RENDIMIENTO DE GRANO DE MAÍZ EN DEFICIT HÍDRICO EN EL SUELO EN DOS ETAPAS DE CRECIMIENTO

MAIZE GRAIN YIELD UNDER SOIL WATER DEFICIT AT TWO GROWING STAGES

Marco A. Inzunza-Ibarra[1]*, Ma. Magdalena Villa-Castorena[1], Ernesto A. Catalán-Valencia[1], Rutilo López-López[2] y Ernesto Sifuentes-Ibarra[3]

[1]Centro de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). km 6.5 Canal Sacramento margen derecho. 35140, Gómez Palacio, Durango, México. [2]Campo Experimental Huimanguillo, INIFAP. km 1 Carretera Huimanguillo-Cárdenas. 86400, Huimanguillo, Tabasco, México. [3]Campo Experimental Valle del Fuerte, CIRNO-INIFAP. km 1609 Carretera México-Nogales. 81110, Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México.

**Autor para correspondencia* (inzunza.marco@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La optimización del manejo del agua de riego en las áreas agrícolas es indispensable para una agricultura sustentable y eficiente, esto adquiere mayor relevancia en regiones áridas y semiáridas. Es necesario conocer el requerimiento y la oportunidad de aplicar el agua a los cultivos de importancia y conocer los más eficientes en la conversión del agua a grano y materia seca. El presente estudio tuvo como objetivo determinar modelos de producción bajo diferentes regímenes de riego en dos etapas de desarrollo del maíz (*Zea mays* L.). Se ensayaron siete tratamientos que corresponden a la matriz de tratamientos San Cristóbal con dos factores de variación: (40 - 40), (40 - 80), (60 - 60), (60 - 100), (80 - 40), (80 - 80) y (100 - 60) de la humedad aprovechable del suelo consumida por el maíz en el periodo de emergencia a inicio de floración y de ésta a madurez fisiológica, respectivamente. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Las variables evaluadas fueron rendimiento de grano (t ha^{-1}), eficiencia de uso de agua (kg m^{-3}) y el régimen de humedad en el suelo. Los resultados mostraron que el maíz alcanza el mayor rendimiento de grano y eficiencia de uso del agua del orden de 10.3 t ha^{-1} y de 1.63 kg m^{-3}, al desarrollarse con aproximadamente el 60 y 59 % de la humedad aprovechable consumida del suelo en las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente; además, se encontró que el consumo óptimo fue de 40.3 y 23.2 cm de lámina de agua en las dos etapas estudiadas.

Palabras clave: *Zea mays*, estrés hídrico, evapotranspiración, función de producción del agua, humedad aprovechable.

SUMMARY

The optimization of irrigation water management in agricultural areas is essential for a sustainable and efficient agriculture; it acquires greater relevance in arid and semiarid regions. This process requires knowledge on requirements and opportunity to apply water to important, efficient crops to convert water into grain and dry matter. This study was aimed to determine models of production under different irrigation regimes at two developmental stages of maize (*Zea mays* L.). Seven treatments corresponding to the San Cristobal treatment matrix with two variation factors were tested: (40 - 40), (40 - 80), (60 - 60), (60 - 100), (80 - 40), (80 - 80) and (100 - 60) of the available soil moisture consumed by maize from emergence to start of flowering, and from this stage to physiological maturity, respectively. Treatments were distributed under a randomized complete blocks experimental design with four replications. The evaluated variables were grain yield (t ha^{-1}), water use efficiency (kg m^{-3}) and soil moisture regime. Results show that maize reaches the highest grain yield and water use efficiency at 10.3 t ha^{-1} and 1.63 kg m^{-3}, when it grows on approximately 60 and 59 % of the available soil moisture consumed at the vegetative and reproductive stages, respectively. Additionally, it was found that optimal water consumption was 40.3 and 23.2 cm of water at the two studied stages.

Index words: *Zea mays*, water stress, evapotranspiration, soil water stress, water production function, available soil water.

INTRODUCCIÓN

La escasez de agua afecta principalmente al 52 % de la población mundial que vive en regiones áridas y semiáridas (Gheysari *et al*., 2017). Es indiscutible que la agricultura de riego en el futuro se desarrollará en un ambiente restringido del recurso agua, debido por una parte a la mayor prioridad de uso por el sector urbano y al hecho de que actualmente el mayor porcentaje del agua disponible se usa para la agricultura (76 %). La insuficiente dotación de agua para riego ya es la norma, en vez de la excepción, por lo que el manejo del riego debe cambiar de paradigma, en vez de hacer énfasis en la producción por unidad de área, debe enfocarse a la producción por unidad de agua consumida; o sea, su productividad marginal, con el objetivo fundamental de realizar una agricultura de riego sustentable (Trout y Bausch, 2017).

De acuerdo con Gheysari *et al.* (2017), el rescate de volúmenes de agua aplicada a los cultivos contribuye a alcanzar el equilibrio entre la extracción y la recarga del recurso hídrico, al hacer uso del concepto riego deficitario para obtener un ahorro significativo del agua de riego con únicamente una reducción insignificante en el rendimiento de grano o de materia seca, al exponerlo a un estrés hídrico en su periodo de crecimiento menos sensible (Fereres y Soriano, 2007).

Recibido: 10 de noviembre de 2017
Aceptado: 07 de junio de 2018

El desarrollo de una agricultura de riego sustentable debe considerar las necesidades futuras de alimentos suficientes para el crecimiento global de la población, ésto requerirá incrementar la productividad del maíz (*Zea mays* L.) por unidad de agua (Rodrígues *et al.*, 2013). Con este enfoque, Trout y DeJonge (2017) reportan la productividad marginal del agua de un maíz híbrido en las planicies altas de E.E. U.U. y describen las implicaciones de los resultados del manejo de riego en un ambiente de agua limitada, reportan funciones de respuesta al agua de riego, con tendencia crecientes y decrecientes para maíz de grano durante cuatro años. La mayor productividad o eficiencia de uso de agua fue de 2 kg m^{-3} (kg de grano por m^{-3} de agua consumida por el cultivo, ETc) (Geerts y Raes, 2009). En estas condiciones se produjeron 12.5 t ha^{-1} con un consumo de 630 mm de agua. Con valores próximos a la productividad marginal las funciones muestran decrementos no significativos de rendimiento con decrementos de hasta 25 % de ETc, ya que, hasta este valor, se mostraron valores relativamente constantes de productividad marginal del agua.

El maíz es el cereal más importante de México y del mundo desde el punto de vista alimenticio, económico, social e industrial (Ortega *et al.*, 2013). El 88 % de la humanidad consume este cereal, junto con el trigo (*Triticum* spp.) y el arroz (*Oryza sativa*). Así, se refleja en la producción mundial que durante el ciclo 2014-2015, alcanzó un máximo histórico en la producción con 1009 millones de toneladas, con rendimientos de 5.6 t ha^{-1}, de los promedios más altos a nivel mundial para un cultivo (García-Salazar y Skaggs, 2015). En México, durante el ciclo agrícola de 2016, se cosecharon aproximadamente 14 millones de toneladas de grano de maíz en condiciones de riego, con un rendimiento de 8.3 t ha^{-1} y de 22.6 millones de toneladas producidas en condiciones de temporal con un rendimiento promedio de 3.72 t ha^{-1}. En Durango se sembraron en el mismo año 26,758 y 138,559 ha, con un rendimiento de 8.02 y 1.12 t ha^{-1} para riego y temporal, respectivamente (SIAP, 2017). En el primer caso, la mayor condicionante para su producción es sin duda la escasez de agua para riego ya que se ubica en las regiones áridas y semiáridas, que conforman más del 50 % del territorio, con disponibilidad restringida y con deterioro de su calidad para el riego agrícola.

La optimización del recurso requiere obtener relaciones funcionales entre el producto deseado del cultivo y su requerimiento de agua, y utilizar los genotipos más eficientes en la conversión del agua de riego a grano y materia seca (Farré y Faci, 2009, Gheysari *et al.*, 2017). Por consecuencia, es fundamental conocer la relación existente entre el rendimiento de los cultivos y la cantidad de agua utilizada, así como su eficiencia de uso del agua que permita optimizar su uso y maximizar su producción de grano y rescatar volúmenes de agua al usar el concepto del riego deficitario (Gheysari *et al.*, 2017; Mansouri-Far *et al.*, 2010).

Greaves y Wang (2017) realizaron estudios aplicando riego deficitario al maíz con diferentes cantidades de agua por debajo de la evapotranspiración del cultivo (ETc) para incrementar la eficiencia del uso de agua (EUA). Se ensayaron cinco tratamientos: aplicación de 20, 30, 40, 50 y 60 mm al abatirse 40 % de la humedad aprovechable del suelo. Los resultados mostraron un rendimiento de grano de 5.7 t ha^{-1} en el tratamiento irrigado con aplicaciones de láminas de 20 mm y de 9.1 t ha^{-1} en el irrigado con aplicaciones de 60 mm; ésto significa una diferencia significativa ($P \leq 0.05$) de 37.7 % con la aplicación de 235 a 555 mm de agua total en el ciclo, respectivamente. La producción de materia seca varió de 10.1 a 17.7 t ha^{-1} y el índice de área foliar de 3.99 a 5.83 para los citados tratamientos. El valor más alto de EUA fue de 1.79 kg m^{-3} y se mostró en el tratamiento irrigado con láminas de 40 mm, con lo que se obtuvo un ahorro de agua del 29 % con una reducción no significativa de rendimiento de grano del 10.5 %.

El objetivo central del estudio fue determinar la respuesta del rendimiento de grano en maíz a diferentes niveles de humedad aprovechable consumida. Esto resulta importante porque se generan herramientas robustas para la toma de decisiones en la planeación regional del manejo de volúmenes disponibles y sobre los cultivos a establecer, de acuerdo con sus requerimientos hídricos (Kassam *et al.*, 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se llevó a cabo durante el ciclo agrícola de 2013 en terrenos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP, ubicado en la Comarca Lagunera en el Ejido las Huertas del municipio de Gómez Palacio, Durango. El centro experimental se localiza en las coordenadas geográficas 25º 31′ 57″ latitud N y 103º 25' 57″ longitud O a 1139 msnm.

El clima de la Comarca Lagunera, según García (2004), se clasifica como B, W(h') h w(e), que corresponde a muy árido, cálido, con temperatura media anual de 22 ºC y temperatura media del mes más frío de 18 ºC. El periodo libre de heladas es de abril a octubre, pueden presentarse granizadas en mayo. Las lluvias son en verano, con un porcentaje de lluvias invernales de 5 a 10.2 %, bajo nivel de humedad relativa, precipitación pluvial promedio entre 200 y 300 mm anuales en la zona agrícola de riego y de 400 a 500 mm en la zona montañosa oeste y evaporación media anual de

2600 mm. Tanto el área de la llanura agrícola, como gran parte de la zona montañosa presentan dos periodos térmicos bien definidos, el primero comprende siete meses, de abril a octubre, en que la temperatura media mensual excede los 20 ºC; el segundo abarca de noviembre a marzo, en el que la temperatura media mensual varía de 13.6 a 19.5 ºC. Los meses más fríos son diciembre y enero; en este último mes se registra el promedio más bajo de temperatura, de 5.8 ºC aproximadamente (Villa *et al*., 2005).

Las características físicas y químicas del suelo del sitio experimental se determinaron en seis sitios de muestreo y tres profundidades del suelo por sitio (0-30, 30-60 y 60-90 cm), de las cuales se extrajeron muestras de 1 kg de suelo. Sus principales características químicas como disponibilidad de nitratos (método de Kjeldahl), de fósforo (método de Duval) y potasio (espectrofotometría), carbonatos totales (volumetría), conductividad eléctrica (conductimetría), capacidad de intercambio catiónico (con extracción de yeso) y pH (pasta de saturación) se muestran en el Cuadro 1.

Las características físicas del suelo evaluadas fueron el contenido de materia orgánica (método de Walkley y Black); arena, limo y arcilla en la textura (método de la pipeta de Robinson); capacidad de campo y punto de marchitez permanente (método de la olla y membrana de presión, respectivamente) y densidad aparente (método del cilindro) (Plenecassagne *et al*., 1977) se muestran en el Cuadro 2.

El suelo del sitio experimental presentó baja disponibilidad de nitratos, moderadamente baja de fósforo y alta de potasio, bajos contenidos de sales solubles, de sodio y de materia orgánica, según la clasificación de Castellanos *et al.* (2000). Por su pH promedio de 8.3, se considera un suelo moderadamente alcalino, sin problemas de asimilación de elementos menores y de alta productividad al ser irrigado.

Tratamientos, diseño y unidad experimental

Se probaron siete combinaciones de la humedad aprovechable consumida en el suelo (HAC), correspondientes a la matriz del factorial incompleto 4 × 4 San Cristóbal (Briones-Encinia y Martínez-Garza, 2002; Martínez, 1988). Tales variantes de HAC se evaluaron en dos periodos, de emergencia a inicio de floración (etapa vegetativa) y de inicio de floración a madurez fisiológica (etapa reproductiva). Los niveles de cada factor fueron 40, 60, 80 y 100 % de la HAC en cada uno de los periodos fenológicos citados (Cuadro 3). El riego se aplicó cuando se abatió la humedad aprovechable del suelo programada en los tratamientos estudiados en el perfil de 0-90 cm del suelo.

Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con unidades experimentales de 4 m de ancho y 5 m de largo para formar un área de 20 $m^{2.}$ La parcela útil consistió en los dos surcos centrales y se eliminó 1 m en los extremos para evitar el efecto de orilla.

Manejo del cultivo

La siembra del maíz se realizó el 9 de junio con el híbrido SB-302 con una densidad de siembra de 75 mil plantas

Cuadro 1. Características químicas del suelo del sitio experimental.

Profundidad (cm)	NO_3 (mg kg^{-1})	P (mg kg^{-1})	K (mg kg^{-1})	CO_3 (g kg^{-1})	CEe (dS m^{-1})	CIC (cmol kg^{-1})	pH
0 - 30	23.18	9.20	1045.83	53.0	0.79	24.4	8.47
30 - 60	37.27	8.23	912.50	68.0	1.07	23.5	8.30
60 - 90	43.42	9.67	833.30	86.6	1.03	23.4	8.15

NO_3: nitrato disponibles; P. fósforo disponible; K: potasio disponible; CO_3: carbonatos totales; CEe: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico.

Cuadro 2. Características físicas del suelo del sitio experimental.

Profundidad (cm)	MO (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	CC (%)	PMP (%)	Da (g cm^{-3})
0 - 30	1.21	20.0	38.0	24.0	Franco arcillo limoso	27.9	15.9	1.3
30 - 60	0.88	19.6	47.4	33.0	Franco arcillo limoso	27.7	15.5	1.2
60 - 90	0.82	17.0	50.0	33.0	Franco	27.9	15.2	1.3

MO: materia orgánica; CC: capacidad de campo; PMP. punto de marchitez permanente; Da: densidad aparente.

Cuadro 3. Tratamientos de riego ensayados en el campo en dos etapas de desarrollo de maíz.

Tratamiento	% Humedad aprovechable consumida en el periodo	
	HAC_1	HAC_2
1	40	40
2	40	80
3	60	60
4	60	100
5	80	40
6	80	80
7	100	60

HAC_1: Etapa vegetativa; HAC_2 :Etapa reproductiva.

por hectárea distribuidas en surcos de 80 cm de ancho y una separación entre plantas de aproximadamente 16 cm. Con base en el muestreo inicial de suelos, se fertilizó con la fórmula 180N-80P-00K, la mitad del N y todo el P se aplicó al momento de la siembra en húmedo y el resto del N en el primer riego de auxilio. Para la aplicación del riego rodado, se instaló tubería presurizada desde la fuente de abastecimiento hasta el área experimental. La tubería de conducción fue de 15.24 cm de diámetro con hidrantes cada 36 m para el riego de las melgas circunvecinas al área experimental, a la cual se conectó tubería de 38.1 mm de diámetro con conexiones para la unión de una manguera provista con un medidor volumétrico calibrado para aplicar en forma precisa el volumen de agua requerido.

Toma de muestras

Para determinar el abatimiento de la humedad del suelo en cada tratamiento se usó un TDR (time domain reflectometer) y se utilizó el método gravimétrico para su calibración. Para el muestreo de humedad, se instalaron dos tubos de acceso en cada parcela experimental de dos repeticiones, para introducir la sonda del TDR y tomar lecturas a las profundidades de 0-30, 30-60, 60-90 del suelo durante la operación del experimento, y de 90 a 120 cm en forma adicional, en el inicio y final del periodo y en la cosecha para realizar el balance de humedad en el suelo de cada tratamiento.

Se realizó el muestreo de humedad en forma continua a los tratamientos próximos a alcanzar los niveles de HAC prefijados. En cada profundidad se tomaron tres lecturas, las cuales eran promediadas para obtener el dato de humedad volumétrica del TDR para esa profundidad y lo mismo para las profundidades restantes. La profundidad de control al inicio del ciclo fue de 30 cm y posteriormente de 60 cm, de acuerdo con el crecimiento de la raíz; posteriormente, se consideró que el crecimiento radical de mayor consumo de agua fue 90 cm y ésta se tomó como profundidad definitiva para la reposición de humedad en el resto del estudio. La curva de calibración del TDR para el lote experimental fue obtenida de acuerdo con Inzunza-Ibarra *et al.* (2006):

$$Hv = -0.11 + 0.00074 \times tp \qquad R^2 = 0.93$$

donde: Hv = contenido de humedad volumétrica ($m^3\ m^{-3}$); tp = tiempo de retorno del pulso electromagnético (s^{-12}).

Se realizaron muestreos de humedad del suelo con el TDR en forma continua en los tratamientos bajo estudio, durante todo el desarrollo del maíz. El primer muestreo fue para medir la humedad inicial antes del riego de presiembra, y los muestreos posteriores se realizaron durante el transcurso del experimento para monitorear los abatimientos de humedad del suelo para cada tratamiento. Al alcanzarse el nivel de humedad prefijado para cada tratamiento se aplicó riego hasta reponer la capacidad de campo en el perfil de suelo de 0-90 cm.

Toma de datos y análisis estadístico

Las variables respuesta evaluadas fueron rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$), eficiencia de uso del agua ($kg\ m^{-3}$) y agua consumida por el maíz (cm). Además, se monitoreó la humedad del suelo en el perfil de 0-90 cm por estrato de 30 cm, para cada combinación. Se realizó análisis de varianza (SAS Institute, 2008), la prueba de Tukey (0.05) para la comparación de medias, y el método de mínimos cuadrados del análisis de regresión múltiple para la obtención de los modelos estadísticos. Posteriormente, se realizó un análisis de optimización de la función obtenida de acuerdo con la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral (Steel *et al.*, 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones de clima prevalecientes durante el desarrollo del estudio

La temperatura media diaria observada en el ciclo del maíz fue de 26.3 ºC (Figura 1), la cual superó en 1.4 ºC a la media histórica de 24.9 ºC en el mismo periodo. La diferencia se debe en un 68 % al incremento en las temperaturas mínimas. Estos cambios climáticos justifican los estudios, ya que influyen en los requerimientos hídricos de los cultivos. En cuanto a la precipitación, ésta fue 37 mm superior al promedio histórico de 216 mm y representa solo 17 % más de lluvia, lo cual no afectó a los tratamientos.

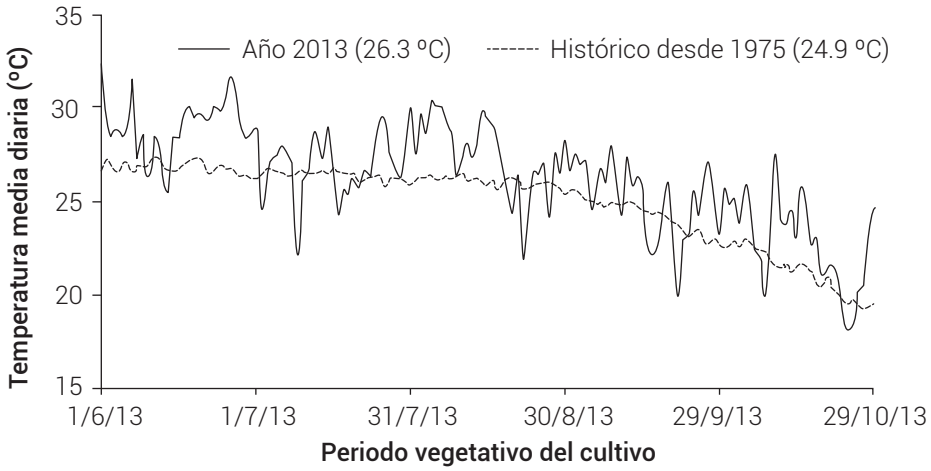


Figura 1. Temperatura registrada durante el periodo de crecimiento del cultivo. Gómez Palacio, Durango, 2013.

Niveles de humedad en el suelo de los tratamientos ensayados

El Cuadro 4 muestra el nivel de humedad en el suelo para cada uno de los tratamientos ensayados en campo. El consumo de agua por el maíz durante el periodo de emergencia a inicio de floración (ET_1) fluctuó; en el tratamiento 7 de mayor HAC (100 %) éste fue de 25.0 cm, mientras que en el tratamiento 1 (40 % HAC) fue de 46.2 cm. En el segundo periodo ET_2 (floración a madurez fisiológica), el consumo de agua se mostró en un intervalo de 13.1 cm, en el tratamiento 4 (100 % HAC) de estrés de humedad, cercano al punto de marchitez permanente y de 30.4 cm en el tratamiento 1 (40% HAC), de no restricción de humedad en el suelo (-0.26 MPa). La humedad aprovechable consumida por el maíz al momento del riego se estudió en un intervalo del 43 al 94 % y del 44 al 100 % de la humedad aprovechable en el suelo, para el primer y segundo periodo, respectivamente.

Rendimiento de grano del maíz

El análisis de varianza (Cuadro 5) mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.01$) para rendimiento de grano. El tratamiento 60-60 tuvo una producción de grano promedio de 10.34 t ha^{-1}, que corresponde a la más alta (Cuadro 4), y se obtuvo al aplicar el riego al consumirse el 60 y 59 % de la humedad aprovechable; esto es, se aplicó el riego cuando el suelo presentó un potencial de agua de -0.48 y -0.461 MPa en el perfil del suelo de 0-90 cm en la etapa vegetativa y reproductiva del maíz, respectivamente. Por otro lado, los rendimientos más bajos se obtuvieron en los tratamientos 60-100 y 100-60, que alcanzaron un rendimiento promedio de 5.06 y 5.36 t ha^{-1} respectivamente, y tuvieron en común crecer bajo condiciones de estrés hídrico cercanas al punto de marchitez permanente en alguna de sus etapas estudiadas (-0.48 y -1.48 MPa). Estos tratamientos resultaron ser estadísticamente inferiores en rendimiento con respecto al resto de los tratamientos, pero iguales entre sí. El análisis anterior permite concluir que los resultados muestran una respuesta no lineal del rendimiento de grano del maíz por condiciones de diferentes regímenes de humedad del suelo al momento del riego y es congruente con Geerts y Raes (2009); es decir, un efecto negativo sobre el rendimiento cuando se desarrolla bajo condiciones extremas de humedad tanto de deficiencia severa como de contenidos hídricos excesivos en el suelo, lo que coincide con lo que afirman Van Donk *et al.* (2013).

Eficiencia de uso del agua de los tratamientos

Los valores promedio de eficiencia de uso del agua del maíz (EUA) en las diferentes combinaciones ensayadas que se muestran en el Cuadro 4 presentaron diferencias altamente significativas para esta variable respuesta, como se demuestran en el Cuadro 5. De acuerdo con el análisis de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), la combinación de proporcionar el riego al 60 y 59 % de la HAC durante los periodos fenológicos vegetativo y reproductivo alcanzó la mayor productividad del agua con el valor de 1.63 kg m^{-3} y fue significativamente diferente del resto de los tratamientos. Este valor resulta mayor al tratamiento que reportaron Gholamhoseini *et al.* (2013), de 1.3 kg m^{-3} en estudios de restricción de riego en maíz en regiones áridas y semiáridas de Irán. El criterio de riego para el mejor tratamiento del estudio, en ambas etapas de desarrollo se considera de condiciones intermedias de humedad en el suelo equivalente a un potencial mátrico promedio en el estrato de 0-90 cm, de -0.48 MPa, para el desarrollo del

Cuadro 4. Consumo de agua en dos etapas de desarrollo y la respuesta del maíz a los diferentes tratamientos.

Tratamiento	ET_1 (cm)	ET_2 (cm)	HA_1 (%)	HA_2 (%)	Rg (t ha^{-1})	EUA (kg m^{-3})
1	46.2	30.4	45	44	8.58 b	1.12 b
2	46.2	21.3	43	80	6.86 c	1.02 c
3	40.3	23.2	60	59	10.34 a	1.63 a
4	40.3	13.1	56	100	5.06 e	0.95 c
5	36.5	29.9	81	44	7.10 c	1.07 b
6	36.6	21.2	81	83	6.14 d	1.06 bc
7	25.0	23.1	94	60	5.36 e	1.11 b

ET_1, ET_2: consumo de agua en la primer y segundo periodo, respectivamente; HA_1, HA_2: humedad aprovechable consumida por el maíz en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente; Rg: rendimiento de grano; EUA: eficiencia de uso de agua del maíz. Medias con la misma letra en las columnas de la derecha son estadísticamente iguales según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 5. Análisis de varianza y significancia estadística para rendimiento de grano y eficiencia de uso de agua.

Fuente de variación	GL	Rendimiento de grano	Eficiencia de uso de agua
Bloques	4	0.0483	0.0034
Tratamientos	6	17.3723**	0.2508**
Error	24	0.1098	0.0034
CV (%)		4.7	5.1

GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, **: significancia con $P \leq 0.01$.

maíz. El resto de los tratamientos presentaron valores de EUA significativamente menores al citado.

Modelo de la relación del rendimiento de grano y del nivel de humedad del suelo

Por medio de análisis de regresión se ajustaron los datos observados del rendimiento de grano como variable dependiente y la humedad aprovechable consumida al momento del riego como variable independiente; la función encontrada se presenta en la siguiente ecuación:

$$Rg = -13.29 + 0.4914HAC_1 + 0.2947HAC_2 - 0.0043HAC_1^2 - 0.0028HAC_2^2 + 0.0004HAC_1 \times HAC_2$$
$$R^2 = 0.94 \quad CV = 6.5\ \%$$

donde: Rg representa el rendimiento de grano del maíz (t ha^{-1}), y HAC_1 y HAC_2 representan la humedad aprovechable consumida del suelo al momento del riego (%), en el periodo vegetativo y reproductivo, respectivamente. Los coeficientes de la regresión que definen al modelo fueron significativos según la prueba de t ($P \leq 0.05$), por lo que contribuyen al modelo de manera significativa. Posteriormente, se realizó el análisis de optimización de la función obtenida de acuerdo con la teoría de máximos y mínimos. De este análisis se concluyó que el maíz maximiza su producción de grano Rg = 9.95 t ha^{-1}, al desarrollarse bajo un nivel de humedad del suelo equivalente a HAC_1 = 60 y HAC_2 = 57.6 % de la humedad aprovechable consumida para el primer y segundo periodo, respectivamente, como se muestra en la Figura 2, donde puede apreciarse el comportamiento de rendimientos crecientes y decrecientes del maíz a diferentes niveles de humedad aprovechable consumida en el suelo, esta tendencia es también reportada por investigadores como Trout y DeJonge (2017), quienes resaltan la importancia de este tipo de funciones de producción del riego para el logro de una mejor planeación e incremento en la eficiencia del uso del agua y para alcanzar un manejo sustentable de este recurso.

Rendimiento de grano en función de la lámina de agua consumida

Al relacionar la producción de grano del maíz en función de la lámina de agua consumida correspondiente a cada tratamiento, se encontró que entre ambas variables existió una relación de tipo cuadrática (Figura 3). La siguiente ecuación representa dicha función, obtenida después de realizar el análisis de regresión entre ambas variables.

$$Rg = -21.3665 + 0.7349\ ET_1 + 1.0125\ ET_2 - 0.0083ET_1^2 - 0.0189ET_2^2$$
$$R^2 = 0.58 \quad CV = 17.3\ \%$$

donde: Rg es el rendimiento de grano (t ha^{-1}), ET_1 y ET_2 son láminas consumidas (cm) en la etapa vegetativa y reproductiva respectivamente, R^2 representa al coeficiente de

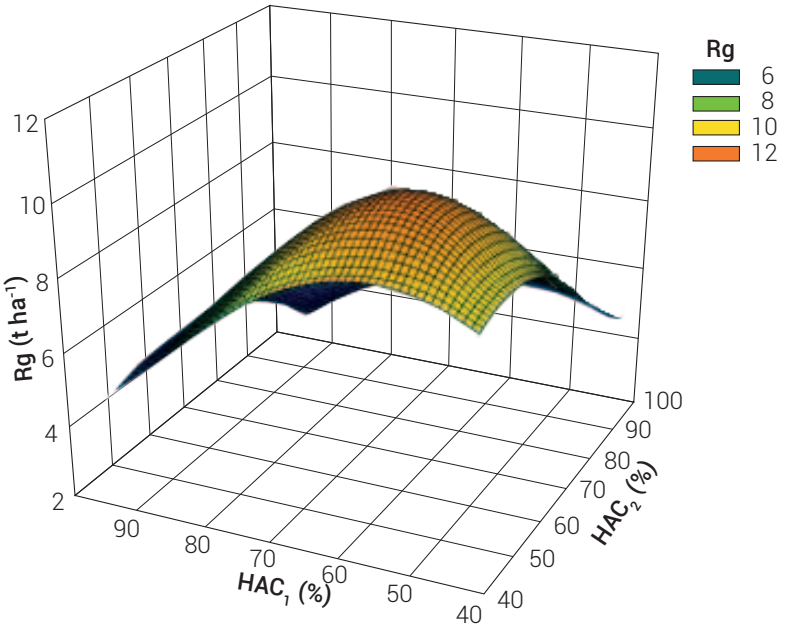


Figura 2. Respuesta del rendimiento de grano a la variación del régimen de humedad del suelo en dos periodos del crecimiento del maíz. Rg: rendimiento de grano, HAC_1 y HAC_2: humedad aprovechable consumida en el periodo vegetativo y reproductivo del maíz, respectivamente.

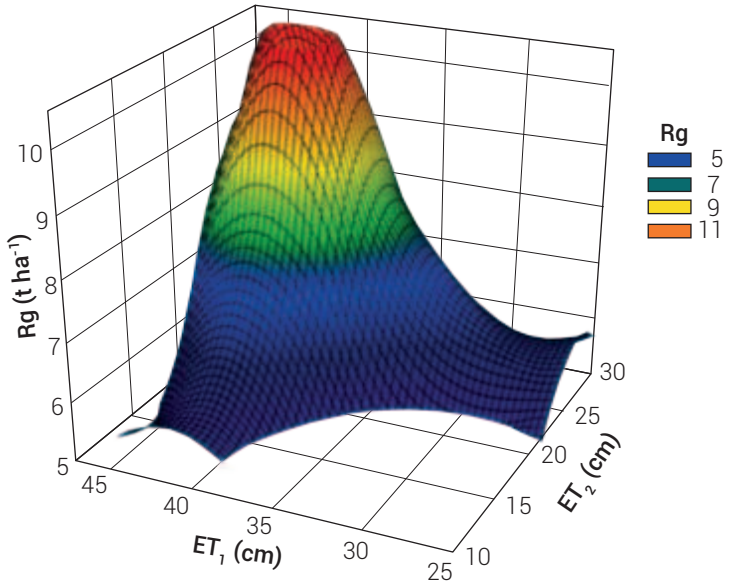


Figura 3. Modelo del rendimiento de grano y la evapotranspiración (cm), del maíz. Rg: rendimiento de grano; ET_1 y ET_2: evapotranspiración del maíz en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente.

determinación y CV al coeficiente de variación.

Del análisis de optimización de la función obtenida de acuerdo con la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral (Steel *et al.*, 1997), se concluyó que el maíz maximiza su producción de grano a 8.5 t ha^{-1}, con una lámina de agua consumida de 44.3 y de 26.8 cm durante el periodo ET_1 y ET_2, respectivamente; sin embargo, al analizar la pendiente de la función de producción obtenida (Figura 3), se deduce que si la lámina consumida se reduce al consumo del mejor tratamiento (60-60), de ET_1 = 40.3 y ET_2 = 23.2 cm, el rendimiento de grano obtenido es similar (Rg = 8.1 t ha^{-1}), sólo 400 kg ha^{-1}, lo que no representa una disminución significativa, debido a que la tasa de

incremento de rendimiento de grano por unidad de agua consumida es prácticamente la misma en esta parte de la función de producción (Gheysari *et al.*, 2017). Estos resultados son similares a los obtenidos por Inzunza-Ibarra *et al.* (2006) en las mismas condiciones climáticas de la Laguna, quienes reportaron 8.1 t ha^{-1} con un consumo de agua de 79.4 cm.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de los modelos obtenidos, el rendimiento de grano del maíz tuvo una respuesta no lineal a los diferentes niveles de humedad en el suelo. Con la optimización de la función de producción al régimen de humedad se deduce que los valores óptimos son similares a los del tratamiento 60-60 de irrigar el maíz cuando éste haya consumido el 60 y 57.6 % de la humedad aprovechable del suelo, en el periodo vegetativo y reproductivo, respectivamente, para maximizar su producción a 9.95 t ha^{-1}. Con respecto a la cantidad de agua a aplicar, la optimización de la relación de producción y el agua de riego deduce que el maíz maximiza su rendimiento de grano al consumir 44.3 y 26.8 cm para las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente. Al analizar las vecindades de la productividad marginal o pendiente de la función de producción al agua de riego, se concluye que la tasa de la productividad del agua tiene incrementos no significativos, por lo que se puede reducir la cantidad de agua consumida a 35 y 32 cm, respectivamente, sin afectar de manera significativa su rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Briones-Encinia F. y A. Martínez-Garza (2002) Eficiencia de algunos diseños experimentales en la estimación de una superficie de respuesta. *Agrociencia* 36:201-210.

Castellanos J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. AguilarSantelises (2000) Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2a edición. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, Gto. México. 226 p.

Farré I. and J. M. Faci (2009) Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 96:383-394, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.07.002

Fereres E. and M. A. Soriano (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58:147-159, https://doi-org/10.1093/jxb/erl165

García E. (2004) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Serie Libros Núm. 6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. 90 p.

García-Salazar J. A. and R. Skaggs (2015) Strategies for white and yellow maize cultivar improvement research and technology transfer in Mexico. *Agronomy Journal* 107:1425-1439, https://doi.org/10.2134/agronj14.0429

Geerts S. and D. Raes (2009) Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96:1275-1284, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009

Gholamhoseini M., M. AghaAlikhani, S. A. M. M. Sanavy, S. M. Mirlatifi and H. Zakikhani (2013) Response of corn and redroot pigweed to nitrogen fertilizer in different irrigation regimes. *Agronomy Journal* 105:1107-1118, https://doi.org/10.2134/agronj2012.0499

Gheysari M., S. H. Sadeghi, H. W. Loescher, S. Amiri, M. J. Zareian, M. M. Majidi, P. Asgarinia and J. O. Payero (2017) Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agricultural Water Management* 182:126-138, https//doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.014

Greaves G. E. and Y. M. Wang (2017) Effect of regulated deficit irrigation scheduling on water use of corn in southern Taiwan tropical environment. *Agricultural Water Management* 188:115-125, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.008

Inzunza-Ibarra M. A., M. Villa-Castorena, E. A. Catalán-Valencia y S. F. Mendoza-Moreno (2006) Modelo para estimar el rendimiento de maíz en función de la humedad del suelo. *Terra Latinoamericana* 24:179-185.

Kassam A. H., D. Molden, E. Fereres and J. Doorenbos (2007) Water productivity: science and practice –introduction. *Irrigation Science* 25:185-188, https://doi.org/10.1007/s00271-007-0068-x

Mansouri-Far C., S. A. M. Modarres Sanavy and S. F. Saberali (2010) Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management* 97:12-22, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.003

Martínez G. A. (1988) Diseños Experimentales: Métodos y Elementos de Teoría. Ed. Trillas. México, D. F. 756 p.

Ortega C. A., M. J. Guerrero H., O. Cota A., M. G. Vázquez C., J. A. Ruiz C. y J. M. Hernández C. (2013) Catálogo de Maíces Nativos de Sonora. Biblioteca Básica de Agricultura. INIFAP. México, D. F. 301 p.

Plenecassagne A, E. Romero F. y C. López B. (1997) Manual de Laboratorio. Métodos de Análisis de Suelos y Aguas. INIFAP-ORSTROM. Gómez Palacio, Durango, México. 173 p.

Rodrígues G. C., P. Paredes, J. M. Goncalves, I. Alves and L. S. Pereira (2013) Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: ranking for water saving vs. farm economic returns. *Agricultural Water Management* 126:85-96, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.005

SAS Institute (2008) SAS/STAT 9.2 User's Guide Introduction to Statistical Modeling with SAS/STAT Software. SAS Institute Inc. Cary, USA. 429 p.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2017) Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA. Ciudad de México. http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (Julio 2017).

Steel R. G. D., J. H. Torrie and D. A. Dickey (1997) Principles and Procedures of Statistics. A Biometrical Approach. Third edition. McGraw-Hill. New York, NY, USA. 666 p.

Trout T. J. and K. C. DeJonge (2017) Water productivity of maize in the US high plains. *Irrigation Science* 35:251-266, https://doi.org/10.1007/s00271-017-0540-1

Trout T. J. and W. Bausch (2017) USDA-ARS Colorado maize water productivity data set. *Irrigation Science* 35:241-249, https://doi.org/10.1007/s00271-017-0537-9

Van Donk S. J., J. L. Petersen and D. R. Davison (2013) Effect of amount and timing of subsurface drip irrigation on corn yield. *Irrigation Science* 31:599-609, https://doi.org/10.1007/s00271-012-0334-4

Villa C. M. M., E. A. Catalán V. y M. A. Inzunza I. (2005) Análisis de la información climática para usos agrícolas. *Agrofaz* 5:717-724.