCE. Honolulu, Hawaii. pp: 380-389.

- Rendón P., L., C. Fuentes R. y G. Magaña S. 1995. Diseño simplificado de riego por gravedad. *In*: Memorias del VI Congreso Nacional de Irrigación. Chapingo, México. pp: 385-391.
- Rendón P., L., C. Fuentes R. y G. Magaña S. 1997a. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. IMTA. Jiutepec, Morelos, México. pp: 1-77 a 1-89.
- Rendón P. L., P. Pacheco H., J. L. Machado C., E. Peña P. 1997b. La fertirrigación en baja presión y tuberías con compuertas. *In*: Memorias. 2do. Simposium Internacional de Fertirrigación. FIRCO. Querétaro, Querétaro, México. pp: 37-45.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics* 1:318-333.
- Saint-Venant, A. J. C. 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des mareés dans leur lits. *Comptes Rendus des Séances del' Académie des Sciences*. 73: 147-154 et 237-240.