

DÉFICIT HÍDRICO EN MAÍZ AL CONSIDERAR FENOLOGÍA, EFECTO EN RENDIMIENTO Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

WATER DEFICIT IN MAIZE CONSIDERING PHENOLOGY, EFFECT ON YIELD AND WATER USE EFFICIENCY

Ernesto Sifuentes-Ibarra¹, Waldo Ojeda-Bustamante^{2*}, Jaime Macías-Cervantes¹,
Cándido Mendoza-Pérez³, Pablo Preciado-Rangel⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF). Carretera internacional México-Nogales km 1609, 81110, Juan José Ríos, Sinaloa, México. ²Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación. Vicente Garrido No. 106. Colonia Ampl. Maravillas, 62330, Cuernavaca, Morelos, México. (w.ojeda@riego.mx). ³Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Posgraduados. 56230, Montecillo, México. ⁴Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, 27170, Ejido Ana, Torreón, Coahuila, México.

RESUMEN

La presencia de períodos de disponibilidad hídrica baja y las eficiencias de riego bajas obligan a los distritos de riego (DR) a implementar acciones como la reducción de la superficie cultivada y el número de riegos de los cultivos. Esto, causa en muchos casos, impactos negativos en rendimiento al no aplicarse en forma científica. El objetivo de esta investigación fue evaluar de manera experimental el efecto del estrés hídrico a partir de la fenología, en los componentes del rendimiento y en el uso eficiente del agua del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). El experimento se realizó en el distrito de riego DR-075, durante el ciclo otoño-invierno (OI) 2012-2013 y se evaluaron cuatro tratamientos (T) de déficit hídrico y un testigo (TES) diseñados a partir de la función FAO que relaciona el déficit hídrico con el rendimiento. T1 recibió dos riegos de auxilio (RA) distribuidos en las etapas V12 y R2; T2 recibió tres RA distribuidos en V9, R1 y R3; T3 recibió cuatro en V7, V12, R1 y R3-R4. T4 cinco RA en V5, V12, R1, R3 y R4. El TES recibió cuatro RA distribuidos igual que T3, pero aplicados en forma convencional. Las variables evaluadas fueron: eficiencia de aplicación (EA), materia fresca (MF), materia seca (MS), rendimiento de grano (Ya), índice cosecha (IC) y productividad del agua (PA). El seguimiento de riegos y fenología se realizó con la plataforma informática IRRIMODEL complementada con observaciones de campo; el monitoreo de la humedad del suelo se realizó con un sensor portátil tipo TDR. Los resultados proporcionaron información científica para ma-

ABSTRACT

The occurrence of low water availability periods and low irrigation efficiencies force irrigation districts (DR) to take actions such as reducing the crop area and the number of applied irrigations. This, in many cases, causes negative yield impacts when not applied in a scientific way. The objective of this research was to experimentally evaluate the water stress effects on yield components and water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) based on phenology. The experiment was conducted in the DR-075 irrigation district, during the autumn-winter (OI) 2012-2013 season, and four treatments (T) of water deficit and a control (TES) were evaluated, designed under the FAO function that relates water deficit to yield. T1 received two auxiliary irrigations (RA) distributed in growth stages V12 and R2; T2 received three RA distributed in V9, R1 and R3; T3 received four in V7, V12, R1 and R3-R4. T4 received five RA in V5, V12, R1, R3 and R4. TES received four RA distributed in the same way as T3 but applied in a conventional manner. The evaluated variables were application efficiency (EA), fresh matter (MF), dry matter (MS), grain yield (Ya), harvest index (IC) and water productivity (PA). Irrigation and phenology monitoring was carried out with the IRRIMODEL computer platform complemented with field observations; soil moisture monitoring was performed with a portable TDR type sensor. Results provided scientific information to manage corn crop irrigation considering phenology, under normal and restricted water availability conditions. In the first scenario, the fifth auxiliary irrigation should be avoided, and in the second, the three auxiliary schedule (T2) should be used to obtain application efficiencies equal to or greater than 64%.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9613-1608>

Recibido: junio, 2020. Aprobado: marzo, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 55: 209-226. 2021.

nejear el riego del cultivo de maíz considerando fenología, bajo condiciones normales y de disponibilidad hídrica restringida. En el primer escenario se debe evitar el quinto riego de auxilio y en el segundo, utilizar el calendario de tres auxilios (T2) para obtener eficiencias de aplicación iguales o mayores a 64%.

Palabras clave: *Zea mays* L., disponibilidad hídrica, riego por gravedad, planeación del riego, rendimiento.

INTRODUCCIÓN

La escasez de agua afecta al 52% de la población mundial en las regiones áridas y semiáridas. La agricultura de riego se practica con mayor frecuencia en un ambiente restringido e incierto de recursos hídricos, debido a la intensificación de la variabilidad climática y a una competencia hídrica mayor por usuarios no agrícolas (Gheysari *et al.*, 2017). El maíz es la tercera gramínea más importante en el mundo con 20% de la superficie cosechada cada año bajo riego y se localiza de manera principal en las zonas áridas y semiáridas donde existe variabilidad alta en los volúmenes de agua disponibles (FAO, 2011; Steduto *et al.*, 2014).

México es uno de los principales productores de maíz en el mundo, pero su consumo interno es superior a su producción; sus importaciones superan los 7 millones Mg anuales (SIAP, 2016). El estado de Sinaloa, en la región noroeste de México, es el principal productor de maíz bajo riego en el país al cosechar cada año más de 452 000 ha en sus ocho distritos de riego (DR), con una producción de 5.29 millones Mg (SIAP, 2020). Estudios de análisis de cambio climático para este estado indican una anomalía positiva de la temperatura de 1 a 2 °C respecto al periodo base 1961-1990 y una reducción de la precipitación del 20% (Castillo e Ibáñez, 2017; Lobato y Altamirano, 2017) que han impactado en la duración de los ciclos fenológicos y productividad de los cultivos. Además de afectaciones cada vez más frecuentes de eventos climáticos extremos como ciclones, heladas y sequías (Ojeda *et al.*, 2011).

Otro problema importante de las zonas de riego de México, es la gestión deficiente del riego por gravedad porque en la mayoría de los casos no se utilizan técnicas científicas para el diseño, programación, aplicación y evaluación que resultan en eficiencias de riego globales de 34.1% (Olmedo *et al.*, 2017). En los DR del norte de Sinaloa, a nivel parcelario,

Key words: *Zea mays* L., water availability, surface irrigation, irrigation planning, yield.

INTRODUCTION

Water scarcity affects 52% of the population in arid and semi-arid regions of the world. Irrigated agriculture is more frequently practiced under a constrained and uncertain water resource scenario due to intensification of climate variability and an increasing water competition by non-agricultural users (Gheysari *et al.*, 2017). Maize is the third most important staple in the world with 20% of the area harvested each year under irrigation and mainly located in arid and semi-arid zones, where there is high variability in available water volumes (FAO, 2011; Steduto *et al.*, 2014).

Mexico is one of the main maize producers in the world, but its domestic consumption exceeds its production; corn imports exceed 7 million Mg annually (SIAP, 2016). The state of Sinaloa, northwestern region of Mexico, is the leading irrigated maize producer in the country by harvesting more than 452 000 ha each year in eight irrigation districts (DR), with a total yield of 5.29 million Mg (SIAP, 2020). Climate change studies on this state indicate a positive temperature anomaly of 1 to 2 °C respect to 1961-1990 base period, and a 20% reduction in precipitation (Castillo and Ibáñez, 2017; Lobato and Altamirano, 2017). All this has impacted the duration of phenological seasons and crop productivity. In addition to increasingly frequent damages from extreme weather events such as cyclones, frosts and droughts (Ojeda *et al.*, 2011). Another important problem in irrigated areas of Mexico lies in the poor management of surface irrigation, because in most cases, scientific techniques are not used for its design, programming, application and evaluation. Then, resulting in 34.1% overall irrigation efficiencies (Olmedo *et al.*, 2017). According to data from DRs of northern Sinaloa, less than 45% of the applied water is used at farm level; water runs out of the root zone through surface drainage and deep percolation (Sifuentes *et al.*, 2015). Therefore, actions are required to improve water use in terms of productivity, savings and sustainability, under different scenarios of water availability (Feres and Soriano, 2006). There are some irrigation strategies that allow reducing the frequency and

se aprovecha menos del 45% del agua aplicada, el resto se mueve fuera de la zona radical a través del drenaje superficial y percolación profunda (Sifuentes *et al.*, 2015). Por lo tanto, se requieren acciones para mejorar el aprovechamiento del agua en términos de productividad, ahorro y sustentabilidad, bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica (Feres y Soriano, 2006). Hay estrategias de riego que permiten reducir la frecuencia y cantidad de riego en los cultivos con efectos mínimos en los rendimientos convencionales si se validan en escala local, como la aplicación del riego deficitario en función del desarrollo fenológico (Mendoza-Pérez *et al.*, 2016). Sin embargo, estas estrategias pueden generar una reducción en el crecimiento del cultivo y en el desarrollo del área foliar, y en consecuencia del rendimiento de maíz (Paredes *et al.*, 2014).

Stewart *et al.* (1977) propusieron relaciones empíricas para predecir el efecto de la evapotranspiración en el rendimiento de los cultivos, usaron un factor de respuesta *Ky* que representa la relación entre la producción y el uso del agua de un cultivo incluso para cada etapa fenológica. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) adoptó esas relaciones para estimar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento potencial de los cultivos (Doorenbos y Kassam, 1979; Steduto *et al.*, 2014). Estas relaciones pueden contribuir al ahorro de volúmenes de agua significativos con reducción mínima en el rendimiento de grano y materia seca cuando se aplican en forma apropiada, ya que se reducen los requerimientos de riego en las etapas menos sensibles al estrés hídrico.

La experimentación y aplicación de la relación déficit hídrico-rendimiento permite estimar el efecto del estrés hídrico por etapa fenológica en el rendimiento de maíz y puede usarse para analizar escenarios de disponibilidad hídrica normal y restringida; con el ajuste de la cantidad y oportunidad de riegos en las zonas irrigadas de México, localizadas principalmente en las regiones áridas y semiáridas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del estrés hídrico aplicado por etapas fenológicas en los componentes del rendimiento del cultivo de maíz bajo riego por gravedad. La hipótesis es que estos ajustes pueden reducir de manera óptima la frecuencia y cantidad de riego por aplicar.

quantity of irrigation in crops with minimal effects on conventional yields. For example, the application of regulated deficit irrigation according to plant phenological development, if this is validated at a local scale (Mendoza-Pérez *et al.*, 2016). However, these strategies can generate reductions in crop growth and leaf area development, and consequently in corn yield (Paredes *et al.*, 2014).

Stewart *et al.* (1977) proposed empirical relations to predict the effect of evapotranspiration on crop yield, using a *Ky* response factor that represents the relationship between yield and water use of a crop even for each phenological stage. The Food and Agriculture Organization under the United Nations (FAO) adopted such relations to estimate the effect of water stress on crop yield potential (Doorenbos and Kassam, 1979; Steduto *et al.*, 2014). These relationships can contribute to significant water volume savings with minimal reduction in grain and dry matter yields when applied properly, as irrigation requirements are reduced at stages less sensitive to water stress.

The experimentation and application of the water deficit and yield relationship allows estimating the effect of water stress by phenological stage on corn yield, and can be used to analyze scenarios of normal and restricted water availability; adjusting the amount and timing of water supply in irrigated areas of Mexico, located mainly in arid and semiarid regions. The objective of this study was to evaluate the effect of water stress applied by phenological stages on yield components of maize under surface irrigation. Under the hypothesis that these adjustments would optimally reduce the frequency of application and the overall amount of irrigation.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The study was established during 2012-2013 autumn-winter (OI) agricultural season, at the Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) under the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), located in the northern arid zone of Sinaloa, Mexico, with geographic coordinates of 25° 45' 53" N and -108° 48' 46" W at 12 m altitude. The soil is of clayish texture, with a bulk density (D_a , 1.15 g cm⁻³) and

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

El estudio se estableció durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2012-2013, en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en la zona árida del norte del estado de Sinaloa, México, en las coordenadas 25° 45' 53" N y -108° 48' 46" O a 12 m de altitud. El suelo es de textura arcillosa, con densidad aparente (D_a) de 1.15 g cm⁻³ y valores estimados de las constantes hídricas capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), saturación (SAT) y humedad aprovechable (HA) de 0.52, 0.36, 0.57 y 0.16 cm³cm⁻³, respectivamente. El suelo es moderadamente bajo en materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), con niveles satisfactorios de pH (7.05), conductividad eléctrica (CE) (0.96 dS m⁻¹), carbonatos totales (1.96%) y sodio intercambiable (175 mg L⁻¹).

La precipitación anual acumulada promedio de la zona de estudio es 350 mm, el 70% se concentra de julio a septiembre, y de febrero a mayo la precipitación es insignificante. Los valores anuales de la evapotranspiración de referencia acumulada (ET_o) varían de 1600 a 1700 mm, que excede a la precipitación acumulada anual, por lo cual, se requiere el riego para asegurar rendimientos comerciales, principalmente en el ciclo agrícola otoño-invierno (OI).

Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques al azar con cinco repeticiones, los tratamientos (T) fueron cuatro, más un testigo (TES). Los tratamientos se diseñaron como funciones de la relación rendimiento-déficit hídrico aplicado por etapas fenológicas de Doorenbos y Kassam (1979) y Steduto *et al.* (2014), como se muestra en la ecuación (1):

$$\left(\frac{Y_x - Y_{EST}}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

donde Y_x es el rendimiento máximo esperado en la zona de estudio; Y_{EST} es el rendimiento estimado; ET_x y ET_a son respectivamente la evapotranspiración máxima y actual, calculadas como la acumulación de evapotranspiración del cultivo diaria (ET) hasta madurez fisiológica; K_y es un factor de proporcionalidad entre la pérdida de rendimiento relativo y la reducción relativa en evapotranspiración, el cual varía por etapas fenológicas.

El valor de K_y utilizado para T1 fue 2.3 y 1.25 para los demás tratamientos se consideraron los valores de $Y_x = 12$ Mg ha⁻¹

the estimated values of the water constants field capacity (CC), permanent wilting point (PMP), saturation (SAT) and usable moisture (HA) are 0.52, 0.36, 0.57, 0.16 cm³cm⁻³, respectively. The soil is moderately low in organic matter (MO), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), with satisfactory levels of pH (7.05), electrical conductivity (CE) (0.96 dS m⁻¹), total carbonates (1.96%) and exchangeable sodium (175 mg L⁻¹).

The average annual accumulated precipitation in the study area is 350 mm, 70% concentrates from July to September, and from February to May precipitation is negligible. The annual values of the accumulated reference evapotranspiration (ET_o) vary from 1600 to 1700 mm, which exceeds the annual accumulated precipitation. Therefore, irrigation is required to ensure commercial yields, mainly in the autumn-winter (OI) agricultural season.

Treatments and experimental design

The experimental design was in randomized blocks with five replications, there were four treatments (T), plus a control (TES). The treatments were designed as functions of the yield-water deficit relationship applied by phenological stages of Doorenbos and Kassam (1979) and Steduto *et al.* (2014), as it is shown in equation (1):

$$\left(\frac{Y_x - Y_{EST}}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

where Y_x is the maximum expected yield in the study area; Y_{EST} is the estimated yield; ET_x and ET_a are respectively the maximum and actual evapotranspiration, calculated as the daily crop evapotranspiration accumulation (ET) until physiological maturity; K_y is a proportionality factor between the relative yield loss and the relative reduction in evapotranspiration, which varies by phenological phases.

The K_y value used for T1 was 2.3 and 1.25 for the other treatments the expected TES values of $Y_x = 12$ Mg ha⁻¹ and $ET_x = 52.3$ cm were considered. The irrigation schedule applied in TES (T5) was based on INIFAP (2017) technological recommendations, and on the management of leading farmers in the study area.

One of the most commonly used variables to study the water applied to a plot is the concept of gross depth (Lb), estimated as the quotient between the volume applied and the irrigated area. Another hydrometric variable estimated was the irrigation requirement of the crop, expressed through the net depth (Ln). There is a widely used methodology to estimate the net depth (Ojeda *et al.*, 2006). The quotient between both depths (Ln/Lb) integrates the concept of irrigation application efficiency (EA).

y $ET_x = 52.3$ cm esperados en TES. El calendario de riegos aplicado en TES (T5) se basó en el paquete recomendado por el INIFAP (2017) y en el manejo de los agricultores líderes de la zona de estudio.

Una de las variables más usadas para estudiar el agua aplicada a una parcela es el concepto de lámina bruta (Lb), estimada como el cociente entre el volumen aplicado y el área regada. Otra variable hidrométrica estimada, fue el requerimiento de riego del cultivo y se expresa a través de la lámina neta (Ln). Existe una metodología muy usada para estimar la lámina neta (Ojeda *et al.*, 2006). El cociente entre ambas láminas (Ln/Lb) integra el concepto de eficiencia de aplicación del riego (EA).

Para cada tratamiento T descrito (Cuadro 1) se indica la etapa fenológica con sus grados-día desarrollo acumulados (GDDA) y el grado de estrés hídrico planificado para cada riego, expresado como Ln; lámina bruta (Lb) programada, rendimiento estimado (Y_{EST}), así como lámina neta relativa (RLn) y rendimiento relativo estimado (YR_{EST}) respecto a TES. Los GDDA se calcularon con la metodología utilizada por Ojeda *et al.* (2006). Para cada tratamiento se consideró un riego de germinación de 23 cm (Lb) similar al aplicado en parcelas comerciales en escenarios de suelo seco cercano a PMP. Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica automatizada (EMA) instalada a 200 m del lote experimental. Durante el experimento, el valor de precipitación se consideró despreciable; por lo tanto, ET_a equivale a Ln, en cada intervalo de riego.

At each described T (Table 1) the phenological stage is indicated, along with its cumulative Growing Degree-Days (GDDA) and the planned level of water stress per each irrigation, expressed as Ln; programmed gross depth (Lb), estimated yield (Y_{EST}), as well as estimated relative yield (YR_{EST}) and relative net depth (RLn) in relation to TES. GDDA were calculated with the methodology used by Ojeda *et al.* (2006). For each treatment, a 23 cm (Lb) irrigation depth for germination was provided, similar to that applied in commercial plots under a drought scenario close to PMP. Climatic data were obtained from an automated weather station (EMA) installed 200 m away the experimental plot. During the experiment, the precipitation value was considered negligible; therefore, ET_a equals Ln, at each irrigation interval.

The experimental plot was a rectangular plot of 1.2 ha (120 x 100 m), watered by surface irrigation, with furrows of 100 m in length established on the shortest side, with a longitudinal slope of 0.1% in the direction of flow and a transversal slope of 0.05%. Water was applied with calibrated PVC siphons of 1.5" in diameter, to maintain an approximate positive head of 7 cm and an average flow rate of 0.6 L s⁻¹ per furrow. Soil preparation for sowing was carried out by subsoiling, ploughing, two passes of harrow, levelling and furrow formation (80 cm separation). A base fertilization of 450 kg ha⁻¹ of the 30-10-12 N-P-K physical mixture was applied to the prepared soil. Dry sowing was made on December 12, 2012 with a Monosem® precision planter after

Cuadro 1. Descripción de tratamientos aplicados para la evaluación de estrés hídrico en maíz, basados en etapas fenológicas.

Table 1. Description of treatments used to evaluate water stress in maize, based on phenological stages.

Tratamiento	Descripción y fases fenológicas bajo estrés hídrico	Ln (cm)	RLn (%)	Lb (cm)	Y_{EST} (Mg ha ⁻¹)	YR_{EST} (%)
T1	2 riegos de auxilio (RA): V12 (722 GDDA) y R2 (954 GDDA). Estrés fuerte en la etapa vegetativa (EV) y en maduración	43.1	82	61.1	7.2	60
T2	3 RA: V9 (606 GDDA), R1 (859 GDDA) y R3 (1167 GDDA). Estrés moderado a la mitad de EV y fuerte en maduración	49.6	95	79.0	11.2	94
T3	4 RA: V7 (514 GDDA), V12 (722 GDDA), R1, R3-R4 (1167-1256 GDDA). Estrés ligero al inicio del ciclo y estrés moderado en maduración.	52.3	100	82.8	12.0	100
T4	5 RA: V5 (389 GDDA), V12, R1, R3, R4. Estrés ligero al inicio y al final del ciclo	51.7	99	87.7	11.8	99
T5 (TES)	Igual que T3 pero con láminas brutas similares al manejo convencional	52.3	100	92.9	12.0	100

V5, V7, V9 y V12: etapas fenológicas quinta, séptima, novena, y décima segunda hoja verdadera; R1, R2, R3 y R4: fases jiloteo o polinización, grano acuoso, grano lechoso y grano masoso. ♦ V5, V7, V9 and V12: fifth, seventh, ninth, and twelfth leaf blade (phenological plant stages); R1, R2, R3 and R4: silking, kernel blister, kernel milk, and kernel dough (phenological grain fill stages).

La parcela experimental fue de forma rectangular de 1.2 ha (120 x 100 m), regada por riego por gravedad, con surcos de 100 m de longitud establecidos en el lado más corto, con pendiente longitudinal de 0.1% en el sentido del flujo y transversal de 0.05%. El agua se aplicó con apoyo de sifones calibrados de PVC de 1.5" de diámetro, para mantener una carga positiva aproximada de 7 cm y un gasto promedio de 0.6 L s⁻¹ por surco. La preparación del suelo para la siembra, se realizó un subsoleo, un barbecho, dos pasos de rastra, empareje y formación de surcos (separados a 80 cm). En el terreno preparado se aplicó una fertilización de base con dosis de 450 kg ha⁻¹ de la mezcla física 30-10-12 de N-P-K. La siembra se realizó en seco el 12 de diciembre de 2012 con sembradora de precisión marca Monosem® después de aplicar la fertilización de base, con la variedad comercial DK-3000 de ciclo intermedio (aproximadamente 1456 GDDA a madurez fisiológica) con una densidad aproximada de 100 000 semillas ha⁻¹. Un riego de germinación se aplicó al lote experimental al siguiente día de la siembra para uniformizar la humedad y llevar el suelo a CC en la zona de raíces (100 cm). La germinación se presentó el 24 de diciembre, 12 días después de la siembra (dds), la máxima cobertura del dosel ocurrió entre el 26 y el 31 de marzo del 2013 (104 a 109 dds) y la senescencia se presentó del 03 al 10 de mayo (142 a 149 dds) y dependió del tratamiento. Una fertilización complementaria se aplicó con 100 kg ha⁻¹ de urea (46-00-00) en la etapa fenológica V5.

Variables medidas

A cada tratamiento se le dio seguimiento fenológico de acuerdo con la metodología de Abendroth *et al.* (2011), con el programa IRRIMODEL® (Sifuentes y Macías, 2015), complementado con observaciones de campo. En la etapa de madurez fisiológica, se midieron las variables materia fresca (MF), biomasa (B), índice de cosecha (IC) y rendimiento de grano (Ya), por medio de muestreos en cinco sitios representativos en un área de 0.8 m² en cada repetición de cada tratamiento (1 m x 0.8 m). En cada muestra se separaron tallo, hoja, grano, totomoxtle y olote para obtener el peso fresco (PF) y seco (PS) de cada órgano, con deshidratación forzada en un horno de secado a temperatura de 65 °C hasta peso constante. La B se calculó al sumar los PS de cada órgano (kg ha⁻¹) y el IC al dividir el peso seco del grano (PSG) entre B.

La evaluación del rendimiento del grano se realizó antes de la cosecha a los 191 dds (1898 GDDA), por medio de muestreos en sitios representativos en los dos surcos centrales de cada parcela experimental de cada tratamiento en un área de 8 m² por sitio (5 m x 0.8 m x 2 surcos). En esta evaluación también se midieron las variables complementarias: altura de planta (ALP) y plantas sin mazorca o "jorras" (PLJ).

applying the base fertilization, with the DK-3000 commercial maize variety of intermediate season (approximately 1456 GDDA at physiological maturity) at an approximate density of 100 000 seeds ha⁻¹. A germination irrigation was applied to the experimental plot a day after sowing to uniform the moisture and bring the soil to CC in the root zone (100 cm). Germination occurred on December 24, 12 days after sowing (das), maximum canopy cover occurred between March 26 and 31, 2013 (104 to 109 das); senescence occurred from May 03 to 10 (142 to 149 das) and was dependent on treatments. A supplemental fertilization was applied with 100 kg ha⁻¹ of urea (46-00-00) at V5 phenological stage.

Measured variables

Each treatment was monitored on plant phenology according to the methodology of Abendroth *et al.* (2011), with the IRRIMODEL® program (Sifuentes and Macías, 2015), complemented with field observations. At the physiological maturity stage, fresh matter (FM), biomass (B), harvest index (CI) and grain yield (Ya) were measured by sampling in five representative sites in an area of 0.8 m² in each replicate per treatment (1 m x 0.8 m). In each sample, we separated stem, leaf, kernels, dry ear husk (totomoxtle), and cob (olote) to obtain the fresh weight (PF) and dry weight (DW) of each plant organ, with forced dehydration in an oven at a temperature of 65 °C until constant weight. B was calculated by adding the PS of each organ (kg ha⁻¹) and the IC by dividing the dry weight of the grain (DWG) by B.

Grain yield evaluation was carried out before harvest at 191 das (1898 GDDA) by sampling in representative sites in the two central furrows at each experimental plot per treatment in an area of 8 m² per site (5 m x 0.8 m x 2 furrows). In this evaluation, the following complementary variables were also measured: plant height (ALP) and sterile plants with no ear (PLJ, locally known as "jorras").

The water variables measured were Ln, Lb, application efficiency (EA) and water productivity (PA). Both in the germination irrigation and in the auxiliary irrigations, volumetric soil moisture before irrigation (HV_{act}) was measured with a locally calibrated TDR (Time Domain Reflectometer) sensor to estimate Ln and bring the soil to CC based on equation (2).

$$Ln = (CC - HV_{act}) \times Pr \quad (2)$$

where CC and HV_{act} are expressed in cm³ cm⁻³, and Pr represents soil depth (cm).

The application efficiency (EA) was estimated with the expression: EA = (Ln / Lb) x 100 with Ln and Lb expressed in

Las variables hídricas medidas fueron Ln, Lb, eficiencias de aplicación (EA) y productividad del agua (PA). Tanto en el riego de germinación como en los riegos de auxilio se midió la humedad volumétrica del suelo antes del riego (HV_{act}) con sensor tipo TDR (o Time Domain Reflectometer) calibrado localmente, para estimar Ln y llevar el suelo a CC con la ecuación (2).

$$Ln = (CC - HV_{act}) \times Pr \quad (2)$$

donde CC y HV_{act} se expresan en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y Pr representa la profundidad del suelo (cm).

La eficiencia de aplicación (EA) se estimó con la expresión: $EA = (Ln / Lb) \times 100$ con Ln y Lb expresadas en cm; Lb se calculó con: $Lb = (Q \times t) / A$, donde Q es el gasto de riego aplicado a la parcela ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), t es el tiempo de riego (s) y A es la superficie regada (m^2); y PA se calculó al dividir el rendimiento de grano (kg ha^{-1}) entre el volumen de agua aplicado (V) en los tratamientos ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Un análisis de diferencias relativas (Δx) se realizó para las variables Ya, Lb, EA y PA de cada tratamiento respecto a TES; la ecuación (3) se utilizó para realizar este análisis.

$$\Delta x = \frac{(T_n - T_{TES})}{T_{TES}} \quad (3)$$

donde, T_n es el valor de la variable de interés del tratamiento n y T_{TES} es el valor obtenido de la misma variable en el testigo.

Al final se realizó un análisis de varianza del rendimiento de grano (Ya) para determinar el nivel de significancia entre tratamientos, y se usó el software estadístico MINITAB versión 2017 (Barsalou y Smith, 2018), para comparar las medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Déficit hídrico-rendimiento

Una comparación del nivel de déficit hídrico (DH) calculado como el valor de $1 - (ETa/ETx)$ se realizó (Cuadro 2) en ocho intervalos de etapas fenológicas en los cinco tratamientos; los valores altos indican niveles de estrés hídrico altos (Doorenbos y Kassam, 1979; Steduto *et al.*, 2014). En cada intervalo se muestran también los valores de ETa y ETx; y en la última columna se presenta el rendimiento obtenido (Ya) en cada tratamiento. T1 recibió un estrés fuerte en el intervalo V5-V12, estrés moderado en

cm; Lb was calculated with $Lb = (Q \times t) / A$, where Q is the irrigation applied to the plot ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), t is the irrigation time (s) and A is the irrigated area (m^2); and PA was calculated by dividing the grain yield (kg ha^{-1}) by the volume of water applied (V) in the treatments ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

An analysis of relative differences (Δx) was performed for the variables Ya, Lb, EA and PA of each treatment with respect to TES; to perform this analysis, equation (3) was used.

$$\Delta x = \frac{(T_n - T_{TES})}{T_{TES}} \quad (3)$$

where T_n is the value of the variable of interest in treatment n and T_{TES} is the value obtained for the same variable in the control (TES).

At the end, an analysis of variance of grain yield (Ya) was performed to determine the level of significance among treatments, and MINITAB v. 2017 (Barsalou and Smith, 2018) was used to compare means with Tukey's test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

Water deficit - yield relation

A comparison on water deficit (DH), calculated as the value of $1 - (ETa/ETx)$, was performed (Table 2) in eight phenological phase intervals in the five treatments; high values indicated high water stress levels (Doorenbos and Kassam, 1979; Steduto *et al.*, 2014). In each interval, ETa and ETx values are also shown, and in the last column the yield obtained (Ya) in each treatment is also displayed. T1 received high stress in the V5-V12 interval, moderate stress in flowering (R1-R2) and severe stress in ripening from the R4 to R6 stage with values ranging from 0.47 to 0.80, and a yield of 6.62 Mg ha^{-1} .

T2 received moderate stress before flowering (V12-R1) and low stress in vegetative stage (V5-V12) and kernel formation (R2-R3), with an Ya of 11.42 Mg ha^{-1} . T4 received low stress between stages V5-V12; R2-R3 and higher values of ETa than ETx were observed in the ripening stage, Ya was 12.56 Mg ha^{-1} . Since irrigations in T3 were applied on the same date and with the same Ln as the control TES (T5), water deficit values remained close to zero. The similarity of yields between T2 and T5 (TES) is worth noticing, which demonstrates the validity of the concept we evaluated. The correlation analysis between Ya and

Cuadro 2. Variación de la evapotranspiración (ETa) (mm) y el déficit hídrico (DH) en ocho intervalos de etapas fenológicas de maíz y su efecto en rendimiento (Ya), en cinco tratamientos de estrés basados en fenología, en el norte de Sinaloa, México.

Table 2. Variation of evapotranspiration (ETa) (mm) and water deficit (DH) in eight intervals of maize phenological stages and their effects on yield (Ya) in five phenology-based water stress treatments in northern Sinaloa, Mexico.

Tratamiento		Intervalos de fases fenológicas								Ya (Mg ha ⁻¹)
		S-V5	V5-V12	V12-R1	R1-R2	R2-R3	R3-R4	R4-R5	R5-R6	
T1	ETa	47.4	89.5	74.9	56.8	108.9	32.5	14.8	6.0	6.62
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.34	0.05	0.18	-0.24	0.29	0.47	0.80	
T2	ETa	47.4	124.9	65.9	69.8	84.2	46.0	27.6	30.0	11.42
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.08	0.16	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	
T3	ETa	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	12.41
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
T4	ETa	47.4	127.6	78.6	69.8	84.2	46.0	30.0	33.5	12.56
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.00	-0.08	-0.11	
T5 (TES)	ETa	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	11.87
	ETx	47.4	135.6	78.6	69.5	87.8	46.0	27.6	30.0	
	DH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

S: siembra; ETx: evapotranspiración máxima (mm). ♦ S: sowing; ETx: maximum evapotranspiration (mm).

floración (R1-R2) y estrés severo en maduración desde la etapa R4 hasta R6 con valores de 0.47 a 0.80, con un rendimiento de 6.62 Mg ha⁻¹.

T2 recibió un estrés moderado antes de floración (V12-R1) y ligero en etapa vegetativa (V5-V12) y formación de grano (R2-R3), con un Ya de 11.42 Mg ha⁻¹. T4 recibió un estrés ligero entre las etapas V5-V12; R2-R3 y se observaron valores más altos de ETa que ETx en la etapa de maduración, Ya fue de 12.56 Mg ha⁻¹. Debido a que los riegos en T3 se aplicaron en la misma fecha y con la misma Ln que TES (T5) el tratamiento tomado como referencia, los valores del déficit hídrico se mantuvieron cercanos a cero. Destaca la similitud de rendimientos entre T2 y T5 (TES), lo cual demuestra la validez de la evaluación del concepto. El análisis de correlación entre Ya y Y_{EST} generó un coeficiente de determinación (R²) de 0.9841 y un RMSE de 0.4495 Mg ha⁻¹ (Figura 1).

Variables hídricas

Los valores de Ln, Lb y EA se obtuvieron para cada tratamiento (Cuadro 3). T1 recibió Lb en el pri-

YEST generated a determination coefficient (R²) of 0.9841 with an RMSE value of 0.4495 Mg ha⁻¹ (Figure 1).

Water variables

The values of Ln, Lb and EA were obtained for each treatment (Table 3). T1 received Lb in the first (16.7 cm) and second (16.9 cm) auxiliary irrigations, with a cumulative value of 50.6 cm; the EA in this treatment was 61%. The cumulative value of Lb matched the results of Mendoza-Pérez *et al.* (2016) who applied a total depth of 50 cm during the entire agricultural season of the crop, using the same maize variety under surface irrigation. The depths applied in T2 were 9.0, 8.3, 13.5 cm in the 1st, 2nd and 3rd auxiliary irrigation, respectively, with accumulated depth of 63.3 cm and an EA of 64%. The depth applied in this treatment was similar to that of Rivetti (2006) with a consumption of 57 cm in the corn crop during the entire agricultural season.

T3 received Lb of 11.5, 13.0, 9.0, 9.0, 14.5 cm in the 1st, 2nd, 3rd, and 4th irrigations, respectively,

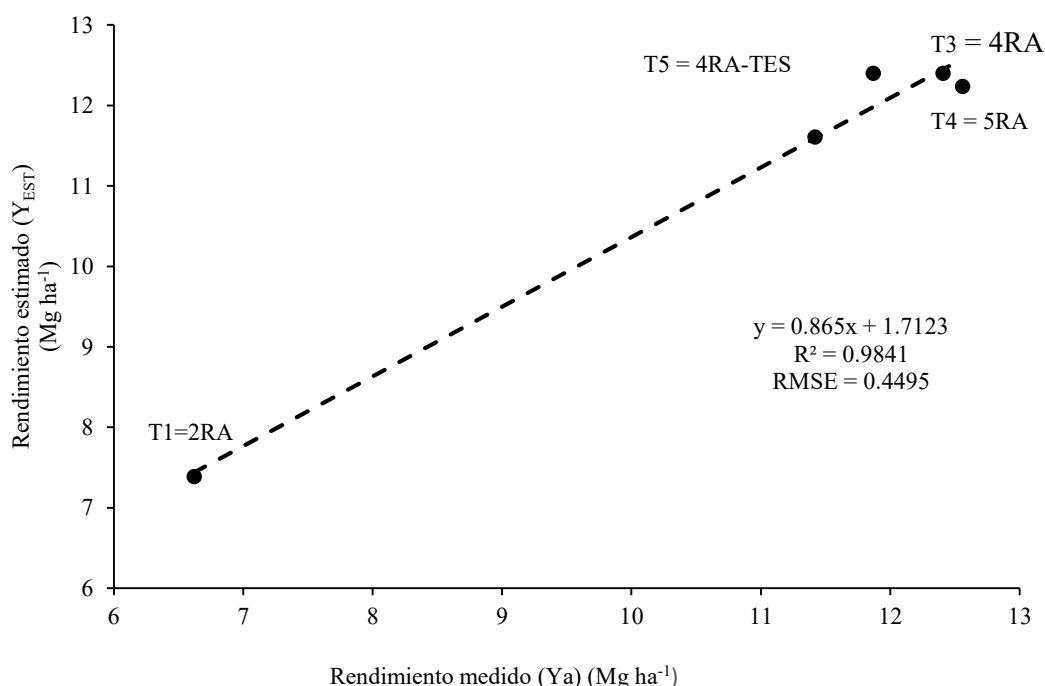


Figura 1. Comparación del rendimiento medido (Y_a) y rendimiento estimado (Y_{EST}) en cinco tratamientos de estrés hídrico en maíz, en el norte de Sinaloa, México.

Figure 1. Comparison of measured yield (Y_a) and estimated yield (Y_{EST}) in maize under five water stress treatments in northern Sinaloa, Mexico.

mer (16.7 cm) y segundo (16.9 cm) riegos de auxilio, con un valor acumulado de 50.6 cm; la EA en este tratamiento fue 61%. El valor acumulado de Lb coincidió con los resultados de Mendoza-Pérez *et al.* (2016) quienes aplicaron una lámina total de 50 cm durante todo el ciclo agrícola del cultivo de maíz de la misma variedad bajo riego por gravedad. Las láminas aplicadas en T2 fueron respectivamente 9.0, 8.3, 13.5 cm en el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} riego de auxilio, con lámina acumulada de 63.3 cm y una EA del 64%. La lámina aplicada en este tratamiento coincidió con lo aplicado por Rivetti (2006), con un consumo de 57 cm en el cultivo de maíz durante todo el ciclo agrícola.

El T3 recibió respectivamente Lb de 11.5, 13.0, 9.0, 14.5 cm en el 1^{er}, 2^{do}, 3^{er} y 4^{to} riegos de auxilio, con una lámina acumulada de 65 cm y una EA de 66%. Ojeda *et al.* (2006) documentaron para la misma zona de estudio, 42.2 cm de lámina neta y 73.6 cm de Lb en cultivo de maíz bajo riego por gravedad, al aplicar cuatro riegos de auxilio y el riego de germinación, con una eficiencia de aplicación de 57%. En T4 las láminas aplicadas fueron respectivamente 10.0, 12.9, 9.0, 16.5 y 10.3 cm en el 1^{er}, 2^{do}, 3^{er}, 4^{to},

with an accumulated depth of 65 cm and an EA of 66%. Ojeda *et al.* (2006) reported 42.2 cm of net depth and 73.6 cm of Lb in maize under surface irrigation at the same study area, when applying four auxiliary irrigations and the germination irrigation, with an application efficiency of 57%. In T4, the applied depths were 10.0, 12.9, 9.0, 16.5 and 10.3 cm in the 1st, 2nd, 3rd, 4th, and 5th auxiliary irrigation, respectively, with an accumulated depth of 75.7 cm and an AE of 67%. The depth applied in this treatment matched the used by Mendoza-Pérez *et al.* (2016) with a consumption of 73.5 cm in the corn crop during the entire agricultural season.

In the T5 control (TES), water depths were 15.6, 14.5, 14.4 and 14.3 cm in the 1st, 2nd, 3rd and 4th auxiliary irrigation; a total of 73.5 cm was applied, which represents 7350 m³ ha⁻¹ of water volume with an application efficiency of 59%. Ojeda *et al.* (2006) recorded similar values of irrigation depth in maize, and higher losses due to runoff and percolation. In all cases, the accumulated irrigation depth included the germination irrigation, and values were lower than the scheduled values. This occurred because

Cuadro 3. Lámina neta (Ln), Lámina bruta (Lb) y Eficiencias de aplicación (EA) en cinco tratamientos de estrés hídrico basado en fenología para cultivo de maíz, en el norte de Sinaloa, México.**Table 3. Net depth (Ln), gross depth (Lb) and application efficiencies (EA) in five phenology-based water stress treatments in maize (northern Sinaloa, Mexico).**

Tratamiento	Riego	Etapas	Días al riego	GDDA	Ln (cm)	Lb (cm)	EA (%)
T1	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V12	98	615	11.7	16.7	70
	2 ^{do} auxilio	R2	126	914	9.0	16.9	53
Total					30.7	50.6	60.7
T2	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V9	90	542	9.0	14.0	64
	2 ^{do} auxilio	R1	113	780	8.3	13.3	62
Total	3 ^{er} auxilio	R3	134	1005	13.5	19.0	71
					40.8	63.3	64.0
T3	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V-7	76	435	7.5	11.5	65
	2 ^{do} auxilio	V-12	99	626	8.6	13.0	66
	3 ^{er} auxilio	R1	113	780	6.3	9.0	70
Total	4 ^{to} auxilio	R3	134	1005	10.2	14.5	70
					42.6	65.0	66.0
T4	Germinación	Siembra	0	0	10.0	17.0	59
	1 ^{er} auxilio	V-5	62	364	6.5	10.0	65
	2 ^{do} auxilio	V-12	98	615	9.0	12.9	70
	3 ^{er} auxilio	R1	113	780	6.3	9.0	70
	4 ^{to} auxilio	R3	134	1005	11.7	16.5	71
Total	5 ^{to} auxilio	R4	148	1174	7.2	10.3	70
					50.7	75.7	67.5
T5 (TES)	Germinación	Siembra	0	0	5.5	14.7	37
	1 ^{er} auxilio	V-7	76	435	7.8	15.6	50
	2 ^{do} auxilio	V-12	99	626	9.0	14.5	62
	3 ^{er} auxilio	R1	113	780	9.8	14.4	68
Total	4 ^{to} auxilio	R3	134	1005	10.8	14.3	76
					42.9	73.5	58.6

y 5^{to} riego de auxilio, con una lámina acumulada de 75.7 cm y una EA de 67%. La lámina aplicada en este tratamiento coincidió con los resultados obtenidos por Mendoza-Pérez *et al.* (2016) con un consumo de 73.5 cm en el cultivo de maíz durante todo el ciclo agrícola.

En el control T5 (TES) las láminas fueron 15.6, 14.5, 14.4 y 14.3 cm en el 1^{er}, 2^{do}, 3^{er} y 4^{to} riego de auxilio; se aplicó un total de 73.5 cm que representa 7350 m³ ha⁻¹ de volumen de agua con una eficiencia de aplicación de 59%. Ojeda *et al.* (2006) registraron valores similares de láminas de riego en el cultivo de maíz, y pérdidas mayores por efecto de escurrimiento y percolación. En todos los casos la lámina acumulada incluyó al riego de germinación, y valores menores

the irrigation depth for germination irrigation in the design of treatments was calculated with the value considered for a soil close to PMP; but this condition did not happen in the field because the TDR monitoring indicated the presence of residual moisture.

Water productivity (PA) by treatment considered the total applied water (PALb) and the net depth required (PALn) (Figure 2). In the first indicator PALb, T3 had the highest value with 1.9 kg m⁻³, followed by T2, T4, T5 and T1 with 1.8, 1.7, 1.6 and 1.3 kg m⁻³, respectively. In the second indicator PALn, T2, T3 and T5 had respectively similar values (2.8, 2.9 and 2.8 kg m⁻³). PALb values observed by Giménez *et al.* (2016) were in the range of 1.39 to

a los programados. Esto ocurrió porque en el diseño de tratamientos, la lámina del riego de germinación se calculó con el valor considerado para un suelo cercano a PMP, lo cual no sucedió en la práctica pues el monitoreo con el TDR indicó presencia de humedad residual.

La productividad del agua (PA) por tratamiento consideró el agua total aplicada (PALb) y la (PALn) lámina neta requerida (Figura 2). En el primer indicador para PALb, T3 tuvo el valor más alto con 1.9 kg m⁻³, seguida del T2, T4, T5 y T1 con 1.8, 1.7, 1.6 y 1.3 kg m⁻³ respectivamente. En el segundo indicador para PALn, T2, T3 y T5 tuvieron respectivamente valores similares (2.8, 2.9 y 2.8 kg m⁻³). Los valores de PALb observados por Giménez *et al.* (2016) estuvieron en el intervalo de 1.39 a 2.17 kg m⁻³. En el caso de PALn, solo los valores de T1 y T4 estuvieron dentro del intervalo registrado por el mismo autor (1.75 a 2.55 kg m⁻³), en un estudio experimental realizado bajo riego deficitario con riego por gravedad.

Estos resultados indicaron una relación directa entre EA y rendimiento, y una relación inversa con el estrés hídrico, más acentuada en T1 y T5 (TES). Este comportamiento permite afirmar que al aumentar el número de riegos sin mejorar la EA no necesariamente

2.17 kg m⁻³. In the case of PALn, only the values of T1 and T4 were within the interval recorded by the same author (1.75 to 2.55 kg m⁻³), that was an experimental study conducted under regulated deficit by surface irrigation.

These results indicated a direct relationship between EA and yield, and an inverse relationship with water stress, more accentuated in T1 and T5 (TES). This behavior allows us to affirm that increasing the number of irrigations without improving EA does not necessarily improve yield, as it was the case in T4 (five auxiliary irrigations). T3 generated a yield similar to T4 and showed the possibility of saving 1070 m³ ha⁻¹ (14.5%) in relation to T4. Although PA of T2 was slightly lower than T3, water savings were 1240 m³ ha⁻¹ (16.8%) compared to T4, without considerable reduction on yield.

The following benefits are plausible with the potentially saved volumes: 1) to have additional volumes for non-agricultural uses, such as system runoff; or establishing 14 to 16% of additional maize crop area, if considering a typical local Lb of 74 cm to irrigate 1400 to 1600 ha, for every 10 000 established hectares. It was also estimated that it is possible to reach an economic yield of approximately

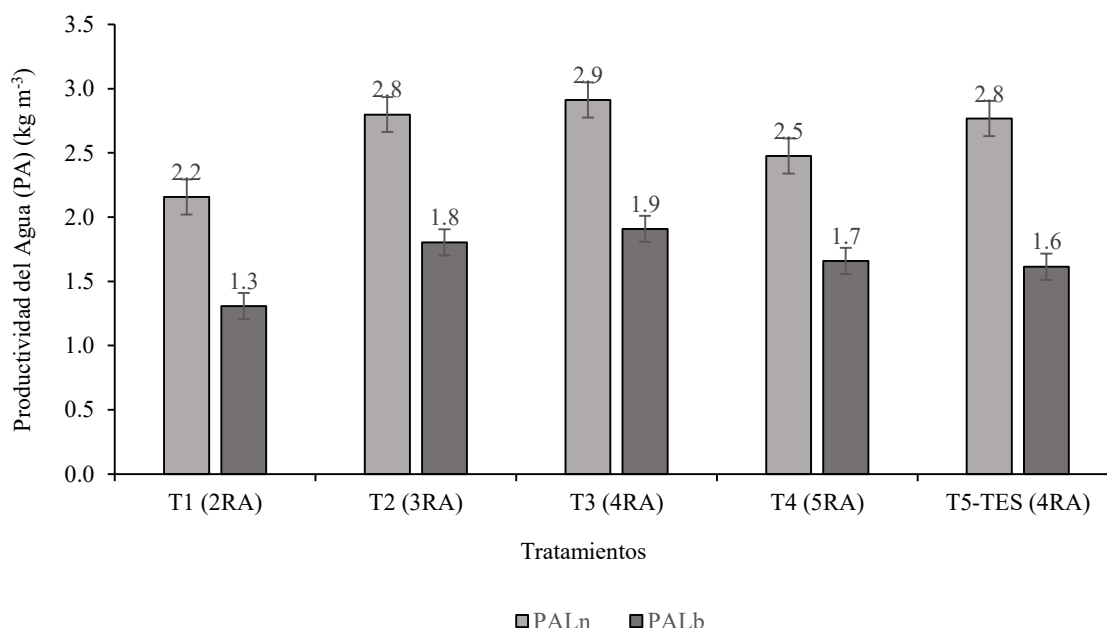


Figura 2. Productividad del agua derivada de Ln (PALn) y Lb (PALb) en cinco tratamientos de estrés hídrico basados en fenología para cultivo de maíz, en el norte de Sinaloa, México.

Figure 2. Water productivity derived from Ln (PALn) and Lb (PALb) in five phenology-based water stress treatments in maize cultivation (northern Sinaloa, Mexico).

se mejora el rendimiento, como se presentó en T4 (cinco auxilios). T3 generó un rendimiento similar a T4 y demostró la posibilidad de ahorrar 1070 m³ ha⁻¹ (14.5%) respecto al T4. Aunque la PA del T2 fue ligeramente menor a T3, el ahorro de agua fue 1240 m³ ha⁻¹ (16.8%) respecto al T4, sin reducción considerable en rendimiento.

Con los volúmenes potencialmente ahorrables, se pueden tener los siguientes beneficios: 1) contar con volúmenes adicionales para usos no agrícolas, como gasto ecológico, o establecer de 14 a 16% de superficie adicional de maíz, al considerar una Lb típica local de 74 cm para regar de 1400 a 1600 ha, por cada 10 000 establecidas. También se estimó que con la superficie adicional es posible tener un rendimiento económico del orden de 84.4 millones de MXN pesos (3.96 millones USD) según datos del ciclo agrícola 2018-2019, y 2) reducción de costos de producción por hectárea de 5 y 6% para los escenarios con número menor de riegos de auxilio, con 4 (70 USD) y con 3 (94 USD).

Relación humedad del suelo - rendimiento

El rendimiento de grano medido (Ya) y la variación de rendimiento (ΔY) se asociaron con el déficit de humedad del suelo causado en cada tratamiento (Cuadro 4). El rendimiento más bajo fue para T1 con 6.62 Mg ha⁻¹, lo cual significó una reducción del 44% respecto al TES donde el rendimiento fue 11.87 Mg ha⁻¹. En T2 el rendimiento fue 11.42 Mg ha⁻¹, una reducción de solo 3.79% comparado con TES. Los rendimientos del T3 y T4, que junto con TES son los escenarios más comunes de manejo del riego en la zona, fueron similares con 12.41 y 12.56 Mg ha⁻¹, los cuales representan aumentos respectivos de 4.55 y 5.81% comparados con TES. Entre estos tratamientos hubo diferencia estadística significativa en el rendimiento de grano (Ya).

Entre las estimaciones del contenido volumétrico de humedad del suelo (Figura 3) para los tratamientos excepto TES (porque el calendario de riegos de auxilio fue como en T3) y el contenido de humedad observado en cada uno de ellos se encontró un RMSE de 2.86%; valor que apoya la validez de la metodología. La figura también muestra la pertinencia de aprovechar el contenido de humedad del suelo en el riego inicial para disminuir Lb, y sugiere que debe considerarse la humedad al finalizar el ciclo para

84.4 million MXN pesos (3.96 million USD) with the additional area, according to data from the 2018-2019 agricultural season. Also, 2) to achieve reduction in the production costs per hectare in those scenarios with lower number of auxiliary irrigations: 5% with 4 (70 USD) and 6% with 3 (94 USD).

Soil moisture-yield relationship

Measured grain yield (Ya) and yield variation (ΔY) were associated with the soil moisture deficit caused in each treatment (Table 4). The lowest yield was for T1 with 6.62 Mg ha⁻¹, which meant a reduction of 44% in relation to TES where yield was 11.87 Mg ha⁻¹. In T2, yield was 11.42 Mg ha⁻¹, a reduction of only 3.79% compared to TES. The yields of T3 and T4, which along with TES are the most common irrigation management scenarios in the area, were similar with 12.41 and 12.56 Mg ha⁻¹, which represent respective increases of 4.55 and 5.81% compared to TES. There was significant statistical difference between these treatments in grain yield (Ya).

Between the estimations of volumetric soil moisture contents (Figure 3) for treatments (except TES, because the schedule of auxiliary irrigations was as in T3), and the actual moisture content observed in each of them, an RMSE of 2.86% was found; a value that supports confidence on the methodology. This figure also shows the relevance of taking advantage of the soil moisture content in the initial irrigation to decrease Lb and suggests that moisture at the end of the season should be considered for applying the last irrigation in advance and with a reduced Lb, in order to avoid ending the season (at maturity) with high moisture contents. This was the case of T4 and T3.

Regarding the other physiological variables measured along with Ya before harvest, the greatest negative effect caused by water stress was in T1. This negative effect resulted in 170 cm (ALP) plant height (60 to 70 cm less than those under other treatments) and a higher number of plants with no ear (PLJ).

Yield components

The treatment with the highest MF and MS in all organs was T3 (Figure 4), confirming that efficient irrigation programmed with a scientific irrigation schedule produced a favorable soil

Cuadro 4. Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento del cultivo de maíz bajo cinco tratamientos de estrés hídrico en el norte de Sinaloa, México.**Table 4. Effect of soil moisture content on maize yield under five water stress treatments in northern Sinaloa, Mexico.**

Tratamiento	Fase fenológica	HSAR (%)	HAC (%)	AHS (%)	Dr (días)	Ya (Mg ha ⁻¹)	ΔY (%)
T1	V12	37.0	11.0	73	98	6.62 c	-44.23
	R2	38.0	10.0	67	126		
	V9	37.5	10.5	70	90		
T2	R1	39.0	9.0	60	113	11.42 b	-3.79
	R3	40.0	8.0	53	134		
	V7	40.0	8.0	53	76		
T3	V12	41.0	7.0	47	98	12.41 a	+4.55
	R1	42.0	6.0	40	113		
	R3	42.0	6.0	40	134		
	V5	41.8	6.2	41	62		
T4	V12	41.9	6.1	41	98	12.56 a	+5.81
	R1	42.6	5.4	36	113		
	R3	42.8	5.2	35	134		
	R4	43.0	5.0	33	148		
T5 (TES)	V7	40	8	53	76	11.87 ab	0.00
	V12	41	7	47	98		
	R1	42	6	40	113		
	R3	42	6	40	134		

Medias con letra distintas (columna Ya) indican diferencia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$). HSAR: humedad volumétrica del suelo antes del riego; HAC: humedad aprovechable consumida; AHS abatimiento de humedad del suelo; Dr: días al riego; Ya: rendimiento medido; ΔY variación de rendimiento respecto al testigo. ♦ Means with different letters (Ya column) indicate statistical difference (Tukey, $p \leq 0.05$). HSAR: volumetric soil moisture before irrigation; HAC: usable moisture consumed; AHS: soil moisture abatement; Dr: days to irrigation; Ya: measured yield; ΔY yield variation regarding the control.

adelantar la aplicación del último riego con una Lb reducida para evitar terminar el ciclo (madurez) con contenidos de humedad altos. Tal como se presentó en T4 y en grado menor en T3.

Respecto a las otras variables fisiológicas medidas junto con Ya antes de la cosecha, el efecto negativo mayor provocado por el estrés hídrico fue en T1. Este efecto negativo consistió en una altura de planta (ALP) de 170 cm (60 a 70 cm menor que los otros tratamientos) y un número mayor de plantas sin mazorca (PLJ).

Componentes de rendimiento

El tratamiento con la producción mayor de MF y MS de todos los órganos fue T3 (Figura 4), y se confirma que riegos eficientes programados con

moisture environment for crop development. This occurred because root asphyxia stress (lack of O₂ in the root growth zone) was reduced, and there was a direct effect on biomass production, unlike what was observed in T5 (TES). Jiménez *et al.* (2012) stated that flooding stress generated irreversible changes in plants, such as decreased membrane permeability, lipid peroxidation (oxidative reduction of lipids), degradation of chlorophyll proteins, decreased leaf expansion and stomatal closure, which causes a decrease in CO₂ in the intercellular spaces and a consequent decrease in the photosynthetic rate.

The IC is an indicator of the efficiency of the genotype to transform assimilates into kernel. Over the years, this index has increased as a result of genetic improvement and the use of improved agronomic practices (Woli *et al.*, 2016). The treatment with the

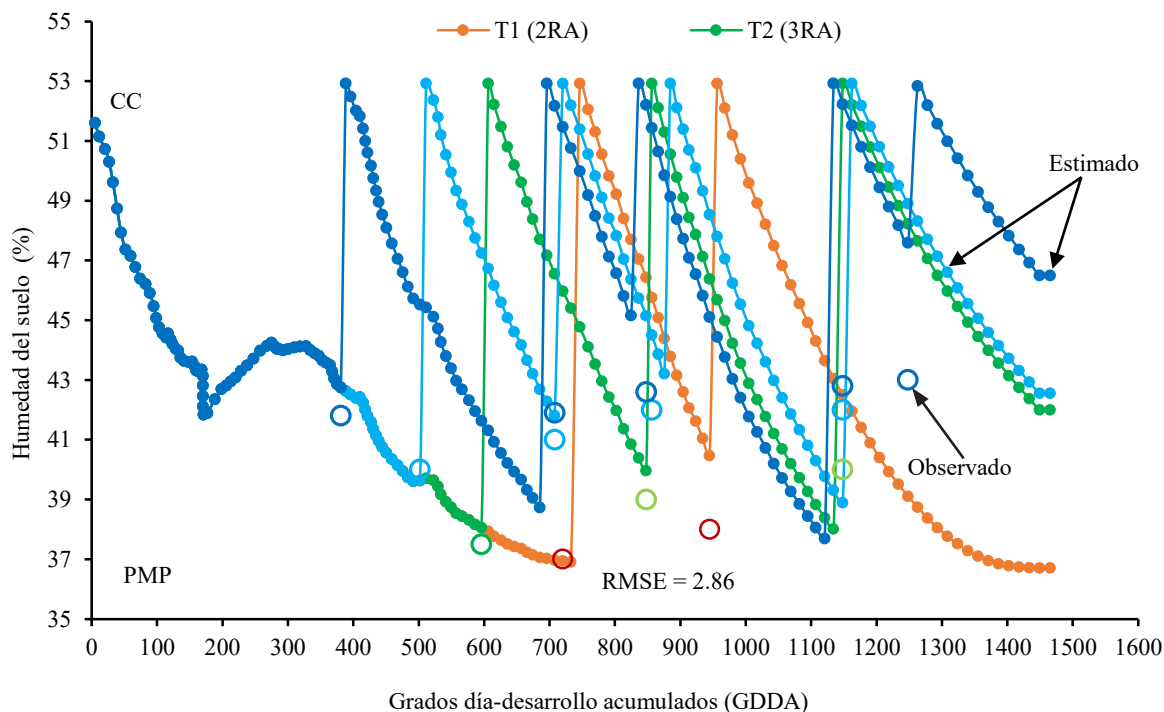


Figura 3. Variación de la humedad del suelo estimada y medida antes del riego, en maíz bajo cuatro tratamientos de estrés hídrico basados en fenología.

Figure 3. Variation of estimated and measured soil moisture before irrigation in maize under four phenology-based water stress treatments.

una calendarización científica del riego, produjeron un ambiente favorable de humedad en el suelo para el desarrollo del cultivo. Esto ocurrió porque el estrés por asfixia radical (falta de O_2 en la zona de crecimiento de las raíces) se redujo, y hubo un efecto directo en la producción de biomasa, a diferencia de lo observado en T5 (TES). Jiménez *et al.*, (2012) afirmaron que el estrés por inundación generaba en la planta cambios que pueden ser irreversibles como disminución de la permeabilidad de las membranas, peroxidación lipídica (reducción oxidativa de los lípidos), degradación de proteínas clorofílicas, disminución de la expansión foliar y cierre estomático, el cual causa disminución del CO_2 en los espacios intercelulares y la disminución consecuente en la tasa fotosintética.

El IC es un indicador de la eficiencia del genotipo para transformar los asimilados en grano. Con el paso de los años este índice se ha incrementado como resultado del mejoramiento genético y del uso de prácticas agronómicas mejoradas (Woli *et al.*, 2016). El tratamiento con el valor más bajo de IC fue T1

lowest IC value was T1 with 42% due to a lower MS in kernel production, while T4 was the highest with 50% (Figure 5). These values are similar to those reported by Abendroth *et al.* (2011), who determined that commercial maize hybrids in the U.S. corn belt have optimal average IC of 50%. These variables are very useful in the calibration and validation of crop growth simulation models, such as the AquaCrop model (Vanuytrecht *et al.*, 2014).

Relative differences (Δx)

Differences existed among treatments in the variables Ya, Lb, EA and PA (Table 5). Reducing Lb in regard to TES reduced yield; but, with a higher Lb than TES the increase in yield was not significant. This behavior was also observed in the variables EA and PA and it may be an indicator to generate water deficit management strategies for crops under agronomic management conditions and with the current genotypes of northern Sinaloa, without significant effects on yields. Segovia-Cardozo *et al.*

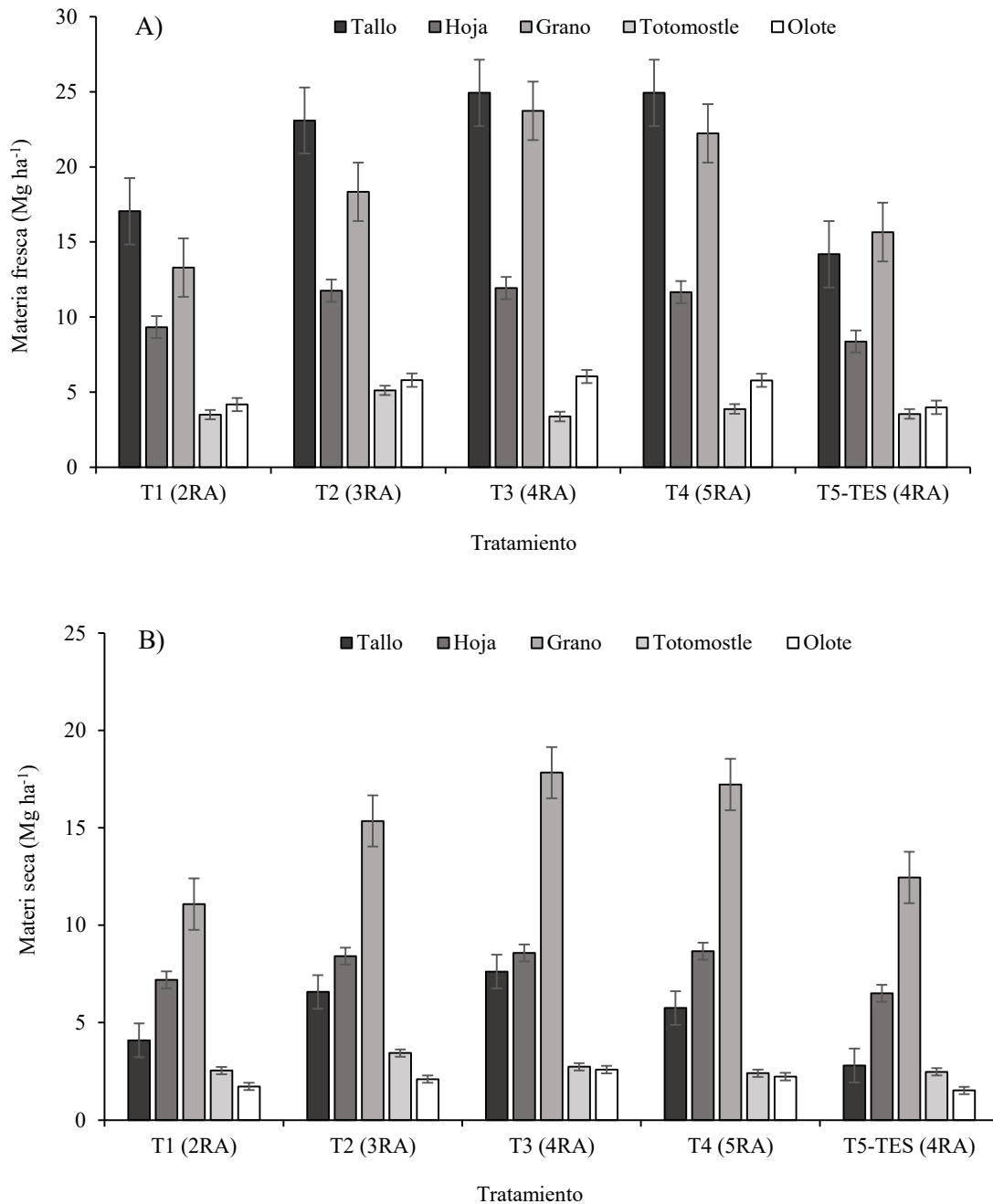


Figura 4. Producción de materia fresca (A) y materia seca (B) de cinco partes de la planta de maíz bajo cinco tratamientos de estrés hídrico basados en fenología.

Figure 4. Fresh matter (A) and dry matter (B) production of five plant parts in maize under five phenology-based water stress treatments.

con 42% debido a una producción menor de MS en grano, mientras que T4 fue el mayor con 50% (Figura 5). Estos valores son similares a los indicados por Abendroth *et al.* (2011), quienes determinaron que los híbridos de maíz comerciales en la faja maicera

(2019) evaluated four irrigation districts in Spain for four years, and the values of the ARIS indicator (Annual Relative Irrigation Supply) were greater than one, which means a supply greater than the gross requirement (Lb) that did not have an effect on yield.

de EUA presentan IC promedio óptimos de 50%. Estas variables son de gran utilidad en la calibración y validación de modelos de simulación de crecimiento de cultivos, como el modelo AquaCrop (Vanuytrecht *et al.*, 2014).

Diferencias relativas (Δx)

Diferencias existieron entre tratamientos en las variables Ya, Lb, EA y PA (Cuadro 5). Al reducir Lb respecto a TES disminuyó el rendimiento, pero con una Lb mayor a TES el aumento en rendimiento no fue significativo. Este comportamiento también se observó con las variables EA y PA, y puede ser un indicador para generar estrategias de manejo del déficit hídrico para cultivos en las condiciones de manejo agronómico y con los genotipos actuales del norte de Sinaloa, sin efectos significativos en los rendimientos. Segovia-Cardozo *et al.* (2019) evaluaron cuatro distritos de riego en España durante cuatro años, y los valores del indicador de aplicación anual relativa de riegos (Annual Relative Irrigation Supply, ARIS) fueron mayores que la unidad, lo cual representa un suministro mayor al requerimiento de la lámina bruta (Lb) y que no aportó efecto en el rendimiento.

Cuadro 5. Diferencias relativas (%) respecto al testigo de las variables rendimiento (Ya), lámina bruta (Lb), eficiencia de aplicación (EA) y productividad del agua (PA), en cuatro tratamientos de estrés hídrico basado en etapas fenológicas aplicados a maíz en el norte de Sinaloa, México.

Table 5. Relative differences (%) compared to the control in the variables yield (Ya), gross depth (Lb), application efficiency (EA) and water productivity (PA), in four water stress treatments based on phenological stages applied to maize in northern Sinaloa, Mexico.

Tratamiento	ΔYa	ΔLb	ΔEA	ΔPA
T1	-44.23	-31.16	3.39	-18.74
T2	-3.79	-13.88	8.47	9.63
T3	+4.55	-11.56	11.86	21.01
T4	+5.81	2.86	13.56	3.19

CONCLUSIONS

Our study provides technical and scientific information for irrigation management according to crop phenology in maize under water stress, which is very useful in the current scenarios in Sinaloa, Mexico. Application efficiency had a direct

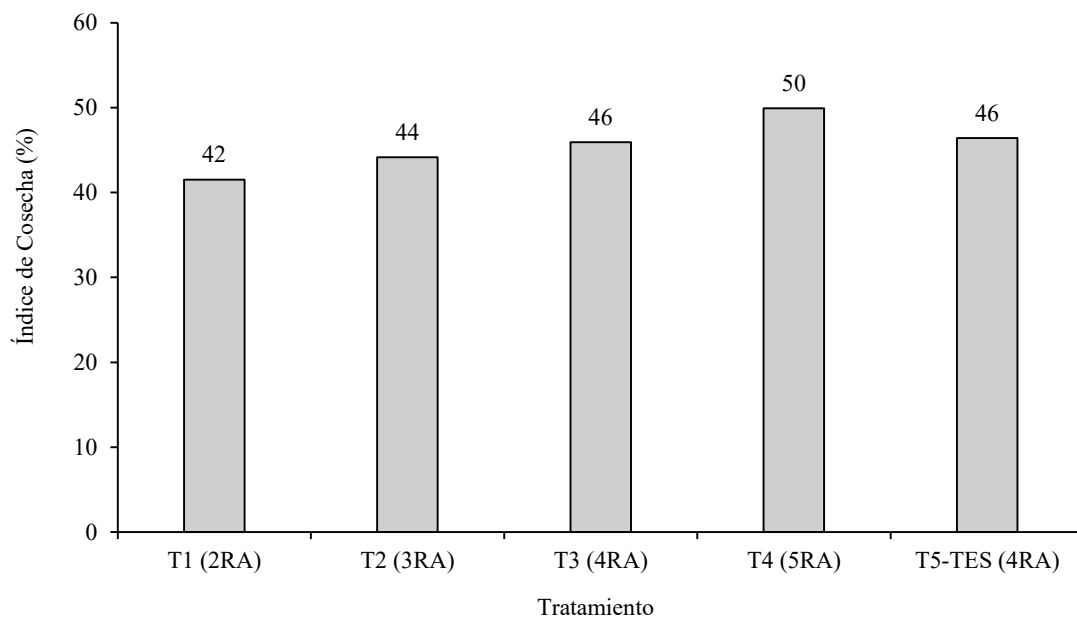


Figura 5. Índice de cosecha para cultivo de maíz con cinco tratamientos de estrés hídrico basado en etapas fenológicas, en el norte de Sinaloa, México.

Figure 5. Harvest index for maize cultivation under five water stress treatments based on phenological stages in northern Sinaloa, Mexico.

CONCLUSIONES

Este estudio aporta información técnica y científica para el manejo del riego en función de la fenología del cultivo en maíz bajo estrés hídrico, la cual resulta muy útil en los escenarios actuales en Sinaloa. La eficiencia de aplicación tuvo una relación directa con los componentes del rendimiento y una relación inversa con el estrés hídrico. La distribución de riegos basada en fenología con eficacia de aplicación igual o mayor a 64%, mejoró el rendimiento y la productividad del agua.

En condiciones locales y de disponibilidad hídrica normal se debe evitar la aplicación del quinto riego de auxilio en los suelos predominantes de la zona, porque no existe incremento significativo en rendimiento y el sobre-riego puede ser mayor a mil metros cúbicos por hectárea. Bajo condiciones de disponibilidad hídrica restringida, la mejor opción es el esquema de tres riegos de auxilio, con eficiencias de aplicación mayores a 60%, que significan más de 1.2 miles de metros cúbicos por hectárea en ahorros de agua sin reducción del rendimiento.

En todos los casos se debe aprovechar la humedad inicial del suelo a la siembra, para no terminar el ciclo del cultivo con contenidos de humedad del suelo altos. Dicha consideración reduce en forma importante las láminas brutas; en consecuencia, se mejoran la eficiencia y la productividad del agua.

LITERATURA CITADA

- Abendroth, L. J., R. W. Elmore, M. J. Boyer, and S. K. Marlay. 2011. Corn growth and development. PMR 1009. Iowa State University Extension. Ames, Iowa, EUA. 49 p.
- Barsalou, M.A., and J. Smith. 2018. Applied Statistics Manual: A Guide to Improving and Sustaining Quality with Minitab. American Society for Quality. Milwaukee, USA. 444 pp.
- Castillo C. M., y L.A. Ibáñez C. 2017. Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. Tec. y Ciencias del Agua, IMTA. 8: 35-52. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-01-03.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, Italy. 193 p.
- Fereres, E., and M.A. Soriano. 2006. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. J. Exp. Bot. Integrated Approaches to Sustain and Improve Plant Production Under Drought Stress, Special Issue. pp: 1-13. doi:10.1093/jxb/erl165.
- FAO (United Nations Food and Agriculture Organization). 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture, Managing Systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (Earthscan) Rome / London. 285 p.
- 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. Agric. Water Manage. 182: 126–138. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.12.014
- Giménez, L., M.G. Petillo, P., Paredes, L.S., Pereira. 2016. Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. Water 8: 309. DOI: 10.3390/w8070309
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2017. Agenda Técnica Agrícola Sinaloa. INIFAP. Ciudad de México, México. 209 p. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_agendas/4142_4839_Agenda_T%c3%a9cnica_Sinaloa_2017.pdf (Consulta: abril 2021).
- Jiménez, S. J. C., L.P. Moreno F., y S. Magnitskiy. 2012. Respuesta a las plantas a estrés por inundación. Una revisión. Rev. Colombiana Cienc. Hortíc. 6: 96-109. DOI: 10.17584/rcch.2012v6i1.1287
- Lobato S., R., y M.A. Altamirano del C. 2017. Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México.

—End of the English version—



- Tec Cienc. Agua. IMTA. 8: 101-116. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-07
- Mendoza-Pérez, C., I. E. Sifuentes, B. W. Ojeda, y C. J. Macías. 2016. Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. *Ing. Agríc. Biosist.* 8: 29-40. DOI: 10.5154/r.in-agbi.2016.03.001.
- Ojeda B. W., Sifuentes I. E., y H. Unland W. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia* 40: 13 - 25.
- Ojeda B. W., Sifuentes I. E., Íñiguez C. M., y M. Montero M. J. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimiento hídrico de los cultivos. *Agrociencia*. 45:1-11.
- Olmedo V. V. M., J. L. Minjares L., E. Camacho P., M. L. Hernández H., y J. A. Rodríguez D. 2017. Uso del Análisis Envoltante de Datos (DEA) para evaluar la eficiencia de riego en los Módulos del Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui (Sonora, México). *Análisis Envoltante de Datos (DEA) para evaluar eficiencia de riego. Rev. Fac. Cienc. Agrar. UNCUIYO* 49: 127-148.
- Paredes, P., J. P. de Melo-Abreu, I. Alves, and L. S. Pereira. 2014. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agric. Water Manage.* 144: 81-97. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.06.002.
- Rivetti A. R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina, I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev. Fac. Cienc. Agrar. UNCUIYO*. 38: 25-36.
- Segovia-Cardozo, D. A., L. Rodríguez S., and S. Zubelzu. 2019. Water use efficiency of corn among the irrigation districts across the Duero river basin (Spain): Estimation of local crop coefficients by satellite images. *Agric. Water Manage.* 212: 241-251. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.08.042.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Información estadística de la producción agropecuaria y pesquera mexicana. México. <http://www.siap.gob.mx/>. (Consulta: junio 2020).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2020. Información estadística de la producción agrícola mexicana. México. <https://www.gob.mx/siap/>. (Consulta: junio 2020).
- Sifuentes I. E., y J. Macías C. 2015. "IRRIMODEL" Programación integral y gestión del riego a través de internet, manual del usuario, versión 2.0. INIFAP-CIRNO-CEVAE. Publicación especial No. 14. Juan José Ríos, Sinaloa, México. 36 p.
- Sifuentes I. E., J. Macías C., J. R. Ruelas I., P. Preciado R., W. Ojeda B., y M. A. Inzunza I. 2015. Mejoramiento del grado de uso del nitrógeno en maíz, mediante técnicas parcelarias de riego por superficie. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6:1903-1914.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes. 2014. Respuesta del Rendimiento de los Cultivos al Agua. Estudio FAO 66. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 510 p.
- Stewart, J. I., R. E. Danielson, R. J. Hanks, E. B. Jackson, R. M. Hagan, W. O. Pruitt, W. T. Franklin, and J. P. Riley. 1977. Optimizing Crop Production through Control of Water and Salinity Levels in the Soil. Utah Water Lab. PRWG 151-1. Logan, Utah. 191 p.
- https://digitalcommons.usu.edu/water_rep/67 (Consulta: mayo 2021).
- Vanuytrecht, E., D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, L. K. Heng L.K., M. Garcia V., and P. Mejias M. 2014. AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. *Environm. Modelling & Software*. 62: 351-360. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.08.005.
- Woli, K. P., M. J. Boyer, R.W. Elmore, J. E. Sawyer, L. J. Abendroth, and D.W. Barker. 2016. Corn era hybrid response to nitrogen fertilization. *Agron. J.* 108: 495-508. DOI: 10.2134/agronj2015.0314.