

# Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México

## Soil moisture tension, growth, water use efficiency, and yield of maize grown in northwest Mexico

Fidel Núñez-Ramírez<sup>1‡</sup>, Isabel Escobosa-García<sup>1</sup>, Víctor Cárdenas-Salazar<sup>1</sup>,  
Jesús Santillano-Cázares<sup>1</sup>, Jesús del Rosario Ruelas-Islas<sup>2</sup>,  
Pablo Preciado-Rangel<sup>3</sup> y Jairo Díaz-Ramírez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n, ejido Nuevo León. 21705 Mexicali, Baja California, México.

<sup>‡</sup> Autor para correspondencia (fidel.nunez@uabc.edu.mx)

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Ahome. Ángel Flores y Justicia Social s/n, Col. Ciudad Universitaria. 81220 Los Mochis, Sinaloa, México.

<sup>3</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

<sup>4</sup> University of California. Desert Research and Extension Center. 1004 E. Holton Rd. 92250 Holtville, CA, USA.

### RESUMEN

En escenarios de escasez de agua, el manejo del riego en cultivos es de gran importancia. El objetivo de este trabajo fue identificar la tensión de humedad (T) óptima en suelo para producir el mayor crecimiento y rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) cultivado en el valle de Mexicali, Baja California, México. El cultivo fue establecido durante el ciclo primavera-verano de 2017. Los tratamientos evaluados fueron cuatro tensiones de humedad [(T); (10, 20, 30 y 40 kPa)] y seis genotipos de maíz (G). Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones (arreglo factorial doble). El primer factor fue tensión de humedad del suelo y el segundo factor la variedad de maíz. Se midió el crecimiento del cultivo expresado como altura, número de hojas, días a floración masculina (antesis), y área foliar. Al final del experimento se cosecharon las mazorcas de cada tratamiento y se calculó el peso de grano, rendimiento y eficiencia en el uso del agua de riego. No se encontró una interacción significativa entre las variables de respuesta evaluadas (T × G) ( $P > 0.05$ ). Durante los primeros 50 días después de la siembra, el factor que más afectó al crecimiento y desarrollo fue T.

Con una menor T, menor fue el número de días para alcanzar la etapa de floración masculina ( $P < 0.05$ ). El rendimiento y la eficiencia en el uso del agua de riego fueron afectados por T y G ( $P < 0.05$ ). La variedad Asgrow RX 717 presentó la floración masculina en un menor tiempo que el resto de los genotipos, el más alto rendimiento (10.63 Mg ha<sup>-1</sup>) y la mayor eficiencia en el uso del agua de riego (48.79 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) que el resto de los genotipos evaluadas ( $P < 0.05$ ).

**Palabras clave:** componentes de rendimiento, cultivos, manejo del riego, peso de grano, *Zea mays* L.

### SUMMARY

Under scenarios of water scarcity, irrigation management in crops is of great importance. The objective of this study was to identify the optimum soil moisture tension (T) to produce the highest growth and corn yield in the Valley of Mexicali, Baja California (BC), Mexico. The crop was established during the 2017 spring-summer growing cycle. The tested treatments consisted of four soil moisture tensions [(T); (10, 20, 30 and 40 kPa)] and six corn varieties (G). The treatments were arranged in complete randomized

#### Cita recomendada:

Núñez-Ramírez, F., I. Escobosa-García, V. Cárdenas-Salazar, J. Santillano-Cázares, J. del R. Ruelas-Islas, P. Preciado-Rangel y J. Díaz-Ramírez. 2020. Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana* 38: 805-815.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.763>

Recibido: 02 de abril de 2020.

Aceptado: 03 de junio de 2020.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 38: 805-815.

design with four replicates (triple factorial). The first factor was soil moisture tension and the second one was corn variety. Crop growth expressed as height, leaf number, days to tasseling stage, and leaf area were measured. At the end of the experiment corn ears were harvested from each treatment and yield, grain weight, and irrigation water use efficiency were calculated. The interaction  $T \times G$  was not significant ( $P > 0.05$ ) for any of the response variables. Treatment T affected both growth and development ( $P < 0.05$ ) at 50 days after planting. As T decreased, the number of days to reach the tassel stage decreased. G and T affected yields and irrigation water use efficiency ( $P < 0.05$ ). Asgrow RX 717 variety reached the tasseling stage in a shorter time, recording the highest yield ( $10.63 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and irrigation water use efficiency ( $48.78 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) compared to the other tested varieties ( $P < 0.05$ ).

**Index words:** *yield components, crops, irrigation management, grain weight, Zea mays L.*

## INTRODUCCIÓN

El potencial de rendimiento de los cultivos depende principalmente de la información genética, desarrollo de variedades, aplicación de fertilizantes, control de plagas y enfermedades, y el manejo del agua de riego. En este sentido, uno de los aspectos más importantes para obtener altos rendimientos en cultivos en zonas con problemas de abastecimiento de agua, es el manejo del agua de riego de acuerdo a la fisiología de la planta (Thompson *et al.*, 2007), evapotranspiración del cultivo (Mendoza-Pérez *et al.*, 2016; Duchemin *et al.*, 2006) o de tensión de humedad del suelo (Nunes *et al.*, 2016). De los factores anteriores, el último es el que presenta menor costo, fácil manejo, mayor uso práctico y de fácil interpretación para los productores agrícolas (Shock y Wang, 2011; Vatta *et al.*, 2018).

Con el manejo del agua de riego en cultivos basado en tensión de humedad del suelo se puede determinar apropiadamente el intervalo entre riegos y la profundidad del bulbo de humedad. Con ello, se tiene la ventaja de optimizar y ahorrar insumos como fertilizantes y agua (Vatta *et al.*, 2018). Además, el manejo adecuado de ambos permite incrementar el crecimiento, el rendimiento y la calidad de las cosechas de los cultivos (Mahajan y Singh, 2006;

Khan y Mohammadi, 2019). Sin embargo, es necesario considerar el ambiente agroclimático en el cual se desarrollan los cultivos para obtener información acertada, que permita hacer estimaciones correctas de la eficiencia en el uso de los recursos aplicados (Katerji *et al.*, 2008).

La importancia de medir y conocer la tensión de agua en el suelo estriba en que esta medición es análoga a la fuerza de succión necesaria para extraer el agua del suelo por las plantas, la cual a su vez está relacionada con el nivel de estrés de éstas (Shock y Wang, 2011). Suelos con textura arcillosa retienen mayor cantidad de agua que suelos arenosos (English *et al.*, 2005), lo que en consecuencia modifica la frecuencia de riego y el volumen de agua aplicada a los cultivos. En el valle de Mexicali, B. C., al noroeste de México, gran parte de los suelos son de textura arcillosa y con problemas de salinidad (Judkins y Myint, 2012), y aunque la mayoría de sus cultivos hortícolas se irrigan con sistemas de riego presurizado, no existe información sobre el manejo del agua de riego utilizando tensiómetros.

La mayoría de los cultivos hortícolas en este valle se siembran en época de invierno. Sin embargo, la mayor demanda de agua de riego ocurre en el verano. El maíz es uno de los cultivos de verano y en los últimos diez años ha presentado una tasa de crecimiento en superficie de siembra del orden de 10% anual (SIAP, 2018). El maíz representa un modelo para generar información acerca del manejo del agua de riego considerando el factor de tensión de humedad del suelo. Recientemente, Nunes *et al.* (2016) estudiaron la respuesta del cultivo de maíz, bajo condiciones controladas, a varias tensiones de humedad en el suelo y demostraron la importancia en ahorro de agua e incrementos en la biomasa seca de la raíz.

Algunas de las variedades o genotipos evaluados en el valle de Mexicali, han sido cultivadas bajo riego rodado y alcanzan rendimientos entre 7.5 y 10.0 toneladas de grano por hectárea (Ávila-Casillas *et al.*, 2014). Sin embargo, con el uso de riego por goteo el rendimiento suele aumentar hasta 15% y además incrementa la productividad del agua aplicada (Sandhu *et al.*, 2019). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue identificar el efecto de la tensión de humedad en el crecimiento y rendimiento de seis genotipos de maíz cultivado bajo riego por goteo en condiciones del Valle de Mexicali.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del Experimento

El experimento se estableció en el Campo Agrícola Experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas, ubicado en el ejido Nuevo León, Mexicali, B. C., México (32° 24' N y 115° 11' O). En esta región agrícola prevalece clima desértico cálido, extremo en demasía y régimen de lluvias en invierno (BW [h'] hs [x'] [e']), con temperaturas de 50 °C durante el verano y en invierno hasta de -7 °C, con una temperatura media anual de 22.3 °C y una precipitación media anual de 58 mm. La altitud varía de -2 hasta 43 m, con una topografía generalmente plana. Las condiciones climáticas que prevalecieron durante el desarrollo del presente trabajo fueron determinadas tomando las variables de temperaturas máximas, mínimas y los grados día acumulados (GDAs, temperatura base: 10 °C) a través de una estación meteorológica ubicada a 450 m del experimento.

El suelo en el que se realizó el experimento posee textura arcillosa tipo Vertisol hiposálico calcárico (INEGI, 2019), con pH de 8.2, salinidad de 4.5 dS m<sup>-1</sup>, con 2.3, 8.1, 760, 180 y 350 mg kg<sup>-1</sup> de nitrógeno total, fósforo Olsen, potasio, calcio y de magnesio intercambiables, respectivamente. Previo al establecimiento del cultivo se realizó una curva de retención de humedad del suelo en condiciones de campo empleando tensiómetros. Se determinó una lámina de reposición de humedad para cada tratamiento de 6.0 mm.

### Establecimiento y Diseño Experimental

La siembra se realizó el día 15 de febrero de 2017, en forma manual y en suelo seco a doble hilera sobre camas separadas a 1.60 m y a 10 cm de distancia entre semilla y semilla. Los tratamientos se establecieron en parcelas divididas, distribuidas bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. La parcela principal fueron cuatro tensiones de humedad en el suelo (10, 20, 30 y 40 kPa). La sub-parcela estuvo constituida por seis genotipos de maíz. Las principales características de cada material son presentadas en el Cuadro 1 y fueron considerados por el color de grano y uso para grano o elote fresco. La parcela principal consistió de dos camas de 18 m de longitud separadas a 1.60 m. Cada cama se dividió en tres sub-parcelas de

6 m de longitud, para un total de seis sub-parcelas por tratamiento.

Se utilizó un sistema de riego por goteo con cintilla y separación de goteros a 20 cm (Toro, Aqua-Traxx, San Nicolás de los Garza, N. L. México). El gasto por gotero fue de 1 L h<sup>-1</sup>. Al inicio del experimento, se realizó un riego de germinación a todos los tratamientos con una lámina de riego de 12 mm. Cada parcela principal se irrió por separado cuando se alcanzó la tensión de humedad evaluada. Para medir la tensión de humedad del suelo, se instalaron sensores (Irrometer, Riverside, CA, USA) en la línea de siembra de las parcelas, a una profundidad de 30 cm.

### Manejo Agronómico

Se fertilizó con 200 kg N ha<sup>-1</sup> y 60 kg P ha<sup>-1</sup>. La fuente de fertilizante fue sulfato de amonio, fosfato monoamónico, UAN 32, y Urea. Se utilizó como guía de fertilización la curva de absorción nutrimental propuesta por Bender *et al.* (2013). Durante el primer mes de desarrollo del cultivo se presentó la incidencia de pulga saltona (*Epitrix cucumeris* [Harris]) cuyo control se realizó con Tamarón (O,S-dimethyl phosphoramidothionate) a dosis de 1 L ha<sup>-1</sup>. Al final del cultivo se presentó chinche lygus (*Lygus gemellatus* Herrich-Schaeffer, 1835) para la cual no se hicieron aplicaciones. Para el caso de malezas, se presentó zacate de agua (*Echinochloa colona* (L.)

**Cuadro 1. Características de los genotipos de maíz evaluados en un experimento para estimar el efecto de tensiones de humedad y genotipos, sobre el crecimiento y rendimiento de maíz en el Valle de Mexicali, B. C., México, en el ciclo primavera-verano de 2017.**

**Table 1. Corn genotype characteristics in an experiment to assess the effect of moisture tensions and genotypes on corn growth and yield in the Valley of Mexicali, Baja California (BC), Mexico in the 2017 spring-summer growing cycle.**

Genotipo	Color de grano	Uso
Asgrow Caribu Y	Amarillo	Grano
XR20A Ceres	Amarillo	Grano
Asgrow RX 717	Amarillo	Grano
XR66 Ceres	Blanco	Grano
Dancer	Blanco	Grano-elote
Sun Cal LG16	Blanco	Elote

Link) y quelite (*Amaranthus hybridus* L.), chual cenizo (*Chenopodium álbum* L. Bosc ex Moq.) y oreja de ratón (*Dichondra sericea* Sw.) y fueron controladas a través de deshierbes manuales.

### Variabes Evaluadas

Se determinó la altura y el número de hojas en diez plantas por sub-parcela. Además, se midió el área foliar y biomasa, cosechando cinco plantas por tratamiento. El área foliar se midió con el medidor LICOR LI-300C (Lincoln, Nebraska USA). Las mismas plantas se utilizaron en la determinación de biomasa seca. Se deshidrataron a temperatura ambiente y después en estufa a aire forzado a 60 °C, por tres días. Cada una de estas variables se tomó a los 50, 75 y 90 días después de la siembra (DDS).

Adicionalmente se midió el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) y el número de días a floración masculina. Para el NDVI se utilizó el sensor Greenseeker (Sunnyvale, CA USA), colocándolo a aproximadamente 80 cm por encima de la hilera de plantas a cada variedad. Se contabilizaron los días en que apareció la flor masculina en el 50% de las plantas de cada sub-parcela.

Al llegar el cultivo a la madurez comercial (110 DDS), se obtuvo el rendimiento al cosechar la mazorca de diez plantas por parcela. Cada una de las diez mazorcas se desgranó manualmente y se pesó. Posteriormente, el grano obtenido se colocó en estufa a 60 °C a aire forzado hasta obtener peso constante. El rendimiento de cada parcela se ajustó a humedad a 15%. Adicionalmente, se midió el peso del grano, el cual se obtuvo de 100 semillas tomadas al azar. La eficiencia en el uso del agua de riego se obtuvo al dividir el rendimiento total expresado como kg ha<sup>-1</sup> entre la lámina de riego expresada en milímetros.

### Análisis Estadístico

Las variables de crecimiento, días a floración, NDVI, rendimiento, peso de 100 semillas y la eficiencia en el uso del agua de riego, se les realizó análisis de varianza. Cuando se encontró diferencia significativa, se realizó comparación de medias a través de la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ). Adicionalmente se utilizó regresión lineal para explicar el efecto de la tensión de humedad, las variables de crecimiento y rendimiento de la planta, así como para identificar la asociación

entre el crecimiento y el rendimiento del cultivo. En todos los análisis estadísticos realizados se utilizó el programa estadístico MINITAB 17.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ambiente

Durante el tiempo que duró el experimento, las temperaturas máximas estuvieron en el orden de 30 °C los primeros 20 días después de la siembra (DDS), 33 °C de los 20 a los 40 DDS, 37 °C de los 40 a los 60 DDS y 42 °C de los 60 a los 80 DDS. Por otra parte, las temperaturas mínimas estuvieron en el orden de 12 °C los primeros 20 DDS, 13 °C de los 20 a los 40 DDS, 16 °C de los 40 a los 60 DDS y 18 °C de los 60 a los 80 DDS. Se acumularon un total de 1180 GDAs considerando la fórmula temperatura promedio dividida entre la temperatura base (10 °C) (Figura 1).

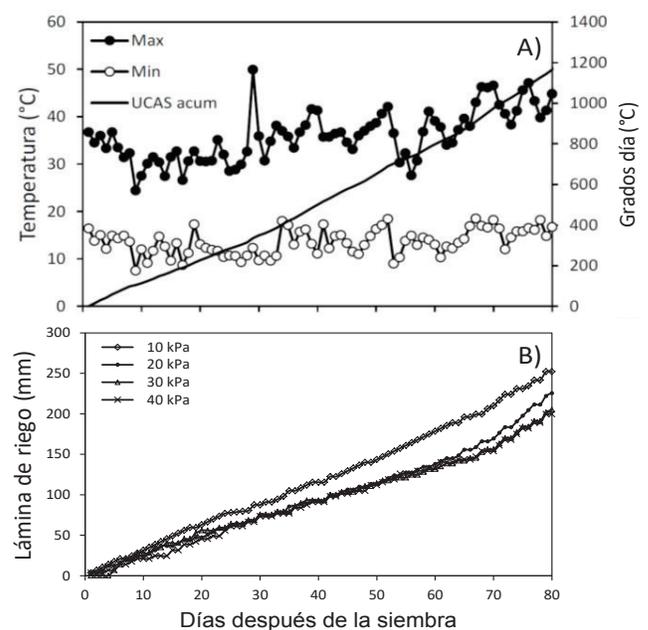


Figura 1. Temperaturas y grados día acumulados (A), y lámina de riego acumulada (B) durante el experimento para estimar el efecto de tensiones de humedad y genotipos, sobre el crecimiento y rendimiento de maíz en el Valle de Mexicali, B. C., México, en el ciclo primavera-verano de 2017.

Figure 1. Temperatures and degree-days accumulated (A), and accumulated irrigation (B) during an experiment to assess the effect of moisture tensions and genotypes on corn growth and yield in the Valley of Mexicali, Baja California (B C), Mexico in the 2017 spring-summer growing cycle.

Las láminas de riego en los tratamientos evaluados estuvieron en el orden de los 252, 225, 205 y 199 mm para los tratamientos 10, 20, 30 y 40 kPa (Figura 1). Conforme avanzó el tiempo en el estudio, el tratamiento 10 kPa, resultó con mayor diferencia que el resto de los tratamientos evaluados. Con respecto a las variables de crecimiento, no se identificó interacción significativa entre los genotipos y las tensiones de humedad ( $G \times T$ :  $P > 0.05$ ), mientras que el efecto de cada factor por separado fue significativo ( $P < 0.05$ ) (Cuadro 2).

### Altura, Número de Hojas y Área Foliar

A los 50 DDS, Asgrow 717 presentó mayor altura que el resto de los genotipos (Cuadro 2). Sin embargo, a los 90 DDS Sun Cal LG16 presentó la mayor altura, mientras que XR20A Ceres presentó la menor altura.

Se identificaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el número de hojas sólo a los 50 DDS. Asgrow Caribu Y alcanzó el menor número de hojas (6.5 hojas planta<sup>-1</sup>), mientras que Dancer alcanzó el mayor número de hojas (7.25 hojas planta<sup>-1</sup>). Con respecto al área foliar, los seis genotipos mantuvieron valores similares a los 50 y 75 DDS. A los 90 DDS, Sun Cal LG 16 presentó la mayor área foliar y Asgrow RX 717, el menor valor.

Vaz *et al.* (2013) indican que semillas con alto vigor dan como resultado mayor crecimiento inicial del cultivo. Esto incluye mayor diámetro del tallo, altura y área foliar. Lo anterior implica la importancia al seleccionar adecuadamente los materiales para siembra con alto vigor y asegurar un correcto establecimiento del cultivo. Las diferencias de los genotipos al evaluar la altura final y área foliar, está relacionada al propósito para el cual cada una de ellas ha sido destinada.

**Cuadro 2. Altura, número de hojas y área foliar en un experimento para estimar el efecto de tensiones de humedad y genotipos, sobre el crecimiento y rendimiento de maíz en el Valle de Mexicali, B. C., México, en el ciclo primavera-verano de 2017.**

**Table 2. Height, leaf number, and leaf area in an experiment to assess the effect of moisture tensions and genotypes on corn growth and yield in the Valley of Mexicali, Baja California (BC), Mexico in the 2017 spring-summer growing cycle.**

Fuente	Altura			Número de hojas			Área foliar		
	50 <sup>†</sup>	75	90	50	75	90	50	75	90
	----- cm -----						----- cm <sup>2</sup> -----		
Genotipo									
Asgrow Caribu Y	40.3 b <sup>‡</sup>	163.9	193.9 ab	6.5 c	8.9	12.3	1623	21095	29650 ab
XR20A Ceres	40.8 b	158.5	187.3 b	6.9 abc	9.0	12.4	1063	18900	23060 bc
Asgrow RX 717	44.6 a	169.8	193.9 ab	6.7 bc	10.0	11.5	1716	19098	21027 c
XR66 Ceres	42.3 ab	167.0	194.9 ab	7.0 ab	9.9	12.7	1569	19883	25329 abc
Dancer	41.1 b	176.5	205.8 ab	7.2 a	9.8	12.0	1505	22435	28090 ab
Sun Cal LG16	40.9 b	213.1	212.5 a	7.1 ab	10.0	12.3	1472	25546	31341 a
Tensión de humedad									
10 kPa	44.1 a	187.3 ab	205.7 a	7.5 a	10.0 a	12.6 a	2097 a	27484 a	29333
20 kPa	44.4 a	203.0 a	206.4 a	7.0 b	10.3 a	12.3 a	1638 ab	23765 a	26763
30 kPa	40.1 b	154.9 b	205.3 a	6.5 c	9.2 b	12.3 a	870 b	16190 b	25702
40 kPa	38.0 c	153.9 b	176.9 b	6.6 c	9.0 b	11.6 b	1303 b	17199 b	23866
Regresión	L*** C**	L***	L*** C***	L**	L***	L***	L*** C**	C***	C** L*
Significancia									
Genotipo (G)	0.001	0.116	0.023	0.001	0.086	0.5	0.487	0.321	0.001
Tensión de humedad (T)	0.001	0.009	0.002	0.001	0.005	0.197	0.001	0.001	0.068
Interacción G × T	0.321	0.590	0.964	0.001	0.519	0.961	0.94	0.959	0.989

<sup>†</sup> Días después de la siembra. <sup>‡</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey. L\*, L\*\*, L\*\*\*, Linear significante  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  y  $P < 0.001$ . C\*\*, C\*\*\*, Cuadrática significante  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$ .

<sup>†</sup> Days after sowing. <sup>‡</sup> Different letters in the same column indicate significant differences, according to Tukey's test. L \*, L \*\*, L \*\*\*, Linear significance  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$ . C \*\*, C \*\*\*, Significant quadratic  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$ .

Sun Cal LG16 y Dancer, son materiales originalmente destinados a la producción de elote fresco y son sembradas a bajas densidades de población. En el presente estudio, la densidad establecida fue de 12 plantas m<sup>2</sup>. Densidades mayores a 3 plantas m<sup>2</sup>, repercuten en un menor tamaño de mazorca y número de granos (Sangoi, 2001).

A los 50 y 75 DDS, las tensiones de humedad en el suelo entre 10 y 20 kPa, produjeron plantas con mayor altura. Sin embargo, a los 90 DDS la altura fue igual entre las plantas con tensiones entre 10 y 30 kPa. El número de hojas también se afectó por las tensiones de humedad evaluadas. A los 50 DDS la tensión de 10 kPa presentó plantas con mayor número de hojas, mientras que las tensiones entre 30 y 40 kPa presentaron las plantas con menor número de hojas. A los 75 DDS, conforme la tensión aumentó, disminuyó el número

de hojas. A los 90 DDS, el número de hojas resultó mayor a tensiones de 10 a 30 kPa y menor a tensiones de 40 kPa.

Para el caso de la variable área foliar, a los 50 DDS la tensión de humedad a 10 kPa presentó las plantas con mayor área foliar, mientras que la tensión a 40 kPa resultó con la menor área foliar. A los 75 DDS, la mayor área foliar se presentó en tensiones de humedad de 10 a 20 kPa y la menor área foliar a tensiones entre 30 y 40 kPa.

### NDVI, Peso Seco y Días a Floración Masculina

A los 50 DDS, los valores de NDVI no resultaron afectados por la variedad de maíz evaluada ( $P > 0.05$ ) (Cuadro 3). Sin embargo, a los 75 DDS la variedad Asgrow Caribu Y, presentó los máximos valores,

**Cuadro 3. NDVI, peso seco y días a floración masculina en un experimento para estimar el efecto de tensiones de humedad y genotipos, sobre el crecimiento y rendimiento de maíz en el Valle de Mexicali, B. C., México, en el ciclo primavera-verano de 2017.**

**Table 3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), dry weight and days to tasseling in an experiment to assess the effect of moisture tensions and genotypes on corn growth and yield in the Valley of Mexicali, Baja California (BC), Mexico, in the 2017 spring-summer growing cycle.**

Fuente	NDVI			Peso seco			Días a floración masculina
	50 <sup>†</sup>	75	90	50	75	90	
----- g -----							
Genotipo							
Asgrow Caribu Y	0.53	0.75 b <sup>‡</sup>	§-	27.2	271.4	573.5 b	93 ab
XR20A Ceres	0.52	0.70 a	-	20.4	296.7	572.7 ab	88 b
Asgrow RX 717	0.52	0.69 a	-	35.2	295.2	557.9 b	81 c
XR66 Ceres	0.54	0.72 ab	-	29.9	291.2	508.9 b	89 ab
Dancer	0.53	0.69 a	-	30.2	357.1	689.3 ab	94 a
Sun Cal LG16	0.56	0.70 a	-	28.3	346.4	779.5 a	94 a
Tensión de humedad							
10 kPa	0.62 a	0.72 a	-	36.4 a	337.7 ab	688.7	87 b
20 kPa	0.54 ab	0.72 a	-	33.0 ab	393.7 a	625.4	88 ab
30 kPa	0.47 b	0.71 ab	-	19.6 b	310.7 ab	641.9	91 ab
40 kPa	0.50 b	0.68 b	-	24.8 ab	209.5 b	525.7	92 a
Regresión	L*** C**	L***		L***	L** C***	L*	L**
Significancia							
Genotipo (G)	0.929	0.001	-	0.485	0.882	0.005	0.001
Tensión de humedad (T)	0.001	0.003	-	0.021	0.050	0.066	0.001
Interacción G × T	0.954	0.272	-	0.935	0.537	0.875	0.551

<sup>†</sup> Días después de la siembra. <sup>‡</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey. <sup>§</sup> -No determinado. L\*, L\*\*, L\*\*\*, Linear significant  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  y  $P < 0.001$ . C\*\*, Cuadrática significant  $P < 0.01$ .

<sup>†</sup> Days after sowing. <sup>‡</sup> Different letters in the same column indicate significant differences, according to Tukey's test. <sup>§</sup> -Undetermined. L\*, L\*\*, L\*\*\*, Linear significance  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$ . C\*\*, Significant quadratic  $P < 0.01$ .

seguida por XR66 Ceres y por el resto de los genotipos ( $P < 0.05$ ). Por otra parte, el peso seco de los genotipos fue estadísticamente diferente hasta los 90 DDS ( $P < 0.05$ ), siendo Sun Cal LG 16 la variedad que presentó un mayor peso seco, seguida por Dancer, AR20A Ceres y enseguida el resto de los materiales evaluados. La variedad que resultó más precoz al alcanzar el menor número de días a floración fue Asgrow RX 717, y las que resultaron tardías fueron Sun Cal LG16 y Dancer.

Los valores de NDVI estuvieron asociados negativamente a las tensiones humedad evaluadas. Los valores más altos en ambas mediciones (50 y 75 DDS) fueron para las tensiones de 10 y 20 kPa, mientras que los más bajos fueron para las tensiones de 30 y 40 kPa. El peso seco por su parte, siguió la misma tendencia (50 y 75 DDS) con los mayores valores a tensiones de humedad baja y menores valores de peso seco a mayores tensiones de humedad. A los 90 DDS no se identificó diferencia significativa en las medias de las tensiones de humedad evaluadas ( $P = 0.066$ ). Sin embargo, la relación lineal negativa entre el peso seco y las tensiones de humedad resultó significativa [ $y = (-4.725x) + 738.55$ ;  $R^2 = 0.7906$ ;  $P < 0.05$ ].

Lo mismo sucedió con los días a floración y las tensiones de humedad. Aunque valores de 10 kPa en el suelo, la floración masculina apareció a los 87 DDS mientras que, a 40 kPa la floración apareció hasta los 92 DDS. La ecuación de regresión lineal indicaría que por cada 10 kPa de tensión de humedad que se incrementa en el suelo, la floración masculina se retrasaría  $\approx 2$  días [ $y = (0.193x) + 84.75$ ;  $R^2 = 0.9903$ ;  $P < 0.05$ ]. Cakir (2004) indica que un estrés por agua en maíz en etapa de floración masculina reduce significativamente el rendimiento.

Las variables de crecimiento evaluadas en este estudio muestran que conforme avanzó el tiempo, el rango de tensión de humedad del suelo en el cultivo se amplió. Desde el inicio hasta los 50 DDS las plantas más grandes fueron a tensiones de humedad de 10 kPa; a los 75 DDS, continuó con plantas grandes a tensiones entre 10 y 20 kPa; finalmente a los 90 DDS las plantas de mayor crecimiento resultaron a tensiones entre 10 y 30 kPa. Por otro lado, los valores menores de tensión de humedad en el suelo promovieron los valores más altos de NDVI y de peso seco del cultivo, a la vez que provocaron un adelanto de la floración masculina. La importancia de identificar tensiones de humedad

óptimas a través del ciclo de crecimiento en las plantas estriba en poder modificar el plan de riego sin afectar el rendimiento.

En este experimento, el objetivo de identificar tensiones de humedad en el suelo fue para obtener rendimiento de grano de maíz. Sin embargo, con manejo de la humedad del suelo se puede inducir el crecimiento de raíces (Hossne *et al.*, 2016), la calidad de fruto (Liu *et al.*, 2012; Marouelli y Silva, 2007) o del tamaño de la flor como es el caso del brocoli (*Brassica olearacea* L. *Italica*) (Thompson *et al.*, 2002).

### Rendimiento y Eficiencia en el Uso del Agua

El peso del grano fue afectado significativamente por el genotipo evaluado y no por la tensión de humedad del suelo (Cuadro 4). Asgrow RX 717 mostró el mayor peso del grano, mientras que Asgrow Caribu Y presentó el menor peso. Otros factores como la densidad de población, dosis de nitrógeno además del genotipo son comúnmente asociados al peso del grano. Chen *et al.* (2017) encontraron que dosis altas de nitrógeno y bajas densidades de población incrementaban el peso del grano. Mangani *et al.* (2018) indicaron que existen otros factores como la etapa de crecimiento en la cual se recibe el estrés por agua, el tipo de estrés por agua (exceso o deficiencia) y la estación (año) en conjunto modifican el peso del grano en maíz.

Al aplicar una lámina de riego promedio de 218 mm, la variedad que presentó mayor peso de semillas fue Asgrow RX 717, mientras que la que presentó menor peso fue Asgrow Caribu Y. De los materiales de grano amarillo, el mayor rendimiento lo obtuvo Asgrow RX 717, mientras que de las blancas fue Dancer. La variedad Asgrow RX 717 obtuvo la mayor eficiencia de uso del agua con un valor de 48.79 kg ha<sup>-1</sup> por cada mm de agua aplicada, mientras que la variedad con menor eficiencia de uso del agua de riego fue Dancer con un valor de 17.93 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>.

Al considerar la lámina de riego, la tensión de humedad de 10 kPa permitió aplicar al cultivo una lámina de riego de 252 mm. Mientras que las tensiones de 20, 30 y 40 kPa, aplicaron 225, 205 y 199 mm. El rendimiento se incrementó conforme la lámina de riego aumentó, presentando los mayores valores a tensiones de humedad en el suelo de 10 y 20 kPa. El peso de la semilla no resultó afectado por la tensión de humedad del suelo ( $P = 0.062$ ); incluso al correr regresión lineal,

**Cuadro 4. Peso de 100 semillas, rendimiento y eficiencia en el uso del agua de riego en un experimento para estimar el efecto de tensiones de humedad y genotipos, sobre el crecimiento y rendimiento de maíz en el Valle de Mexicali, B. C., México, en el ciclo primavera-verano de 2017.**

**Table 4. Weight of 100 grains, yield and water use efficiency in an experiment to assess the effect of moisture tensions and genotypes on corn growth and yield in the Valley of Mexicali, Baja California (BC), Mexico in the 2017 spring-summer growing cycle.**

Fuente	Peso de 100 semillas	Rendimiento	Lámina de riego	Eficiencia en el uso del agua de riego
		Mg ha <sup>-1</sup>	mm	kg ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>
Genotipo				
Asgrow Caribu Y	18.43 b <sup>†</sup>	6.42 bc	218	29.48 bc
XR20A Ceres	19.26 ab	7.11 abc	218	32.65 abc
Asgrow RX 717	22.13 a	10.63 a	218	48.79 a
XR66 Ceres	19.70 ab	7.83 ab	218	35.92 ab
Dancer	19.53 ab	3.91 c	218	17.93 c
Sun Cal LG16	19.87 ab	4.91 bc	218	22.52 bc
Tensión de humedad				
10 kPa	20.72	8.64 a	252	34.31 ab
20 kPa	20.39	7.92 a	225	35.21 a
30 kPa	19.47	6.10 ab	205	29.78 ab
40 kPa	18.91	4.83 b	199	24.27 b
Regresión	NS	L**		L*
Significancia				
Genotipo (G)	0.050	< 0.001		< 0.001
Tensión de humedad (T)	0.062	< 0.001		0.019
Interacción G × T	0.845	0.917		0.957

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey. NS = no significativo. L\*, L\*\*, Linear significance  $P < 0.05$  y  $P < 0.01$ .

<sup>†</sup> Different letters in the same column indicate significant differences, according to Tukey's test. NS = not significant. L\*, L\*\*, Linear significance  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ .

no se detectó tendencia significativa entre los valores de tensión de humedad y el peso de la semilla ( $P > 0.05$ ) resultando únicamente una variable dependiente de la variedad y no de la tensión de humedad aplicada al suelo.

Las láminas de riego aplicadas en cada tratamiento son consideradas como muy bajas. Campelo *et al.* (2019) aplicaron láminas de riego del orden de los 506 a 538 mm y encontraron rendimientos de 16.7 a 17.8 Mg ha<sup>-1</sup>. La tensión de humedad de 20 kPa fue la que alcanzó la mayor eficiencia en el uso del agua de riego con un valor de 35.21 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, mientras que la tensión de humedad de 40 kPa alcanzó 24.27 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. La mayor eficiencia en el uso del agua de riego regularmente es tan alta como la cantidad de agua que se aplique al cultivo de maíz. Por ejemplo,

Zeng *et al.* (2020) reportaron rendimientos de hasta 18 Mg ha<sup>-1</sup> con usos de eficiencia del agua de riego de hasta 22.3 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>.

### **Rendimiento y Peso del Grano Contra Componentes de Rendimiento**

El conocimiento de factores previos a la floración, fecundación y llenado de grano tienen influencia sobre el rendimiento (Tollenaar y Dwyer, 1999) (Yin *et al.*, 2011). La altura de las plantas a los 50 DDS se relacionó significativamente con el rendimiento ( $P = 0.006$ ) y con el peso de 100 granos ( $P = 0.003$ ) (Cuadro 5). La altura fue asociada con un 57.9% con el rendimiento de grano, mientras que con el peso de 100 granos

**Cuadro 5. Coeficiente de correlación y nivel de significancia entre las variables de crecimiento, el rendimiento y calidad del cultivo en un experimento para estimar el efecto de tensiones de humedad y genotipos, sobre el crecimiento y rendimiento de maíz en el Valle de Mexicali, B. C., México, en el ciclo primavera-verano de 2017.**

**Table 5. Correlation coefficient and significance level between growth variables, yield and grain weight in an experiment to assess the effect of moisture tensions and genotypes on corn growth and yield in the Valley of Mexicali, Baja California (BC), Mexico in the 2017 spring-summer growing cycle.**

Factor		Rendimiento		Peso de 100 granos	
		Coef. correlación	Significancia	Coef. correlación	Significancia
Altura	50 DDS	$R^2 = 57.9$	$P = 0.006$	$R^2 = 65.7$	$P = 0.003$
	75 DDS	$R^2 = 0.01$	$P = 0.975$	$R^2 = 2.0$	$P = 0.309$
	90 DDS	$R^2 = 0.02$	$P = 0.882$	$R^2 = 0.1$	$P = 0.418$
Núm. hojas	50 DDS	$R^2 = 0.03$	$P = 0.879$	$R^2 = 0.2$	$P = 0.349$
	75 DDS	$R^2 = 3.2$	$P = 0.288$	$R^2 = 48.0$	$P = 0.016$
	90 DDS	$R^2 = 0.01$	$P = 0.937$	$R^2 = 0.1$	$P = 0.477$
Área foliar	50 DDS	$R^2 = 10.6$	$P = 0.189$	$R^2 = 14.5$	$P = 0.151$
	75 DDS	$R^2 = 0.02$	$P = 0.869$	$R^2 = 0.01$	$P = 0.455$
	90 DDS	$R^2 = 10.8$	$P = 0.186$	$R^2 = 0.02$	$P = 0.365$

se asoció en un 65.7%. Yin *et al.* (2011) realizaron comparaciones de alturas contra rendimiento en maíz y encontraron que en la etapa de crecimiento de V6, el incremento en rendimiento por parte del cultivo de acuerdo a la altura fue mayor que en las etapas de V10 y V12.

A los 75 DDS el número de hojas se relacionó significativamente con el peso de 100 granos ( $P=0.016$ ) y explicó esta característica en un 48%, mientras que el área foliar no se relacionó significativamente ni con el rendimiento ni con el peso de 100 granos. La máxima aparición de hojas por periodo de tiempo es un indicativo de la precocidad de las plantas en la que otros procesos también sufren cambios como el desarrollo de la inflorescencia (masculina y femenina). Al respecto Jacobs y Pearson (1991) indican que el factor que maximiza el rendimiento en maíz es la velocidad del crecimiento y desarrollo de las mazorcas.

## CONCLUSIONES

El mayor crecimiento de las plantas se presentó al inicio del experimento y se asoció a tensiones de humedad bajas (10 kPa), mientras que al final del mismo, se asoció a tensiones de humedad con mayor margen (10 a 30 kPa). A menor tensión de humedad,

mayor precocidad. El mayor rendimiento se obtuvo a tensiones de humedad del suelo de 10 a 20 kPa, mientras que la mayor eficiencia en el uso del agua de riego se obtuvo a la tensión de humedad de 20 kPa. Considerando las condiciones ambientales en las que se llevó a cabo este estudio, el genotipo más precoz en floración masculina resultó ser Asgrow RX 717, mientras que los más tardíos fueron Dancer y Sun Cal LG 16. El mayor rendimiento y eficiencia en el uso del agua de riego lo obtuvo solo Asgrow RX 717.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

Los autores y co-autores garantizan que los resultados obtenidos en este estudio y los materiales utilizados son originales. Así mismo hacen mención de que los genotipos comerciales evaluados pudieran comportarse de manera diferente dependiendo de factores como climas regionales o tipos de suelo. En este sentido, este estudio no trata de promover, beneficiar o perjudicar a ninguna compañía productora de semillas.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FONDOS

Las fuentes de financiamiento para la investigación fueron en especie y con materiales que formaron parte del curso de Fertirrigación impartido en el programa de Ingeniero Agrónomo ofrecido en el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y metodología: Fidel Núñez-Ramírez. Software: Jesús Santillano-Cázares. Validación: Isabel Escobosa-García y Víctor Cárdenas-Salazar. Análisis formal: Isabel Escobosa-García y Víctor Cárdenas-Salazar. Investigación: Fidel Núñez-Ramírez. Recursos: Fidel Núñez-Ramírez. Curación de datos: Pablo Preciado-Rangel. Escritura, preparación del borrador original: Fidel Núñez-Ramírez. Escritura, revisión y edición: Jesús Santillano-Cázares y Jairo Díaz-Ramírez. Visualización: Jesús Del Rosario Ruelas-Islas. Supervisión: Pablo Preciado-Rangel. Administración del proyecto: Jesús Santillano-Cázares. Adquisición de fondos: Fidel Núñez-Ramírez.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo en la toma de datos a los alumnos del curso de Fertirrigación Generación 2017-2. Así como al apoyo en soporte técnico del T.A. Oracio Rivera Caudillo, técnico del Laboratorio de Agua y Suelo del Instituto de Ciencias Agrícolas de la UABC. Se agradece también a los Ingenieros Agrónomos Arturo González Arizaga, Víctor Acosta y Juvencio Romero, distribuidores y donadores de los materiales de semillas de maíz evaluados en este estudio.

## LITERATURA CITADA

- Ávila-Casillas, E., J. I. Alvarado-Padilla, M. Camarillo-Pulido y A. Morales-Maza. 2014. Guía para producir maíz para grano en el valle de Mexicali, B. C. y San Luis Rio Colorado, Son. Instituto Nacional de INIFAP, CIRNO, Campo Experimental Valle de Mexicali. Folleto para productores Núm. 63. Mexicali Baja California. ISBN: 978-607-37-0377-2.
- Bender, R. R., J. W. Haegerle, M. L. Ruffo, and F. E. Below. 2013. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agron. J.* 105: 161-170. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0352>.
- Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Res.* 89: 1-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>.
- Campelo, D. H., A. dos S. Teixeira, L. C. J. Moreira, and C. F. de Lacerda. 2019. Growth, production and water and nitrogen use efficiency of maize under water depths and nitrogen fertilization. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.* 23: 747-753. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p747-753>.
- Chen, K., J. J. Camberato, and T. J. Vyn. 2017. Maize grain yield and kernel component relationships to morphophysiological traits in commercial hybrids separated by four decades. *Crop Sci.* 57: 1641-1657. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.06.0540>.
- Duchemin, B., R. Hadria, S. Erraki, G. Boulet, P. Maisongrande, A. Chehbouni, R. Escadafal, J. Ezzahar, J. C. B. Hoedjes, M. H. Kharrou, S. Khabba, B. Mougenot, A. Olioso, J. C. Rodriguez, and V. Simonneaux. 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf index and remotely-sensed vegetation indices. *Agric. Water Manage.* 79: 1-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.013>.
- English, N. B., J. F. Weltzin, A. Fravolini, L. Thomas, and D. G. Williams. 2005. The influence of soils texture and vegetation on soil moisture under rainout shelters in a semi-desert grassland. *J. Arid Environ.* 63: 324-343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.013>.
- Hossne, A. J., J. Méndez, F. A. Leonett, J. E. Meneses, and J. A. Gil. 2016. Maize root growth under regular water content, subjected to compaction, irrigation frequencies, and shear stress. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 69: 7867-7880. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/rfna.v69n1.54754>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2019. Edafología. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/> (Consulta: febrero 20, 2019).
- Jacobs, B. C. and C. J. Pearson. 1991. Potential yield of maize, determined by rates of growth and development of ears. *Field Crops Res.* 27: 281-298. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90067-6).
- Judkins, G. and S. Myint. 2012. Spatial variations of soils salinity in the Mexicali valley, México: Application of a practical method for agricultural monitoring. *Environ. Manage.* 50: 478-489. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9889-3>.

- Katerji, N., M. Mastrorilli, and G. Rana. 2008. Water use efficiency of crops in the Mediterranean region: Review and analysis. *Eur. J. Agron.* 28: 493-507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.003>.
- Khan, J. Z. and N. K. Mohammadi. 2019. A review on drip fertigation on field crops. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 8: 722-729.
- Liu, H., H. Yang, J. Zheng, D. Jia, J. Wang, Y. Li, and G. Huang. 2012. Irrigation scheduling strategies based on soil matric potential on yield and fruit quality of mulched-drip irrigated chili pepper in Northwest China. *Agric. Water Manage.* 115: 232-241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.09.009>.
- Mahajan, G. and K. G. Singh, 2006. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agric. Water Manage.* 84: 202-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.003>.
- Mangani, R., E. H. Tesfamariam, G. Bellocchi, and A. Hassen. 2018. Growth, development, leaf gaseous exchange, and grain yield response of maize cultivars to drought and flooding stress. *Sustainability* 10: 3492. doi: <https://doi.org/10.3390/su10103492>.
- Marouelli, A. and W. L. C. Silva. 2007. Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil. *Irrig. Sci.* 25: 411-418. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0056-6>.
- Mendoza-Pérez, C., E. Sifuentes-Ibarra, W. Ojeda-Bustamante, and J. Macías-Cervantes. 2016. Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. *Ing. Agríc. Biosist.* 8: 29-40. doi: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.03.001>.
- Nunes, J. A. S., E. M. Bonfim-Silva, and T. J. A. da Silva. 2016. Bulk density and water tensions in the soil on corn root production. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 20: 357-363. doi: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n4p357-363>.
- Sandhu, O. S., R. K. Gupta, H. S. Thind, M. L. Jat, H. S. Sidhu, and Y. Singh. 2019. Drip irrigation and nitrogen management for improving crop yields, nitrogen use efficiency and water productivity of maize-wheat system on permanent beds in north-west India. *Agric. Water Manage.* 219: 19-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.040>.
- Sangoi, L. 2001. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Cienc. Rural* 31: 159-168. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000100027>.
- Shock, C. C. and F. X. Wang. 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. *HortScience* 46: 178-185. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.2.178>.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2018. Avance de siembras y cosechas resumen nacional por estado. [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do) (Consulta: febrero 18, 2019).
- Thompson, T. L., T. A. Doerge, and R. E. Godin. 2002. Subsurface drip irrigation and fertigation of broccoli: I. yield, quality and nitrogen uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 186-192. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1860>.
- Thompson, R. B., M. Gallardo, L. C. Valdez, and M. D. Fernández. 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agric. Water Manage.* 88: 147-158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.007>.
- Tollenaar, M. and L. M. Dwyer. 1999. Physiology of maize. pp. 169-204. *In*: D. L. Smith and C. Hamel (eds.). *Crop yield, physiology and process*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Heidelberg, Germany. eBook ISBN: 978-3-642-58554-8.
- Vatta, K., R. S. Sidhu, U. Lall, P. S. BIRTHAL, G. Taneja, B. Kaur, N. Devineni, and C. MacAlister. 2018. Assessing the economic impact of a low-cost water-saving irrigation technology in Indian Punjab: the tensiometer. *Water Int.* 43: 305-321. doi: <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1416443>.
- Vaz, M. V. H., S. M. Cicero, D. Dourado-Neto, T. L. Pupim, and M. A. N. Dias. 2013. Seed vigor and initial growth of corn crop. *J. Seed Sci.* 35: 64-69. doi: <https://doi.org/10.1590/S2317-15372013000100009>.
- Yin, X., M. A. McClure, N. Jaja, D. D. Tyler, and R. M. Hayes. 2011. In-Season prediction of corn yield using plant height under major production systems. *Agron. J.* 103: 923-929 doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0450>.
- Zeng, H., R. Shao, Y. Xue, H. Ying, Y. Yulong, Z. Cui, and Q. H. Yang. 2020. Water productivity of irrigated maize production systems in Northern China: a meta-analysis. *Agric. Water Manage.* 234: 106119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106119>.