

# PRODUCCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO (*Zea mays* L.) EN TRES SISTEMAS DE IRRIGACIÓN EN LA COMARCA LAGUNERA DE COAHUILA Y DURANGO, MÉXICO

## FORAGE MAIZE (*Zea mays* L.) PRODUCTION IN THREE IRRIGATION SYSTEMS IN THE COMARCA LAGUNERA OF COAHUILA AND DURANGO, MÉXICO

J. Alfredo Montemayor-Trejo<sup>1\*</sup>, J. Luis Lara-Míreles<sup>2</sup>, J. Luis Woo-Reza<sup>2</sup>, Juan Munguía-López<sup>3</sup>, Miguel Rivera-González<sup>4</sup>, Ramón Trucíos-Caciano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Torreón, Coahuila, México. (montemayorja@hotmail.com). <sup>2</sup>Facultad de Agronomía Universidad Autónoma de San Luis Potosí. km 14.5, Carretera San Luis Potosí-Matheualla Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez. 78321. San Luis Potosí, San Luis Potosí. México. <sup>3</sup>Centro de Investigación de Química Aplicada. Boulevard Enrique Reyna 140. 25253. Saltillo, Coahuila, México. <sup>4</sup>CENID-RASPA INIFAP. km 6.5 margen derecha Canal Sacramento Gómez Palacio, Durango. México.

### RESUMEN

En la Comarca Lagunera, México, la mayor limitante para la producción de forrajes es la disponibilidad del agua. Su déficit para un equilibrio en la recarga del acuífero es 450 millones m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>), por lo cual es necesario evaluar métodos de riego que aumenten la productividad del agua. El objetivo de esta investigación fue evaluar tres sistemas de irrigación: riego por goteo sub superficial (RGS), pivote central (PC) y gravedad (G) en maíz forrajero (*Zea mays* L.). Se obtuvieron modelos de consumo de agua aplicada, índice de área foliar (IAF), producción de materia seca (MS) y productividad del agua (PA). La investigación se realizó en la Comarca Lagunera, Municipio de Torreón, Coahuila, México, en 2006 y 2007 en los ciclos de primavera-verano, en dos localidades: 1) la pequeña propiedad Campo Sagrado y 2) la empresa VERMIORGANIC, S.P.R. de R.L. En los dos sitios la siembra se realizó en seco con el híbrido Aspros 900, en una densidad de 90 000 plantas ha<sup>-1</sup>. El agua aplicada se midió con un medidor volumétrico, y la evaporación con un tanque evaporímetro tipo A y el IAF con el equipo LAI 2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EE.UU.). El método de regresión lineal se usó para obtener los modelos, y las pendientes y valores medios se compararon con la prueba t de Student ( $p \leq 0.05$ ). La producción de MS y PA fue mayor ( $p \leq 0.05$ ) con RGS que con PC y G. Con los modelos se calculó un consumo promedio de 0.51, 0.56 y 0.73 cm d<sup>-1</sup> para RGS, PC y G ( $R^2 \geq 0.97$ ). Con un modelo polinomial para IAF se calculó un crecimiento diario de 0.25, 0.15 y 0.10 para RGS, PC y G

### ABSTRACT

In the Comarca Lagunera, México, water availability is the most important limiting factor for forage production. Its deficit for balance in recharging the aquifer is 450 million m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>); therefore, it is necessary to evaluate irrigation methods which may increase water productivity. The objective of this research was to evaluate three irrigation systems: subsurface drip irrigation (SDI), center pivot (CP), and gravity (G) on forage maize (*Zea mays* L.). Variables obtained were consumption models of applied water, foliar area index (FAI), dry matter production (DM), and water productivity (WP). The study was carried out in the Comarca Lagunera, municipality of Torreón, Coahuila, México, in the spring-summer cycle of the years 2006 and 2007, at two locations: 1) in the small property Campo Sagrado, and 2) the Company VERMIORGANIC S.P.R. of R.L. At the two sites, dry sowing was carried out, using Aspros 900 hybrid plants at a density of 90 000 plants ha<sup>-1</sup>. The water applied was measured with a volumetric meter, and evaporation with a class A pan evaporation, and FAI with a LAI 2000 Plant Canopy Analyzer Equipment (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, USA). Linear regression method was used in order to obtain the models; and the slopes and mean values were compared with the Student's t test ( $p \leq 0.05$ ). The production of DM and WP was higher ( $p \leq 0.05$ ) with SDI than with C and G. Based on the models, an average consumption of 0.51, 0.56, and 0.73 cm d<sup>-1</sup> was calculated for SDI, CP, and G ( $R^2 \geq 0.97$ ). With a polynomial model for FAI daily increase of 0.25, 0.15, and 0.10 for SDI, CP, and G ( $R^2 \geq 0.96$ ) was calculated. We conclude that the amount of applied water was lower in the subsurface drip irrigation system; in the

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2011. Aprobado: enero, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 46: 267-278. 2012.

( $R^2 \geq 0.96$ ). Se concluye que la cantidad de agua aplicada fue menor en el sistema de riego por goteo sub superficial y en los tres sistemas de riego la aplicación del agua no supero a la evaporación del tanque tipo A. El IAF fue descrito por un modelo polinomial de segundo orden.

**Palabras clave:** maíz, riego sub superficial, pivote central.

## INTRODUCCIÓN

En México, en el ciclo agrícola 2008/2009, se cosecharon 2 949 967 ha, de las cuales 403 385 ha corresponden a la producción de forrajes, y la superficie para maíz forrajero (*Zea mays* L.) fue 28 212 ha (CONAGUA, 2010). En la Comarca Lagunera de los estados de Coahuila y Durango en el ciclo agrícola 2009/2010 se establecieron 196 839 ha incluyendo los cultivos perennes; para alfalfa (*Medicago sativa* L.), maíz y sorgo (*Sorghum vulgare*) la superficie fue 96 385 ha (El Siglo de Torreón, 2011). En estas superficies de riego un problema principal es la disponibilidad del agua, agudizado por el constante y progresivo abatimiento de los niveles freáticos de los acuíferos. De acuerdo con CONAGUA (2010) de los 653 acuíferos, 101 están sobreexplotados y en el acuífero principal de la Comarca Lagunera hay una recarga natural de 800 millones  $\text{m}^3$  ( $\text{Mm}^3$ ) y su extracción aproximada es 1252  $\text{Mm}^3$  con un abatimiento promedio de 1.3 m por año (CONAGUA, 2004).

Por tanto, es necesario evaluar y adoptar nuevas tecnologías del riego donde el principal indicador para su adopción sea la productividad del agua (PA) expresada como kg de materia seca (MS)  $\text{m}^{-3}$  de agua aplicada,  $\text{kg mm}^{-1}$  o g por unidad de superficie por mm de agua ( $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ) (Howell *et al.*, 1998; Marozzi *et al.*, 2005). En los distritos de riego en México este indicador para el periodo de 1994 a 2008 es menor a 1.6  $\text{kg m}^{-3}$  (CONAGUA, 2010); sin embargo, este valor puede aumentar a 2.0  $\text{kg m}^{-3}$  en alfalfa y 4.0  $\text{kg m}^{-3}$  en maíz forrajero (Montemayor *et al.*, 2007; Montemayor *et al.*, 2010). Este indicador varía entre regiones y está directamente afectado por la fertilidad del suelo, variedad, fechas de siembra, densidades de población, prácticas culturales, sistema de riego y clima. Su valor debe ser mejorado considerablemente porque la competitividad del agua en la agricultura aumenta con otros sectores (Howell, 2001; Ahmad *et al.*, 2004; Colaizzi *et al.*, 2004).

three irrigation systems, water application did not surpass the evaporation of class A pan evaporation. The FAI was described by a second-degree polynomial model.

**Key words:** maize, subsurface irrigation, center pivot.

## INTRODUCTION

In the agricultural cycle of 2008/2009 in México, 2 949 967 ha were harvested, 403 385 ha of which correspond to forage production, and the area for forage maize (*Zea mays* L.) was 28 212 ha (CONAGUA, 2010). In the Comarca Lagunera of the states of Coahuila and Durango, in the agricultural cycle 2009/2010, 196 839 ha were established including perennial crops; the surface for alfalfa (*Medicago sativa* L.), maize, and sorghum (*Sorghum vulgare*) was 96 385 ha (El Siglo de Torreón, 2011). In these irrigation areas one principal problem is water availability, made worse by constant and progressive exhaustion of the phreatic levels of the aquifers. According to CONAGUA (2010), 101 of the 653 aquifers are overexploited, and in the main aquifer of the Comarca Lagunera there is a natural recharging of 800 million  $\text{m}^3$  ( $\text{Mm}^3$ ), and its approximate extraction is 1252  $\text{Mm}^3$  with an average decrease of 1.3 m per year (CONAGUA, 2004).

Therefore, it is necessary to evaluate and adopt new irrigation technologies, where the main indicator for its adoption may be water productivity (WP) expressed as kg of dry matter (DM)  $\text{m}^{-3}$  of applied water,  $\text{kg mm}^{-1}$  or g per surface unit by mm of water ( $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ) (Howell *et al.*, 1998; Morozzi *et al.*, 2005). In the irrigation districts in México, this indicator for the period from 1994 to 2008 is lower than 1.6  $\text{kg m}^{-3}$  (CONAGUA, 2010); however, this value may increase to 2.0  $\text{kg m}^{-3}$  in alfalfa and to 4.0  $\text{kg m}^{-3}$  in forage maize (Montemayor *et al.*, 2007; Montemayor *et al.*, 2010). This indicator varies between regions and is directly affected by soil fertility, variety, sowing dates, population density, cultivation practices, irrigation system, and climate. Its value must be improved considerably because water competitiveness in agriculture increases with other sectors (Howell, 2001; Ahmad *et al.*, 2004; Colaizzi *et al.*, 2004).

Thus, for the WP indicator: 1) there are WP values between 1.5 and 2  $\text{kg m}^{-3}$  in irrigation by gravity (Morozzi *et al.*, 2005; Montemayor *et al.*, 2007), 2) in the state of Yucatán, the increment of WP in

Así, para el indicador PA: 1) en riego por gravedad hay valores de PA entre 1.5 y 2 kg m<sup>-3</sup> (Morozzi *et al.*, 2005; Montemayor *et al.*, 2007); 2) en el estado de Yucatán, el aumento de la PA en pivote central con respecto al obtenido en temporal y riego por surcos fue mayor a 2 Mg ha<sup>-1</sup> y 1 Mg ha<sup>-1</sup> (Mena *et al.*, 2010); 3) la producción de cacahuete (*Arachis hypogaea*) fue más alta con riego por goteo sub superficial (RGS) respecto al riego por aspersión, pero en la producción de maíz no hubo diferencia estadística (Adamsen, 1989 y 1992); 4) en Hawaii, el rendimiento anual de alfalfa fue 26.8 Mg ha<sup>-1</sup> con riego por RGS y 26.3 Mg ha<sup>-1</sup> con el método de aspersión (Bui y Osgood, 1995); 5) en siete cortes de alfalfa la PA fue 2.04 y 1.33 kg m<sup>-3</sup> para RGS y gravedad (Montemayor *et al.*, 2010); 6) en Virginia (EE. UU.) la producción de maíz dulce fue 9.5 Mg ha<sup>-1</sup> con RGS y 8.3 Mg ha<sup>-1</sup> con riego por aspersión, con un 14 % de aumento (Phene y Beale, 1976); 7) la PA fue más alta en RGS *vs* sistema lateral de aplicación de baja energía en la producción de sorgo para grano (Colaizzi *et al.*, 2004).

Con RGS se puede reducir el volumen de agua en 40 % y evitar déficit hídricos en el suelo debido a que la aplicación es de bajo volumen, se satisfacen las demandas diarias de agua por el cultivo y se induce una mayor producción de MS, porque hay una relación lineal entre ambas variables (Camp, 1998). Por tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar tres sistemas de riego: goteo sub superficial, pivote central y como referencia el sistema por gravedad, y su efecto en la producción de maíz forrajero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La Comarca Lagunera está entre 101° 41' y 104° 61' O, y 24° 59' y 26° 53' N; tiene una superficie de 47 887 km<sup>2</sup> con una altitud media de 1100 m, con una extensión montañosa y una superficie plana donde se localiza el área agrícola. Su clima es seco desértico, con lluvias en verano e invierno fresco, la precipitación pluvial media anual es 258 mm y la evaporación media anual es 2000 mm, por lo cual la relación precipitación-evaporación es 1:10; la temperatura media anual es 21 °C con máxima de 33.7 °C y mínima 7.5 °C. El periodo de temperaturas bajas o heladas se presentan de noviembre a marzo, aunque en algunas ocasiones se presentan tempranamente en octubre y tardíamente en abril (García, 1973). El Distrito de riego tiene un volumen de agua disponible promedio de 2530 Mm<sup>3</sup>, de los cuales 1278 Mm<sup>3</sup> son fuentes de agua superficiales y 1252 Mm<sup>3</sup> fuentes subterráneas. Los

center pivot with respect to rainfed surface and to the one obtained from irrigation by crop rows was higher than 2 Mg ha<sup>-1</sup> and 1 Mg ha<sup>-1</sup> (Mena *et al.*, 2010); 3) peanut (*Arachis hypogaea*) production was higher with subsurface drip irrigation (SDI) compared to sprinkler irrigation, but in maize production there was no statistical difference (Adamsen, 1989 and 1992); 4) in Hawaii, annual yield of alfalfa was 26.8 Mg ha<sup>-1</sup> with SDI irrigation, and 26.3 Mg ha<sup>-1</sup> using the sprinkler irrigation (Bui and Osgood, 1995); 5) in seven alfalfa cuts, WP was 2.04 and 1.33 kg m<sup>-3</sup> for SDI and gravity (Montemayor *et al.*, 2010); 6) in Virginia (USA) sweet maize production was 9.5 Mg ha<sup>-1</sup> using SDI and 8.3 Mg ha<sup>-1</sup> with sprinkler irrigation, with an increment of 14 % (Phene and Beale, 1976); 7) WP was higher in SDI with respect to low-energy side application in grain sorghum production (Colaizzi *et al.*, 2004).

With SDI, water volume can be reduced by 40 %, and water stress in soil may be avoided due to the fact that the application is of low volume, daily crop water demands are satisfied, and greater DM production is induced because there is a linear relationship between both variables (Camp, 1998). Therefore, the objective of the present research was to evaluate three irrigation systems: subsurface drip irrigation, center pivot, and as reference, the gravity system, and its effect on forage maize production.

## MATERIALS AND METHODS

The Comarca Lagunera is situated between 101° 41' and 104° 61' W and 24° 59' and 26° 53' N; it has an area of 47 887 km<sup>2</sup> with mean altitude of 1100 m with mountainous extension and a flatland, where the agricultural area is located. Its climate is dry, desert-like, with rainfalls in the summer and cool winters; annual mean precipitation is 258 mm and annual mean evaporation 2000 mm, precipitation-evaporation relationship being 1:10; annual mean temperature is 21 °C with a maximum of 33.7 °C and a minimum of 7.5 °C. The period of low temperatures or crop frosts is from November to March, though sometimes it occurs early in October and late in April (García, 1973). The irrigation district has an available water volume of 2530 Mm<sup>3</sup> on average, 1278 Mm<sup>3</sup> of which are sources of surface water, and 1252 Mm<sup>3</sup> groundwater sources. Surface water volumes are exploited in agriculture using reservoirs where those of Lázaro Cárdenas and Francisco Zarco are outstanding, having total storage capacity of 3343 and 438 Mm<sup>3</sup>; both store water of the Nazas River (SAGARPA, 2006). The approximate distribution is

volúmenes de agua superficial son aprovechados en la agricultura mediante reservorios entre los que destacan las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, con una capacidad total de almacenamiento de 3343 y 438 Mm<sup>3</sup>; ambas almacenan agua del río Nazas (SAGARPA, 2006). La distribución aproximada es 86.48 % para la agricultura, 2.81 % para la ganadería y el resto para otras actividades.

Esta investigación se realizó durante 2006 y 2007 en los ciclos Primavera-Verano en dos localidades: 1) la Pequeña Propiedad Campo Sagrado localizada en el km 9.3 de la carretera Torreón-Mieleras; 2) la empresa VERMIORGANIC, S.P.R. de R.L. a un costado de la autopista Torreón-San Pedro km 11.5, Municipio de Torreón, Coahuila. La producción de maíz forrajero se evaluó en tres sistemas de riego: goteo sub superficial (RGS), pivote central (PC) y por gravedad. En el 2006 se evaluó la producción en el sistema de PC y en el 2007 el riego por gravedad y RGS. Para RGS se usó una superficie de 0.75 ha, con separación de 90 cm entre cintas de riego, emisores espaciados a 30 cm con un gasto de 3 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> enterradas a una profundidad promedio de 40 cm y el espesor de la cinta fue 0.250 mm. La siembra en seco en ambos ciclos se realizó en mayo, con densidad de 90 000 plantas ha<sup>-1</sup> del híbrido Aspros 900 (As-900) en surcos con 0.38 m de espaciamiento. Para controlar arvenses se aplicó el herbicida pre-emergente Atrazina (6-cloro-N3-etil-N4-isopropil-1, 3, 5-tiazina-2, 4 diamina) y 1.5 L de Pendimetalina en 200 L agua ha<sup>-1</sup>. El híbrido AS-900 es apropiado para siembras de 90 000 a 112 000 plantas ha<sup>-1</sup>, por su rendimiento alto de forraje seco, proporción de grano y precocidad alta (Carrillo *et al.*, 2003). Las variables evaluadas fueron: evaporación de un tanque tipo A, lámina de riego aplicada, índice de área foliar (IAF), altura de planta, peso del elote, rendimiento de MS y PA. La lámina de riego en el sistema de gravedad fue evaluada con sifones calibrados; en el sistema RGS se usó la ecuación de (Boswell, 1990) modificada al sistema métrico decimal (Montemayor *et al.*, 2010):

$$T_r = [(S * E_t) / (Q * E_a)]$$

donde  $T_r$  = tiempo de riego (h),  $S$  = separación de cintas (m),  $E_t$  = evapotranspiración del cultivo (m d<sup>-1</sup>),  $Q$  = gasto de la cinta por metro lineal (m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>), y  $E_a$  = eficiencia de aplicación.

La evapotranspiración del cultivo se evaluó con la evaporación de un tanque tipo A multiplicada por un coeficiente de 0.75 (Doorenbos y Pruitt, 1974; Locascio y Smajstrla, 1995). En el sistema de PV se realizaron pruebas de lámina precipitada en función de la velocidad de avance del pivote y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$L = \{1.85 + 0.15(X)\} / E_a$$

86.48 % for agriculture, 2.81 % for cattle production, and the rest for other activities.

This study was carried out during the years 2006 and 2007 in the spring- summer cycle at two sites: 1) Pequeña Propiedad Campo Sagrado, located at 9.3 km of the road Torreón-Mieleras; 2) at the company VERMIORGANIC, S.P.R. de R.L. on one side of the Torreón-San Pedro highway, km 11.5, municipality of Torreón, Coahuila. Forage maize production was evaluated in three irrigation systems: subsurface drip irrigation (SDI), center pivot (CP), and gravity. In 2006, production of the CP system was assessed, and in 2007 irrigation by gravity and RGS. An area of 0.75 ha was utilized for SDI with separation of 90 cm between 0.250 mm-thick irrigation tapes; spacing between emitters at 30 cm distance with a discharge of 3 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> were buried at mean depth of 40 cm. Dry sowing was done in May for both cycles at a density of 90 000 Aspros 900 hybrid (As-900) plants ha<sup>-1</sup>; spacing between furrows was 0.38 m. In order to control weeds pre-emergent herbicide, Atrazina (6-chlor-N3-ethyl-N4-isopropyl- 1, 3, 5-thiazine-2, 4 diamine) and 1.5 L of Pendimetalina in 200 L of water ha<sup>-1</sup> were applied. Hybrid AS-900 is appropriate for sowing of 90 000 to 112 000 plants ha<sup>-1</sup> because of its high dry forage yield, grain proportion, and high precociousness (Carrillo *et al.*, 2003). The assessed variables were: evaporation of a type-A tank, sheet of water applied, foliar area index (FAI), plant height, cob weight, DM yield, and WP. The sheet of water applied in the gravity system was evaluated with siphons; in the SDI system Boswell's equation was used (Boswell, 1990), modified to the decimal metric system (Montemayor *et al.*, 2010):

$$T_r = [(S * E_t) / (Q * E_a)]$$

where  $T_r$  = irrigation time (h),  $S$  = separation of tapes (m),  $E_t$  = crop evapotranspiration (m d<sup>-1</sup>),  $Q$  = tape discharge per linear meter (m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>), and  $E_a$  = application efficiency.

Crop evapotranspiration was assessed based on evaporation of a type-A tank, multiplied by a coefficient of 0.75 (Doorenbos and Pruitt, 1974; Locascio and Smajstrla, 1995). In the CP system, tests of precipitate water were made, according to speed of the pivot, and the following equation was obtained:

$$L = \{1.85 + 0.15(X)\} / E_a$$

where  $L$  = applied water requirement (cm),  $X$  = percentage of speed (%), and  $E_a$  = application efficiency (0.8).

The FAI expressed as a dimensionless relation of foliage m<sup>2</sup> per m<sup>2</sup> of soil surface was weekly measured, using the LAI

donde  $L$  = lámina aplicada (cm),  $X$  = porcentaje de avance (%), y  $E_a$  = eficiencia de aplicación (0.8).

El IAF expresado como la relación adimensional de los  $m^2$  de follaje por  $m^2$  de superficie de suelo, se midió semanalmente con el equipo LAI 2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EE.UU.) Para obtener los modelos de aplicación de lámina de agua en cada sistema de irrigación, se usó el método de regresión lineal simple con los días después de siembra (DDS) como variable independiente *vs* lámina de agua aplicada acumulada como variable dependiente. El modelo fue:

$$Y_{ij} = \beta_1 X_i + \beta_0 + e_{ij}$$

donde  $Y_j$  = lámina aplicada (cm),  $X_i$  = días después de siembra,  $\beta_1$  = pendiente de la recta ( $cm\ d^{-1}$ ),  $\beta_0$  = intercepto en el origen (mm), y  $e_{ij}$  = errores del modelo con media cero y varianza uno.

Para diferenciar los modelos estadísticamente se compararon los parámetros  $\beta_1$  pendiente de la recta o lámina diaria mediante una prueba t de Student ( $p \leq 0.05$ ). El mismo método se usó para comparar los modelos de crecimiento de IAF, donde DDS fue la variable independiente y el IAF la variable dependiente. En estos modelos sólo se consideró para su comparación el efecto lineal  $\beta_1$  de cada modelo y no el efecto cuadrático, porque no hubo significancia estadística entre los modelos obtenidos. Para la altura de planta, peso de elote, rendimiento de MS y PA, las medias se compararon con la prueba t de Student ( $p \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Modelos de agua aplicada y evaporación

La evaporación acumulada desde la siembra hasta 85 DDS fue 80 cm (Figura 1) en el modelo de regresión obtenido, y se calculó un valor promedio de evaporación de  $0.96\ cm\ d^{-1}$  ( $R^2=0.99$ ). La evaporación diaria es un indicador fuerte en las demandas del riego porque induce una mayor evapotranspiración y es afectada por las condiciones del clima; además es un componente esencial en el balance del agua disponible para la programación del riego (Prasanna *et al.*, 2008).

En el sistema de gravedad se aplicaron seis riegos (1, 7, 18, 39, 53 y 73 DDS), con una lámina total acumulada de 62 cm. Con el modelo de regresión se calculó un consumo promedio de  $0.73\ cm\ d^{-1}$  ( $R^2=0.98$ ) y también la relación evapotranspiración-evaporación (Et/Ev), donde Et es la lámina aplicada

2000 Plant Canopy Analyzer equipment (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, USA). In order to obtain the models of water requirement application in every irrigation system, the method of simple linear regression was employed with days after sowing (DAS) as independent variable *vs*. accumulated applied water requirement as dependent variable. The model was:

$$Y_{ij} = \beta_1 X_i + \beta_0 + e_{ij}$$

where  $Y_j$  = applied water requirement (cm),  $X_i$  = days after sowing,  $\beta_1$  = slope of the straight line ( $cm\ d^{-1}$ ),  $\beta_0$  intercept in origin (mm), and  $e_{ij}$  = errors of the model with mean zero and variance one.

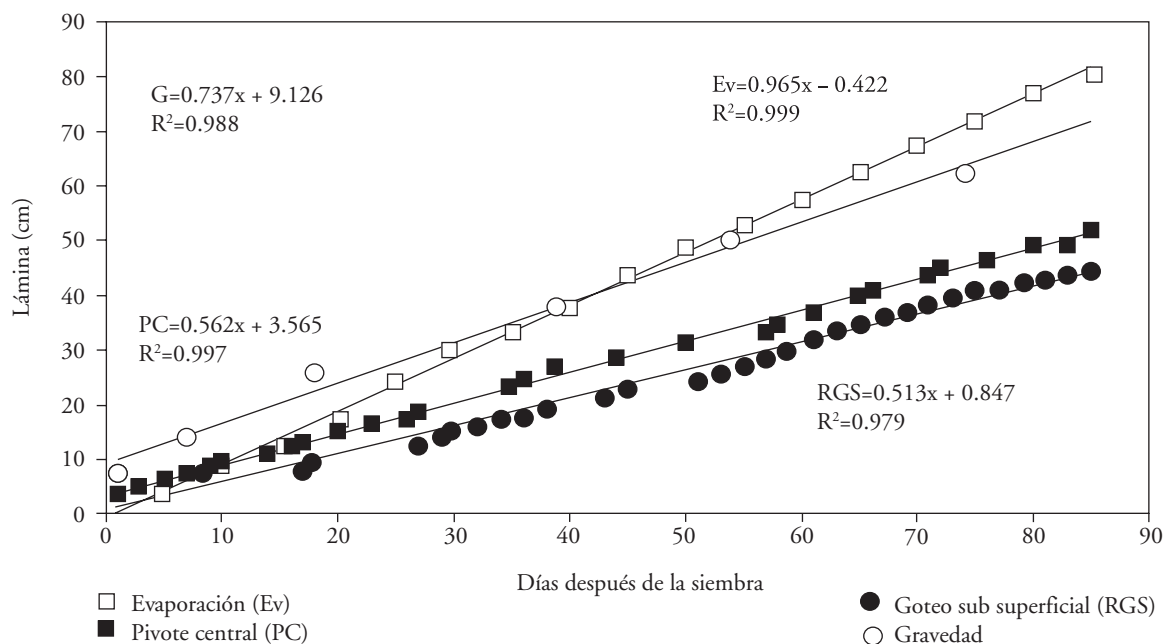
In order to statistically differentiate the models,  $\beta_1$  parameters, slope of the straight line, or daily water requirement were compared by means of a Student t test ( $p \leq 0.05$ ). The same method was used to compare the growth models of FAI, where DAS was the independent variable, and FAI the dependent variable. In these models only the linear effect  $\beta_1$  of each model was considered for their comparison, the square effect was not taken into account, because there was no statistical significance among the obtained models. For plant height, weight of corn cob, DM and WP yield, the means were compared with the Student's t test ( $p \leq 0.05$ ).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Models of applied water and evaporation

In the obtained regression model, the accumulated evaporation, starting from sowing until 85 DAS, was 80 cm (Figure 1), and an average evaporation value of  $0.96\ cm\ d^{-1}$  ( $R^2=0.99$ ) was calculated. Daily evaporation is an important indicator in irrigation demands, because it induces higher evapotranspiration and is affected by climatic conditions; furthermore, it is an essential component in the balance of water, available for irrigation programming (Prasanna *et al.*, 2008).

In the gravity system, six irrigations were applied (1, 7, 18, 39, 53, and 73 DAS) with an accumulated total water requirement of 62 cm. A mean consumption of  $0.73\ cm\ d^{-1}$  ( $R^2=0.98$ ) was calculated with the regression model and also the evapotranspiration-evaporation relationship (Et/Ev), where Et is the applied water sheet, being 0.77; this value is the crop coefficient (Kc) and indicates level in which the amount of water applied fulfills the crop



**Figura 1. Modelos de agua aplicada en la producción de maíz forrajero con tres sistemas de riego.**  
**Figure 1. Models of applied water in forage maize production in three irrigation systems.**

y fue 0.77; este valor es el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) e indica el nivel en que la cantidad de agua satisface el requerimiento del cultivo, y depende también de la forma de aplicación del agua por el sistema de irrigación. Para el cultivo de maíz, Andrew y Shashi (2009) reportan una evapotranspiración promedio de 54.8 cm en un estudio de cinco años en la Universidad de Nebraska, con valores de  $K_c$  de  $1.03 \pm 0.07$  para un maíz irrigado y  $0.84 \pm 0.20$  para maíz en secano. En el sistema RGS los riegos se aplicaron con una frecuencia de 3 a 5 d y con una lámina de 45 cm durante el ciclo del cultivo (Figura 1). El agua aplicada con RGS representó un ahorro de 37 % con respecto al riego de gravedad; el consumo promedio fue  $0.51 \text{ cm d}^{-1}$  y estadísticamente menor al obtenido con riego por gravedad y pivote central (Cuadro 1). Caldwell *et al.* (1994) reportan consumos de 42 a 53 cm de agua en maíz para diferentes frecuencias de RGS. En el presente estudio la relación  $E_t/E_v$  fue 0.56 y la reducción de su valor se debe principalmente a que disminuye la evaporación directa del suelo hacia la atmósfera y el agua es más aprovechada en el proceso de transpiración. Este valor es afectado por las condiciones de la humedad en la superficie principalmente (Allen *et al.*, 1998; Andrew y Shashi 2009). El efecto de la profundidad del emisor fue evaluado por Steven *et al.* (1995) quien indican que

requirement, and also depends on water is applied by the irrigation system. For maize crop, Andrew and Shashi (2009) report an average evapotranspiration of 54.8 cm in a five years' study at the University of Nebraska, with  $K_c$  values of  $1.03 \pm 0.07$  for irrigated corn, and  $0.84 \pm 0.20$  for dry farming corn. In the SDI system, irrigations were applied with a frequency of 3-5 d, and water requirement of 45 cm during the crop cycle (Figure 1). Water applied with SDI represented saving by 37 % with respect to gravity irrigation; consumption was  $0.51 \text{ cm d}^{-1}$  on average and statistically lower than the one obtained by gravity irrigation and center pivot (Table 1). Caldwell *et al.* (1994) report an input of 42-53 cm water in maize for different SDI frequencies. In the present study,  $E_t/E_v$  relationship was 0.56, and the reduction of its value is mainly due to the fact that it diminishes direct soil evaporation towards the atmosphere, and water is made better use of in the transpiration process. This value is affected by the humidity conditions mainly in the surface (Allen *et al.*, 1998; Andrew and Shashi, 2009). The effect of emitter depth was assessed by Steven *et al.* (1995), who point out that evaporation was 51 mm less at the depth of 0.15 m, and 81 mm lower at 0.3 m, compared to emitters in the soil surface.

la evaporación fue 51 mm menor en la profundidad de 0.15 m y de 81 mm en 0.3 m, comparada con emisores en la superficie del suelo.

En pivote central los riegos se aplicaron con frecuencias de 3 a 5 d y por ser un sistema de baja energía y bajo volumen de aplicación de agua (Camp, 1998; Ayars *et al.*, 1999; Schneider y Howell, 1999), el riego se aplicó con láminas de 0.4 a 1.4 cm. La lámina aplicada fue 52 cm y 26 % menor con respecto al sistema de gravedad y 14 % más comparado con RGS, mientras que el consumo fue 0.56 cm d<sup>-1</sup>, menor al obtenido por gravedad (Cuadro 1). Howell *et al.* (1995) reportan láminas de 27.9 cm para periodos húmedos y de 64 cm en ciclos normales en Texas (EE.UU.). En híbridos de ciclo corto y tardío la evapotranspiración varía de 0.6 a 1.0 cm d<sup>-1</sup> y el consumo total del agua cambia en función del ciclo, pero no según el tipo de híbrido (Howell *et al.*, 1998). Según Mena *et al.* (2010), las láminas de aplicación van de 0.37 a 0.5 cm d<sup>-1</sup> en un riego con pivotes en el estado de Yucatán. En el presente estudio la Et/Ev fue 0.65 y similar al RGS (Cuadro 1). Sin embargo, en el sistema de pivote central, el agua es aplicada por la parte superior del dosel del cultivo y la evaporación directa de la superficie del suelo y del follaje aumenta, por lo cual el agua se aprovecha menos para la transpiración del cultivo, lo que induce una menor producción de materia seca y productividad del agua (Cuadro 4).

### Índice de área foliar

Los modelos de crecimiento del IAF (Figura 2) de 21 a 78 DDS obtenidos en los tres sistemas de riego fueron polinomiales de segundo orden, y aunque el efecto cuadrático  $\beta_2$  no fue significativo ( $p>0.05$ ), sí mostró un  $R^2$  mayor y favorece

In the center pivot system, irrigations were made with frequencies of 3 to 5 d and because of being a low-energy system and with application of low water volume (Camp, 1998, Ayars *et al.*, 1999; Schneider and Howell, 1999), irrigation was applied with requirements of 0.4 -1.4 cm. The applied water sheet was 52 cm and 26 % lower with respect to the gravity system, and 14 % higher compared to SDI, whereas the consumption was 0.56 cm d<sup>-1</sup>, less than the one obtained by gravity (Table 1). Howell *et al.* (1995) record water requirements of 27.9 cm in humid periods and of 64 cm in normal cycles in Texas (USA). In hybrids of short and late cycles evapotranspiration varies from 0.6 to 1.0 cm d<sup>-1</sup>, and total water input changes according to the cycle, but it does not to the type of hybrid (Howell *et al.*, 1998). According to Mena *et al.* (2010), the application requirements go from 0.37 to 0.5 cm d<sup>-1</sup> with pivot irrigation in the state of Yucatán. In the present study, Et/Ev was 0.65 and similar to SDI (Table 1). However, in the center pivot system the water is applied is above the crop canopy and direct evaporation of soil surface increases; therefore, water is less utilized for crop transpiration, which causes lower dry matter production and water productivity (Table 4).

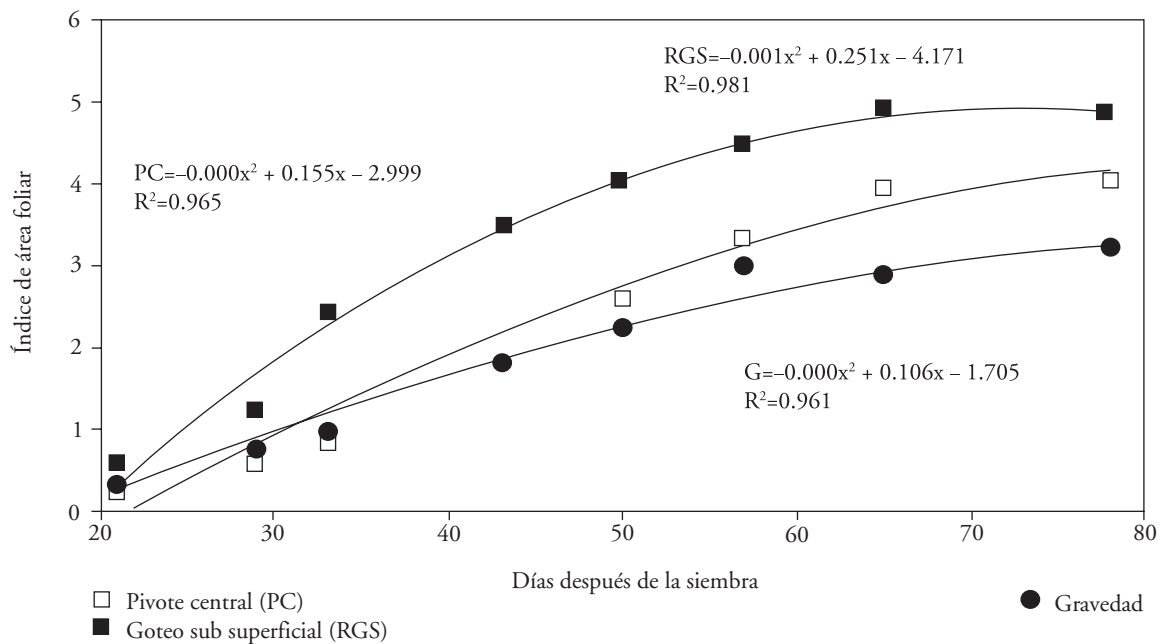
### Foliage area index

The FAI growth models (Figure 2) from 21 to 78 DAS, obtained in the three irrigation systems, were second-degree polynomial and even though the  $\beta_2$  square effect was not significant ( $p>0.05$ ), it did show higher  $R^2$  and favors better comprehension of the FAI behavior. The  $\beta_1$  linear effect or daily FAI growth was 0.251, 0.155, and 0.106 for SDI, center pivot, and gravity; in RGS the FAI was higher ( $p\leq 0.05$ ), but

**Cuadro 1. Comparación de pendientes (cm d<sup>-1</sup>) de los modelos obtenidos y valores de Kc para cada sistema de riego.**  
**Table 1. Comparison of slopes (cm d<sup>-1</sup>) of obtained models and Kc values for each irrigation system.**

| Riego           | Modelo             | Error estándar $\beta_1$ | Pendientes $\beta_1$   | Tc   | Tt   | Kc   |
|-----------------|--------------------|--------------------------|------------------------|------|------|------|
| Sub superficial | RGS= 0.513x + .847 | 0.0137                   | 0.513 <sup>RGS d</sup> | 3.47 | 2.04 | 0.56 |
| Pivote central  | PC= 0.562x + 3.56  | 0.0053                   | 0.562 <sup>PC c</sup>  | 3.09 |      | 0.65 |
| Gravedad        | G= 0.737x + 9.126  | 0.0714                   | 0.737 <sup>G b</sup>   | 30.1 |      | 0.77 |
| Evaporación     | Ev= 0.965x - 0.422 | 4.15                     | 0.965 <sup>Ev a</sup>  | 2.5  |      |      |

Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes (t de Student,  $p\leq 0.05$ ); Tc: calculada; Tt: tabulada ♦ Values with different letter are statistically different (Student t,  $p\leq 0.05$ ); Tc: calculated; Tt: tabulated.



**Figura 2. Modelos del crecimiento del índice de área foliar de maíz en tres sistemas de riego.**  
**Figure 2. Growth model of foliar area index of maize in the three irrigation systems.**

una mejor comprensión del comportamiento del IAF. El efecto lineal  $\beta_1$  o crecimiento del IAF diario fue 0.251, 0.155 y 0.106 para RGS, pivote central y gravedad; en RGS el IAF fue mayor ( $p \leq 0.05$ ), pero no hubo diferencias ( $p > 0.05$ ) entre pivote central y gravedad (Cuadro 2). Los valores máximos de IAF (Figura 2) se presentaron después de 65 DDS en los tres sistemas de riego y coinciden con el inicio del proceso de polinización. Las tendencias de estos valores son similares a las reportadas por Andrew y Shashi (2009). Según Howell *et al.* (1995), los valores de IAF van de 4 a 5 al evaluar diferentes niveles de humedad disponible en el suelo en pivote central y ocurren durante el proceso de polinización. En el presente estudio y para ambos sistemas de riego el crecimiento del IAF se estabilizó mostrando una fase de meseta, un comportamiento similar al que reportan Guevara *et al.* (2005), Fournier y Andrieu (1998) y Howell *et al.* (1995). La disminución del IAF en pivote central y gravedad se debe principalmente a un mayor estrés hídrico en la planta que induce una menor transpiración del cultivo, menos absorción de  $CO_2$  y reducción de la fotosíntesis. Esto se observó

there were no differences ( $p > 0.05$ ) between center pivot and gravity (Table 2). The maximum values of FAI (Figure 2) became evident after 65 DAS in the three irrigation systems and agree with the beginning of pollination. The trends of these values are similar to those reported by Andrew and Shashi (2009). According to Howell *et al.* (1995), the FAI values go from 4 to 5 at evaluating different levels of humidity available in the soil in center pivot and occur during the pollination process. In the present study and for both irrigation systems, IAF growth became stabilized showing a plateau stage, behavior similar to that reported by Guevara *et al.* (2005), Fournier and Andrieu (1998), and Howell *et al.* (1995). The FAI diminution in center pivot and gravity is mainly due to greater water stress in the plant, which elicits lower crop transpiration, less  $CO_2$  absorption, and photosynthesis reduction. This was observed in phenological crop characteristics, such as plant height and weight of the corn cob (Table 4). In irrigated and fertilized maize, FAI varied from 4 to 5.5, but in dry land the FAI value was never higher than 3 (Giaveno *et al.*, 2002).

**Cuadro 2. Comparación de pendientes de los modelos del índice de área foliar para cada sistema de riego.****Table 2. Comparison of models slopes of foliar area index for each irrigation system.**

| Riego           | Modelo                             | Error estándar $\beta_1$ | Pendientes $\beta_1$   | Tc   | T <sub>t</sub> |
|-----------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------|------|----------------|
| Sub superficial | RGS= $-0.001 x^2 + 0.251 x - 4.17$ | 0.030                    | 0.251 <sup>RGS a</sup> | 2.13 | 1.94           |
| Pivote central  | PC= $-0.0001 x^2 + 0.155 x + 2.94$ | 0.033                    | 0.155 <sup>PC b</sup>  | 3.65 |                |
| Gravedad        | G= $-0.0001 x^2 + 0.106 x - 1.7$   | 0.027                    | 0.106 <sup>G b</sup>   | 1.16 |                |

Valores con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (t de Student,  $p \leq 0.05$ ); Tc: calculada; Tt: tabulada ♦ Values with different letter in the column are statistically different (Student t,  $p \leq 0.05$ ), Tc: calculated; Tt: tabulated.

en las características fenológicas del cultivo como altura de planta y peso de elote (Cuadro 4). En maíces regados y fertilizados el IAF varió de 4 a 5.5, pero en secano el valor de IAF nunca fue superior a 3 (Giavino *et al.*, 2002).

#### Altura de planta, peso de elote, materia seca y productividad del agua

Los valores medios de altura y peso de elote (Cuadro 3) fueron los siguientes: 1) la altura en RGS fue 289 cm, 82 % más que en gravedad donde la altura fue 158 cm y 25 % más que pivote central (230 cm); 2) el peso de elote en RGS fue 0.440 kg, 90 % más que en gravedad (0.231 kg), y en pivote central fue 0.319 kg, esto es 28 % menos que en RGS y 38 %

#### Plant height, corn cob weight, dry matter, and water productivity

The mean values of height and corn coto weight (Table 3) were the following: 1) height in SDI was 289 cm, 82 % more than in gravity where height was 158 cm and 25 % higher than in center pivot (230 cm); 2) corn cob weight in SDI was 0.440 kg, 90 % more than in the gravity system (0.231 kg), and 0.319 kg in center pivot, which was 28 % lower than in SDI and 38 % more than in gravity. With regard to this, Montemayor *et al.* (2006) report corn cob weight of 0.345 kg in SDI and 0.238 kg in irrigation by gravity. These differences are due mainly to the fact that in SDI the water is more available for the plant, and the transpiration process

**Cuadro 3. Comparación de medias de altura de planta y peso de elote en los tres sistemas de riego.****Table 3. Comparison of means of plant height and corn cob weight in the three irrigation systems.**

| Riego     | Altura (cm)          | Error estándar | Tc   | Peso elote (kg)        | Error estándar | Tc   | T <sub>t</sub> |
|-----------|----------------------|----------------|------|------------------------|----------------|------|----------------|
| RGS vs PC | 289 <sup>RGS a</sup> | 1.68           | 19.8 | 0.440 <sup>RGS a</sup> | 0.006          | 10.4 | 1.81           |
| RGS vs G  | 230 <sup>PC b</sup>  | 2.46           | 96.3 | 0.319 <sup>PC b</sup>  | 0.01           | 31.3 |                |
| PC vs G   | 158 <sup>G c</sup>   | 0.8            | 27.9 | 0.231 <sup>G c</sup>   | 0.003          | 8.45 |                |

Medias con distinta letra en las columnas son estadísticamente diferentes (t de Student,  $p \leq 0.05$ ); Tc: calculada; Tt: tabulada ♦ Means with different letter in the columns are statistically different (Student t,  $p \leq 0.05$ ), Tc: calculated; Tt: tabulated.

**Cuadro 4. Comparación de medias de materia seca y eficiencia del uso del agua (EUA) en los tres sistemas de riego.****Table 4. Comparison of means of dry matter and water use efficiency (WUE) in the three irrigation systems.**

| Riego     | Materia seca (kg ha <sup>-1</sup> ) | Error estándar | Tc   | EUA (kg m <sup>-3</sup> ) | Error estándar | Tc   | T <sub>t</sub> |
|-----------|-------------------------------------|----------------|------|---------------------------|----------------|------|----------------|
| RGS vs PC | 18354 <sup>RGS a</sup>              | 228.25         | 16.6 | 4.07 <sup>RGS a</sup>     | 0.16           | 7.36 | 1.81           |
| RGS vs G  | 12257 <sup>PC b</sup>               | 287.01         | 27.0 | 2.35 <sup>PC b</sup>      | 0.17           | 13.0 |                |
| PC vs G   | 10829 <sup>G c</sup>                | 159.06         | 4.3  | 1.74 <sup>G c</sup>       | 0.08           | 3.24 |                |

Medias con distinta letra en las columnas son estadísticamente diferentes (t de Student,  $p \leq 0.05$ ); Tc: calculada; Tt: tabulada ♦ Means with different letter in the columns are statistically different (Student t,  $p \leq 0.05$ ); Tc: calculated; Tt: tabulated.

más que en gravedad. Al respecto, Montemayor *et al.* (2006) reportan pesos de elote de 0.345 kg en RGS y 0.238 kg en riego por gravedad. Estas diferencias se deben principalmente a que en RGS el agua está más disponible para la planta y aumenta el proceso de transpiración (Coelho y Or, 1999). Lo contrario ocurre en sistemas de riego por superficie donde el proceso de evaporación aumenta (Steven *et al.*, 1995), en tanto que Sheaffer (1988) indica que existe una relación lineal entre el proceso de transpiración y materia seca. Según Olague *et al.* (2006), en riego sub superficial el incremento de materia seca se debe principalmente a la mayor altura de planta, hijuelos en planta, plantas con mayor número y peso de elote, que se atribuyen principalmente a la mayor disponibilidad del agua.

La producción de MS (Cuadro 4) en RGS fue 41 % y 33 % más con respecto a gravedad y pivote central. Además aumentó ( $p \leq 0.05$ ) la producción de MS con un mayor IAF, lo cual coincide con los resultados reportados por Reta *et al.* (2007) quienes muestran una relación lineal entre el IAF *vs* Ms ( $R^2=0.86$ ) al evaluar diferentes distancias entre surcos y el rendimiento más alto fue 22 368 kg ha<sup>-1</sup> con un IAF de 7.8 en surcos separados a 38 cm. El uso del agua por el cultivo (Cuadro 4) fue 4.07 kg m<sup>-3</sup> en RGS, lo cual fue 57 % y 42 % mayor con respecto a gravedad y pivote central, mientras que en el sistema de pivote central la productividad del agua fue 2.35 kg m<sup>-3</sup> y 26 % más que en gravedad. Andrew y Shashi (2009) reportan  $5.20 \pm 0.34$  kg m<sup>-3</sup> para un maíz regado durante cinco años en Nebraska, y según Steven *et al.* (2006) la productividad del agua varía de 2 a 4.5 kg m<sup>-3</sup> con diferentes laminas de riego en goteo y pivote central, sin diferencias entre ambos sistemas de riego.

## CONCLUSIONES

La cantidad de agua aplicada fue menor en el sistema de riego por goteo sub superficial, y en los tres sistemas de riego la aplicación del agua no superó a la evaporación del tanque tipo A. Mediante los modelos obtenidos se evaluó el consumo promedio diario de agua en los tres sistemas de riego. El índice de área foliar fue descrito por un modelo polinomial de segundo orden y su valor es mayor en riego por goteo sub superficial. La producción de materia seca y productividad del agua fue más alta en riego por goteo sub superficial, seguida de pivote central y riego por gravedad.

increases (Coelho and Or, 1999). The contrary occurs in systems of surface irrigation, where the evaporation process increases (Steven *et al.*, 1995), whereas Sheaffer (1988) indicates that there is a linear relationship between the transpiration process and dry matter. According to Olague *et al.* (2006), the increment in subsurface irrigation is due mainly to greater plant height, plants with tillers, and those with a larger amount and weight of corn cob, which are principally attributed to greater water availability.

Production of DM (Table 4) in SDI was 41 %, 33 % more with respect to gravity and center pivot. Furthermore, DM production increased ( $p \leq 0.05$ ) with higher FAI, which agrees with the results reported by Reta *et al.* (2007) who present a linear relationship between FAI and DM ( $R^2=0.86$ ), evaluating different distances among furrows, and the highest yield was 22 364 kg ha<sup>-1</sup> with FAI of 7.8 in rows separated at 38 cm. Water use per crop (Table 4) was 4.07 kg m<sup>-3</sup> in SDI, which was 57 % and 42 % higher compared to gravity and center pivot, whereas water productivity of the center pivot was 2.35 kg m<sup>-3</sup> higher and 26 % more than in gravity. Andrew and Shashi (2009) report  $5.20 \pm 0.34$  kg m<sup>-3</sup> for maize irrigated in Nebraska during five years; and according to Steven *et al.* (2006), water productivity varies from 2 to 4.5 kg m<sup>-3</sup> with different water requirement of drip irrigation and center pivot, without any difference between both irrigation systems.

## CONCLUSIONS

The applied amount of water was lower in the subsurface drip irrigation system, and in the three irrigation systems water application did not surpass the evaporation of the type-A tank. By means of the obtained models, the average water input was assessed in the three systems. The foliar area index was described by a second-degree polynomial model, and its value is higher in subsurface drip irrigation. Dry matter production and water productivity were highest in subsurface drip irrigation, followed by center pivot and irrigation by gravity.

—End of the English version—

-----\*

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del señor Miguel Muñoz Caraveo responsable de la empresa VERMIORGANIC, S. P. R. de R. L. Al señor Salvador Álvarez Díaz y al ingeniero Jesús Castruita López propietario y responsable técnico de la Pequeña Propiedad Campo Sagrado.

## LITERATURA CITADA

- Adamsen, F. J. 1989. Irrigation method and water quality effect on peanut yield and grade. *Agron. J.* 84 (4): 589-593.
- Adamsen, F. J. 1992. Irrigation method and water quality effects on corn yield in the Mid-Atlantic Coastal Plain. *Agron. J.* 84(5): 837-843.
- Ahmad, M. D., I. Masih, and H. Turrel. 2004. Diagnostic analysis of spatial and temporal variations in crop water productivity: A field scale analysis of the rice-wheat cropping system of punjab, Pakistan. *J. Appl. Irrigation Sci.* 39 (1): 43-63.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome. 298 p.
- Andrew, E. S, and B. V. Shashi. 2009. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agric. For. Meteorol.* 149: 3-4 y 443-452.
- Ayars, J. E., C. J. Phene, R. B. Hutmacher, K. R. Davis, R. A. Schoneman, S. S. Vail, and R. M. Mead. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. Water Manage.* 42: 1-27.
- Boswell, J. M. 1990. Microirrigation Design Manual. Fourth ed. Hardie Industries. El Cajon, CA. USA. pp: 7-12.
- Bui, W., and R. V. Osgood. 1995. Subsurface irrigation trial for alfalfa in Hawaii. In: Lamm, F. R. (ed). Micro-irrigation for a Changing World, Proc. Fifth International Microirrigation Congress. ASAE. Orlando, Florida. pp: 658-660.
- Caldwell, D. S., W. E. Spurgeon, and H. L. Manges. 1994. Frequency of irrigation for subsurface drip-irrigated corn. *Am. Soc. Agric. Enge.* 37(4): 1099-1103.
- Camp, C. R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. *Trans. ASAE* 41(5): 1353-1367.
- Carrillo A., J., S. Reta D., J. Cueto W., y A. Gaytán M. 2003. Capacidad de producción de forraje de 13 híbridos de maíz en alta densidad de siembras en la Región Lagunera. In: Memoria de la XV Semana Internacional de Agronomía. Gómez, Palacio Durango. pp: 316-321.
- Coelho, E. F. and D. Or. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant Soil* 206: 123-136.
- Colaizzi, P. D., A. D. Schneider, S. R. Evett, and T. A. Howell. 2004. Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum. *Trans. ASAE* 47(5): 1477-1492.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2008-2009. Edición 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed). México, D. F. 323 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2004. Programa hidráulico regional 2002-2006. Región VII. Cuencas Centrales del Norte. Resumen ejecutivo. México, DF. 35 p.
- Doorenbos, J., y W. O. Pruitt, 1974. Las Necesidades de Agua de los Cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Estudio Riego y Drenaje (24). Roma. 194 p.
- El Siglo de Torreón. 2011. Resumen Económico Comarca Lagunera 2010. Cia. Editora de la Laguna S. A de C. V. Torreón, Coahuila, México. 80 p.
- Fournier, C., and B. Andrieu. 1998. A 3D Architectural and process-based model of maize development. *Annals Bot.* 81: 233-250.
- García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM. México, D. F. 217 p.
- Giaveno, C. D., A. Pilatti M., y P. Marano R. 2002. Riego suplementario en el centro de Santa Fe: Maíz para silaje I- Respuesta productiva en diferentes épocas de siembra. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 1 (2): 15-23.
- Guevara E., A., G. Barcenás H., F. R. Salazar M., S. González E., y H. Suzán A. 2005. Alta densidad de siembra en la producción de maíz con irrigación por goteo subsuperficial. *Agrociencia* 39: 431-439.
- Howell, T. A., A. Yazar, D. Schneider A., A. Dusek D, and S. Copeland K. 1995. Yield and water use efficiency of corn in response to LEPA irrigation. *Trans. ASAE* 38 (6): 1737-1747.
- Howell, T. A., A. J. Tolk., A. D. Schneider, and R. S. Evett. 1998. Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agron. J.* 90: 3-9.
- Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93: 281-289.
- Locascio, S. J. and G. Smajstrla, A. 1995. Fertilizer timing and pan evaporation scheduling for drip irrigated tomato. In: Lamm, F. R. (ed). Micro irrigation for a changing world: conserving resources/preserving the environment. Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress. ASAE. Orlando, Florida. pp: 175-180.
- Mena M., H. A., L. Tijerina C., R. Acosta H., y E. Mejía S. 2010. Evaluación técnica y económica del manejo de equipos de pivote central. *Terra Latinoamericana* 28 (2): 177-184.
- Montemayor T., J. A., A. O. Gómez M., J. Olague R., A. Zermeno G., E. Ruiz C., M. Fortis H., E. Salazar S., y R. Aldaco N. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y el rendimiento de maíz forrajero. *Téc. Pec. Méx.* 44(3): 359-364.
- Montemayor T., J. A., J. Olague R., M. Fortis H., R. Bravo S., J. A. Leos R., E. Salazar S., J. Castruita L., J. C. Rodríguez R., y J. A. Chavarría G. 2007. Consumo de agua en maíz forrajero con riego subsuperficial. *Terra Latinoamericana* 25 (2): 163-168.
- Montemayor T., J. A., H. Walter A., J. Olague R., A. Román L., M. Rivera G., P. Preciado R., I. R. Montemayor T., M. A. Segura C., J. A. Orozco V., y P. Yescas C. 2010. Uso del agua en la alfalfa (*Medicago sativa*) con riego por goteo subsuperficial. *Rev. Mex. Ciencias Pec.* 1(2): 145-156.
- Morozzi, D. G., G. Debortoli D., M. Méndez., y H. Currie. 2005. Determinación de algunos indicadores de rendimiento en el cultivo de maíz bajo dos sistemas de riego. In:

- Memoria Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad Nacional del Nordeste. Republica Argentina. <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2005/index.htm> (Consulta: septiembre de 2011).
- Olague R. J., J. A. Montemayor T., S. R. Bravo S., M. Fortis H., R. A. Aldaco N., y E. Ruiz C. 2006. Características agronómicas y calidad del maíz forrajero con riego sub-superficial. *Tec. Pec. Méx.* 44 (3):351-357.
- Phene, C. J, and O. W. Beale. 1976. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40(3): 430-436.
- Prasanna, H. G., J. L.Chavez, P. D. Colaizzi, R. E. Steve, T. A. Howell, and J. A. Tolk. 2008. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrig. Sci.* 26: 223-237.
- Reta S., G. D., J. A. Cueto W., A. Gaytan M., y J. Santamaria C. 2007. Rendimiento y extracción de nitrógeno, fosforo y potasio de maíz forrajero en surcos estrechos. *Agric. Téc. Méx.* 33 (2): 145-151.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2006. Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria en la Región Lagunera. Lerdo, Durango. 285 p.
- Schneider, A. D, and T. A. Howell. 1999. LEPA and spray irrigation for grain crops. *J. Irrig. Drain. Engr. ASCE* 125(4): 167-172.
- Schneider, A. D., and T. A. Howell, and S. R. Evett. 2001. Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation efficiency. Paper No. 012019. American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Annual International Meeting. Sacramento, California. pp: 1-12.
- Sheafer, C. C., C. B. Tanner, and M. B. Kirkhan, 1988. Alfalfa water relations and irrigation. *Agronomy* 29:373-409.
- Steven, R. E., T. A. Howell, and A. D. Schneider. 1995. Energy and water balances for surface and subsurface drip irrigated corn. Florida. *In: Lamm, F. R. (ed). Micro irrigation for a changing world: conserving resources/preserving the environment. Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress. ASAE. Orlando, Florida.* pp:135-140.
- Steven, R. E., R. P. Troy, and T. A. Howell. 2006. Controlling water use efficiency with irrigation automation: Cases from drip and center pivot irrigation of corn and soybean. Southern Conservation Systems Conference, Amarillo, Texas. pp: 57-66.