



REACCIONES FISIOLÓGICAS Y CRECIMIENTO INICIAL DE MAÍZ TUXPEÑO CON VERMICOMPOST Y SUSPENSIÓN DE RIEGO †

[PHYSIOLOGICAL REACTIONS AND INITIAL GROWTH OF TUXPEÑO CORN WITH VERMICOMPOST AND IRRIGATION SUSPENSION]

Rigoberto Castro-Rivera¹, Gisela Aguilar-Benítez^{2*},
Cecilia Beatriz Peña-Valdivia³, Elia Cruz-Crespo⁴,
María Myrna Solís-Oba¹ and José Pablo Lara-Ávila⁵

¹*Instituto Politécnico Nacional. CIBA Tlaxcala. Ex Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5 Tlaxcala, México C.P.90700.*

Email: rcastror@ipn.mx, mirobatlx@hotmail.com

^{2*}*Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. De Altair 200, Colonia del Llano, San Luis Potosí, México. C.P. 78377.*

Email: gisela.aguilar@uaslp.mx

³*Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Estado de México, México. C.P. 56230. Email: cecilia@colpos.mx*

⁴*Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura. Km 9 Carretera Tepic-Compostela, Xalisco, Nayarit, México. C.P. 63780. Email:*

ccruz2006@yahoo.com.mx

⁵*Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera San Luis Potosí-Matehuala, Apartado Postal 32, México. C.P. 78321.*

Email: pablo.lara@uaslp.mx

**Corresponding author*

SUMMARY

Background: The water deficit in the early stages of corn cultivation determines the survival of the seedlings and the establishment of the crop, so it is desirable that the soil can conserve available moisture for long periods of time. Organic fertilizers improve water holding capacity of soil, although studies of their effect on water deficit conditions are scarce. **Objective:** To evaluate the effect of vermicompost on soil moisture and the physiology and growth of corn seedlings. **Methodology:** In greenhouse conditions, a completely randomized experiment with factorial arrangement was designed. Two cultivars of Tuxpeño corn (tolerant and susceptible to drought) grown in a substrate composed of a mixture of agricultural soil and 0, 1.5 and 3% of vermicompost were evaluated. The field capacity, the permanent wilting point, and the water potential (Ψ_A) of the substrate were recorded. In the seedlings, from the fifth ligulate leaf, stomatal conductance (g_s), transpiration (E), CO_2 assimilation (A), biomass and proline contents were measured. **Results:** There was an increase in the permanent wilting point values, but not in field capacity, therefore the water usable decreased with the vermicompost. In the seedlings grown in the mixture with 1.5 and 3% of vermicompost, the g_s , A and E decreased. At higher proportion of vermicompost the root biomass increased. The cultivar x vermicompost interaction for g_s and root biomass production was evidenced. No significant difference in proline content was observed. **Implications:** In this study the early vegetative stage and the total suspension of irrigation were evaluated, the evaluation of the complete biological cycle of the crop with intermittent suspension of irrigation is required to generate greater knowledge of the processes involved in the soil-crop dynamics. **Conclusion:** Vermicompost promoted biomass production, although the physiological parameters and water usable on soil decreased.

Key words: *Zea mays*; gas exchange; water stress; vermicompost

RESUMEN

Antecedentes: El déficit de humedad en etapas tempranas del cultivo de maíz determina la sobrevivencia de las plántulas y el establecimiento del cultivo, por lo que es deseable que el suelo pueda conservar humedad disponible por periodos largos de tiempo. Los fertilizantes orgánicos pueden contribuir en la retención de humedad en el suelo, aunque los estudios de su efecto en estrés hídrico son escasos. **Objetivo:** Evaluar el efecto del vermicompost en la humedad del suelo y en la fisiología y el crecimiento de plántulas de maíz. **Metodología:** En condición de invernadero se estableció un experimento con arreglo factorial utilizando dos cultivares de maíz Tuxpeño (tolerante y

† Submitted February 20, 2021 – Accepted September 19, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.

susceptible a sequía) cultivados en un sustrato compuesto por una mezcla de suelo agrícola y 0, 1.5 y 3% de vermicompost. Se registró la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el potencial de agua (Ψ_A) del sustrato. En las plántulas, a partir de la quinta hoja ligulada, se midió la conductancia estomática (g_s), transpiración (E), asimilación de CO_2 (A), biomasa y contenido de prolina. **Resultados:** Se registró un incremento en los valores de punto de marchitez permanente, pero no en capacidad de campo, por lo que la humedad aprovechable disminuyó con el vermicompost. En las plántulas cultivadas en mezclas con 1.5 y 3% de vermicompost disminuyeron la g_s A y E. A mayor proporción de vermicompost se incrementó la biomasa de raíz. Se evidenció la interacción cultivar x vermicompost para g_s y producción de biomasa en raíz. No se observó diferencia significativa en el contenido de prolina. **Implicaciones:** En este estudio se evaluó la etapa vegetativa temprana y la suspensión total del riego, se requiere la evaluación del ciclo biológico completo del cultivo con suspensión intermitente del riego, para generar mayor conocimiento de los procesos implicados en la dinámica suelo-cultivo. **Conclusión:** El vermicompost promovió la producción de biomasa, mientras los parámetros fisiológicos y la humedad aprovechable disminuyeron. **Palabras clave:** *Zea mays*; intercambio de gases; sequía; vermicompost

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) ocupa el octavo lugar en la lista de productos agrícolas más importantes del mundo con una producción que ronda los 1,100 millones de toneladas en el año 2020 (FAOSTAT, 2021). En México es el cultivo más importante desde las perspectivas alimentaria, industrial, política y social; aporta cerca del 65% del volumen de la producción de cereales, y en 2020 se cultivó en 7,481,136.87 ha (SIAP-SAGARPA, 2021), en una amplia diversidad de agroecosistemas. La misma fuente reporta que casi el 80% de esa superficie fue cultivada en condiciones de temporal, en ambientes cálidos y secos, con importante participación de maíces criollos o criollos mejorados. En particular, el maíz Tuxpeño se reconoce como una de las razas con mayor adaptabilidad y distribución en ambientes de trópico, además, destaca su importancia como patrón varietal (conjunto de variedades manejadas por los agricultores en un área geográfica definida) determinante en la conservación de maíces nativos (Vidal *et al.*, 2018), así como su alta calidad para diversos usos comunes (tortillas, elotes, botanas, pozole, atoles, bebidas) que contribuyen significativamente a la seguridad alimentaria de poblaciones rurales (Fernández *et al.*, 2013).

En etapas tempranas del cultivo de maíz el déficit de humedad en el suelo determina la germinación, así como la adaptación y establecimiento de las plantas (Akinwale *et al.*, 2017). Aunque las plántulas de maíz requieren menos agua que las plantas de etapas fenológicas subsecuentes, en las fases tempranas el maíz es muy sensible al estrés ambiental como la sequía, que puede provocar pérdida total del cultivo (Badr *et al.*, 2020). Algunos autores han reportado la evaluación de parámetros de crecimiento midiendo variables como biomasa, longitud de tallo y peso de raíz, en plántulas en condición de estrés para evaluar genotipos tolerantes a sequía (Avramova *et al.*, 2015; Akinwale *et al.*, 2017; aunque, pocas veces se evalúa a la par las reacciones fisiológicas tempranas al estrés hídrico como el cierre de estomas, la disminución en

la tasa de fotosíntesis y la acumulación de osmolitos (Hsiao, 1974; Avendaño *et al.*, 2005; Grzesiak *et al.*, 2006; Hayano *et al.*, 2009; Grzesiak *et al.*, 2012; Min *et al.*, 2016; Badr *et al.*, 2020).

Por otra parte, ante un panorama de disminución de precipitaciones e incremento de las temperaturas, es prioritario evaluar prácticas agroecológicas para mejorar la retención de agua en la capa arable del suelo, como la adición de materia orgánica (Eden *et al.*, 2017). En este orden de ideas, se sabe que la adición de fertilizantes orgánicos es una de las buenas prácticas agroecológicas en el manejo del suelo, con la que se mejora la capacidad de retención de humedad (Antonio *et al.*, 2000; Mirzabaiki *et al.*, 2020). En particular, se ha reportado que la adición de vermicompost al suelo incrementa la porosidad y disminuye la densidad aparente, lo que provee mayor aireación y mejor drenaje, incrementando su capacidad de retención de humedad (Parthasarathi *et al.*, 2008).

Por lo anterior, en esta investigación se planteó evaluar el efecto de dos proporciones de vermicompost en la retención de humedad del suelo, el crecimiento, intercambio de gases y el contenido de prolina en plantas jóvenes de dos cultivares de maíz Tuxpeño (susceptible y tolerante a sequía), con riego y suspensión de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El experimento se desarrolló en un invernadero de baja tecnología tipo túnel del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, ubicado en 19° 27' latitud N y 98° 54' de longitud W, altitud de 2220 msnm (INEGI, 2005). El tiempo de evaluación desde la siembra hasta la cosecha de plántulas fue de 52 días. Se registró una temperatura media de 26 °C con humedad relativa entre 48 y 60%.

Material vegetal y sustrato

Se utilizaron los cultivares de maíz Tuxpeño ciclo 0 (TC0 – sensible a sequía) y ciclo 8 (TC8 – tolerante a sequía), de selección recurrente para tolerancia a sequía, obtenidos por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). La metodología para la selección de estos cultivares con los ciclos de mejoramiento fue descrita por Bolaños and Edmeades (1993a, 1993b). En una prueba estándar de germinación (ISTA, 2010) se registraron valores superiores al 90%, el peso individual medio fue de 28 mg y el contenido de humedad de 9%, todos los valores sin diferencias significativas ($p \geq 0.05$) entre los cultivares.

El suelo se obtuvo de los primeros 20 cm de profundidad de una parcela agrícola de Texcoco, Estado de México, su clase textural fue franco arcillo arenoso. El suelo y las mezclas con vermicompost se analizaron solo al inicio del experimento, para su caracterización física y química en el laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

El vermicompost fue aportado por el módulo de abonos orgánicos y lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo. Los materiales para la elaboración del lote donado fueron residuos de cosecha de jitomate, hojas secas de fresno y estiércol de bovino en una proporción 40:20:40. El producto obtenido tuvo pH 7.2, conductividad eléctrica 3.99 dS m⁻¹ y 21.7% de materia orgánica (valores aceptables dentro de la norma NMX-FF-109-scfi-2007).

El agua utilizada para los riegos del cultivo durante el experimento tuvo pH de 7.4 y CE de 0.53 ds m⁻¹, sin diferencias significativas durante el periodo de evaluación, valores que descartan riesgo de salinidad, según la clasificación de la calidad de agua apta para riego (Ayers and Wescot, 1985).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar en parcelas divididas y mediciones repetidas (Kuehl, 2001), con un arreglo factorial 2 x 2 x 3. Los factores de estudio fueron: (a) dos cultivares de maíz (TC0 y TC8); (b) dos condiciones de humedad (riego y su suspensión después de que la quinta hoja ligulada estuvo totalmente expandida); y (c) tres sustratos (suelo sin y con 1.5 y 3% de vermicompost). Las macetas de plástico rígido con capacidad para dos kg de sustrato se llenaron con suelo agrícola sin mezclar y mezclado con vermicompost, en proporciones de 1.5 y 3% con base en peso seco; equivalentes a 0, 40 y 80 ton ha⁻¹ respectivamente, considerando la densidad aparente del suelo (1.37 g

cm⁻³) y una profundidad de 20 cm (Troeh and Thompson, 1993). Se depositaron tres semillas por maceta y en el estado V1 (primera hoja ligulada totalmente expandida) se dejaron las dos plántulas más vigorosas por maceta. Se aplicó riego cada tercer día. A los 40 días después de la siembra, cuando más del 50% de las plántulas tenían la quinta hoja ligulada expuesta, se aplicó un riego a capacidad de campo y se asignaron al azar los tratamientos con riego y los que se mantendrían sin riego. Los tratamientos con riego se mantuvieron con humedad aprovechable cercana a 80%. Para disminuir la pérdida de agua por evaporación, la superficie del suelo se cubrió con una capa de 2 cm de unicel granulado. No se presentaron plagas ni enfermedades.

El análisis estadístico se realizó con el software estadístico SAS versión 9 (SAS, Institute, 2002). Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza bajo los procedimientos PROC GLM y PROC MIXED. La separación de medias de los factores principales y sus interacciones se realizó mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

Variables evaluadas

Potencial de agua del suelo (Ψ_A). Al día ocho sin riego, con un sacabocado se obtuvieron muestras de suelo de los primeros 10 cm de profundidad de cada maceta, que se colocaron hasta alcanzar el equilibrio termodinámico en cámaras psicrométricas (WESCOR C-52, Inc., Logan, Utha.) conectadas a un microvoltímetro (WESCOR HR-33T, Inc., Logan, Utha.) operado en el modo de punto de rocío.

Intercambio de gases. A partir de la suspensión del riego se marcó la quinta hoja ligulada de tres plantas por tratamiento. En la parte central de la hoja marcada se realizaron mediciones instantáneas diarias de asimilación de CO₂ (A), transpiración (E) y conductancia estomática (g_s) con un sistema de análisis de gases portátil (CIRAS-1, PPSYSTEMS), por un periodo de 7 días.

Biomasa. Para obtener la biomasa seca, las estructuras de la planta (hojas y raíz) se sometieron a 70°C en bolsas de papel por 72 h. Al cosechar las plantas se registró la altura con una regla milimétrica. El área foliar se determinó con un integrador electrónico LICOR LI300 (LI-COR, Inc. Lincon, NE).

Contenido de prolina. Se siguió el método colorimétrico descrito por Bates *et al.* (1973), en muestras liofilizadas de 1 cm de la zona apical de la raíz principal. Una vez registrados los valores de absorbancia se obtuvo la concentración de prolina mediante una curva de calibración elaborada con una concentración máxima de 1000 nmoles mL⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de ocho días de suspensión del riego se observaron diferencias ($p \leq 0.05$) en el potencial de agua del suelo (Ψ_A), de tal forma que, la diferencia entre la mayor proporción de vermicompost y el suelo sin vermicompost fue del 93% (Tabla 1). Por otro lado, la adición de vermicompost produjo cambios físicos inmediatos en el suelo (Tabla 2), principalmente en la porosidad total que se incrementó en casi 7% en el suelo con 3% de vermicompost, en relación al testigo. Al respecto se sabe que propiedades como la orientación, tamaño, volumen y continuidad de los poros contribuyen a mejorar la capacidad de retención de agua de un suelo (Dikinya *et al.*, 2007; Sasal *et al.*, 2017; Mirzabaiki *et al.*, 2020). En cuanto a la capacidad de campo no se encontraron diferencias significativas, pero el valor de punto de marchitez permanente se incrementó en 13% en suelo con 3% de vermicompost, con respecto al suelo sin vermicompost. Con estos resultados se infiere que el vermicompost provocó la formación de poros finos o pequeños (<10 micras), los que retienen más agua capilar (Foley and Cooperband, 2002). Además, la conductividad eléctrica subió en 37% en el tratamiento con la adición del 3% de vermicompost en comparación al testigo, lo que contribuyó con el potencial osmótico para hacer más grande el valor del Ψ_A . Estos resultados evidencian que el vermicompost mejoró algunas propiedades físicas del suelo, pero afectó propiedades químicas que disminuyen la disponibilidad de agua para el cultivo.

En relación a los cultivares (Tabla 1), el valor menos negativo (-0.98) se registró en el suelo con el cultivar tolerante, indicando una menor demanda de agua. Este efecto puede atribuirse a cambios anatómicos y estructurales de la raíz, los que no se evaluaron en este estudio, pero han sido reportados previamente por coautores de este trabajo. En función de lo planteado, en maíz Tuxpeño C8 se ha observado un adelgazamiento significativo del espesor de la protodermis y la endodermis, así como la reducción del diámetro de los vasos del xilema en raíces de plántulas en reacción al Ψ_A ; considerando que estos cambios son resultado de la selección recurrente para tolerancia a la sequía del maíz, lo que podría contribuir a un menor consumo de agua (Peña *et al.*, 2005). El papel de la protodermis y endodermis en la regulación del flujo de agua y la capacidad de las raíces para absorber agua ha sido ampliamente explicado en un complejo modelo de transporte de agua y solutos (Steudle, 2000).

En la Tabla 3 se advierte que hubo diferencias significativas en el área foliar por efecto del cultivar y el riego, el genotipo tolerante produjo 56 cm² menos área foliar que el cultivar susceptible, lo que pudo

incidir en el menor consumo de agua. Al respecto, algunos autores han señalado como rasgos de tolerancia a sequía la limitación en el crecimiento de órganos que incrementen la transpiración y una mayor asignación de recursos a la raíz para mejorar la absorción de agua y nutrientes (Li *et al.*, 2014; Naveed *et al.*, 2014; Badr *et al.*, 2020). En la biomasa seca de la raíz (BSR) y biomasa seca del tallo (BST) se registró que estas variables reaccionaron a la interacción cultivar x vermicompost. Aunque el crecimiento vegetal se ha correlacionado directamente con el contenido de nutrientes disponibles en el suelo (Canatoy, 2018), también se sabe que está directamente relacionado con la presencia y concentración de hormonas reguladoras del crecimiento que limitan o promueven la elongación y división celular; en este sentido, se ha revelado que algunos compuestos con estructura similar a los ácidos abscísico e indolacético están presentes en los humatos del vermicompost, lo que promueve el crecimiento vegetal (Barros *et al.*, 2010; Canellas *et al.*, 2012; Thu *et al.*, 2013; Blouin *et al.*, 2019; Canellas *et al.*, 2019).

Tabla 1. Potencial de agua (Ψ_A) de suelo sin y con vermicompost, 8 días después de suspender el riego.

Factor	Cultivar		Vermicompost (%)		
	Susceptible	Tolerante	0.0	1.5	3.0
Ψ_A (MPa)	-1.29b	-0.98a	-0.88a	-	-
EEM				0.84a	1.7b
		0.14		0.32	

Valores con letra distinta en cada fila son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$)

Tabla 2. Características físicas y químicas, y constantes de humedad del suelo y las mezclas evaluadas.

Parámetros	Proporción de vermicompost %			EEM
	0	1.5	3.0	
Conductividad eléctrica dS/m ⁻¹	0.91b	1.22a	1.25a	0.15
Densidad aparente g/cm ³	1.37a	1.35a	1.3a	0.09
Porosidad total %	45.06b	45.73a	48.33a	1.2
Capacidad de campo %	12.4a	12.9a	12.8a	0.32
Punto de marchitez permanente %	6.7b	7.4a	7.7a	0.35

Valores con letra distinta en cada fila son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$)

Tabla 3. Variables de crecimiento en maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivado con diferentes proporciones de vermicompost.

	Altura cm	Área foliar cm ²	BSR g pl ⁻¹	BST g pl ⁻¹
Vermicompost (%)				
0	22.92 a	253.84 a	1.60 b	1.68b
1.5	20.51 a	317.44 a	2.09 a	2.00ab
3	20.27 a	322.24 a	1.93 a	2.15a
EEM	3.46	35.1	0.21	0.18
Cultivar				
Susceptible	20.45 a	327.91 a	1.98 a	2.12a
Tolerante	21.94 a	271.21 b	1.77 b	1.75b
EEM	2.8	24.7	0.09	0.12
Humedad				
Riego	21.24 a	349.65 a	2.19 a	2.28a
Suspensión	21.15 a	249.94 b	1.56 b	1.57b
EEM	2.8	22.6	0.14	0.32
Humedad x cultivar	NS	NS	NS	NS
Cultivar x vermicompost	NS	NS	*	*
Humedad x vermicompost	NS	NS	NS	NS

Medias en las columnas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$). BSR: Biomasa seca de la raíz, BST: Biomasa seca del tallo

En las variables fisiológicas evaluadas, la conductancia estomática (g_s), la asimilación neta de CO_2 (A) y la transpiración (E) redujeron significativamente sus valores al adicionar vermicompost ($p < 0.05$). El cultivar susceptible transpiró un 10% más que el cultivar tolerante ($p < 0.05$). Al suspender el riego la asimilación de CO_2 se redujo hasta en 30% (Tabla 4). La interacción entre variables fue significativa para la conductancia estomática y la asimilación de CO_2 . El cultivar susceptible reaccionó disminuyendo su g_s al crecer en suelo con vermicompost y con riego; mientras que el cultivar tolerante fue más estable y no modificó significativamente su reacción en las dos condiciones de humedad ($p \geq 0.05$) (Figura 1 A-B). A pesar de esas reacciones diferenciales, después de siete días sin riego, en ambos cultivares la g_s alcanzó valores cercanos a cero por efecto del estrés hídrico, sin distinción de la proporción de vermicompost.

En la tabla 4 se observa que con 3% de vermicompost se redujo en 22% la asimilación neta y en 18% la transpiración, en relación al testigo; mientras que, la suspensión de riego redujo hasta en 23% esta variable, respecto a la condición de riego. En la Figura 1 se presentan los efectos de las interacciones de factores y es evidente que el cultivar susceptible a sequía redujo significativamente la asimilación neta de CO_2 (A) por la adición de vermicompost, con un efecto aditivo por la suspensión de riego. El cultivar tolerante a sequía incrementó la asimilación neta de CO_2 con 1.5% de vermicompost en la condición de suspensión de riego, pero con 3% de vermicompost esta variable disminuyó significativamente (Figura 1

C-D). El cultivar susceptible en condición de riego y sin vermicompost presentó los valores más altos de transpiración (Figura 1 E-F).

Tabla 4. Variables fisiológicas en maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivado con diferentes proporciones de vermicompost.

	g_s mmol m ⁻² s ⁻¹	A μ mol CO_2 m ⁻² s ⁻¹	E mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Vermicompost (%)			
0	44 a	7.18a	2.18a
1.5	38 ab	6.49ab	1.97ab
3	34.7b	5.59b	1.79b
EEM	3.41	0.70	0.15
Cultivar			
Susceptible	39.6a	6.09 a	2.07a
Tolerante	38a	6.7 a	1.87b
EEM	2.78	0.57	0.08
Humedad			
Riego	39.9a	7.23a	1.99a
Suspensión	37.6a	5.55b	1.95a
EEM	2.77	0.57	0.13
Humedad x cultivar	NS	NS	NS
Humedad x vermicompost	NS	*	NS
Cultivar x vermicompost	*	NS	NS

Medias en las columnas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$). **= significancia ($p \leq 0.01$); *=significancia ($p \leq 0.05$); NS=no significancia. g_s = conductancia estomática; A= asimilación de CO_2 ; E= transpiración.

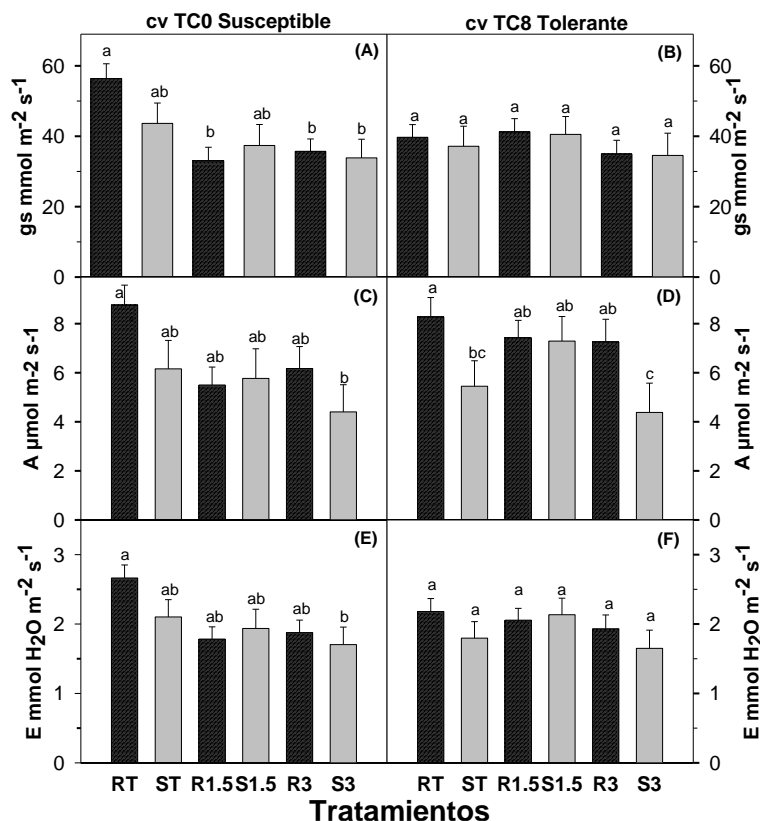


Figura 1. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) de plántulas de maíz. Tratamientos: testigo con riego (RT), testigo con suspensión de riego (ST); suelo con 1.5 % de vermicompost con riego (R1.5) y suspensión (S1.5); suelo con 3 % de vermicompost con riego (R3) y suspensión (S3). Los datos corresponden a valores promedio de un periodo de 7 días sin riego. n=36.

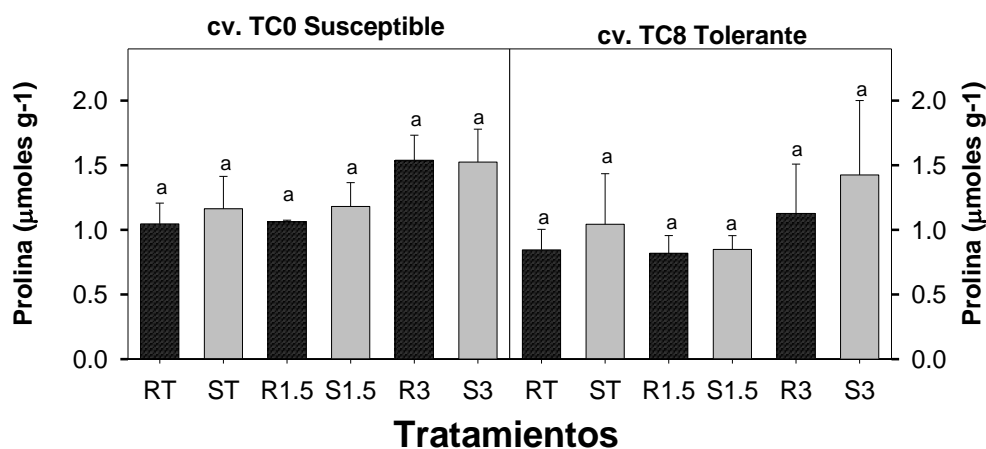


Figura 2. Contenido de prolina en el tejido seco del ápice de la raíz de plantas de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivadas en macetas, en invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión durante 12 días a partir de la exposición de la quinta hoja ligulada. Tratamientos: testigo con riego (RT), testigo con suspensión de riego (ST); suelo con 1.5% de vermicompost con riego (R1.5) y suspensión (S1.5); suelo con 3% de vermicompost con riego (R3) y suspensión (S3).

La conductancia estomática es una reacción regulada por diferentes mecanismos hidráulicos detonados por la interacción de la condición de humedad, potencial de agua en el suelo, la conductancia del xilema, temperatura y sanidad en el sistema suelo-planta (Jones, 1998; Buckley *et al.*, 2003). Se considera que existe una alta complejidad en los mecanismos de señalización, pero también se considera el importante papel de las raíces para regularlos. En esta perspectiva, Kang and Zhang (2004) evaluaron la respuesta estomática de plántulas de maíz con un sistema de raíces divididas y observaron que, si alguna sección del sistema radical permanece en suelo parcialmente deshidratado, los estomas de la planta permanecen parcialmente abiertos, lo que restringe la g_s y E, en contraste con plántulas cuyo sistema radical está permanentemente en suelo húmedo.

De acuerdo con los hallazgos de este trabajo, las plantas en suelo con vermicompost estuvieron en un ambiente más seco en relación al testigo; aunque se ha documentado que la materia orgánica del suelo mejora la capacidad de retención de humedad (Glab and Gondek, 2009), en particular, sobre los cambios originados por la materia orgánica que se incorpora al aplicar vermicompost no hay detalles de los mecanismos de acción. En algunos estudios con *Capsicum annuum* L. (Berova *et al.*, 2010) y *Vigna radiata* L. (Reza *et al.*, 2016) se ha observado un incremento en la conductancia estomática, aunque la reacción se atribuyó principalmente al aporte nutricional del vermicompost y se especuló la contribución de sustancias húmicas y microorganismos en la resistencia estomática. En ambos estudios también se expone que la respuesta al vermicompost está modulada simultáneamente por factores como el cultivo, las condiciones climáticas, la etapa fenológica, la proporción y tipo de fertilizante orgánico, entre otros factores. Esto último se evidenció parcialmente en el presente estudio, ya que el efecto detrimental del vermicompost en el intercambio de gases fue más severo al suspender el riego. En ese sentido, se ha demostrado ampliamente que el estrés hídrico causa el cierre de estomas, lo que afecta el intercambio de gases y todos sus parámetros (Hsiao and Acevedo, 1974; Grzesiak *et al.*, 2006; Schmidt *et al.*, 2011).

Aunque la g_s y A fueron diferentes entre tratamientos y cultivares, y algunas interacciones entre factores fueron evidentes, el cultivar como factor principal no mostró diferencias significativas para estas respuestas (Tabla 4). Este resultado no corresponde a lo esperado al comparar cultivares con respuestas contrastantes al déficit de humedad. Al respecto, puede proponerse que la reacción observada estuvo relacionada con la etapa fenológica de la planta. En

relación a lo anterior, se ha señalado que algunos genotipos evaluados en condición de déficit de humedad pueden no presentar diferencias en la g_s durante la etapa vegetativa, pero las manifiestan en la etapa reproductiva (Atteya *et al.*, 2003). Además, el cultivar tolerante a la sequía tuvo menor transpiración que el susceptible, lo que indica una adaptación importante para prevenir la deshidratación foliar, retardar la condición de estrés y mantener las tasas de fotosíntesis. El cultivar susceptible a la sequía presentó valores de A similares a los observados en el cultivar tolerante. En función de este planteamiento, se sabe que el maíz, por ser una planta con metabolismo fotosintético C4, puede presentar tasas de asimilación de carbono (A) altas, aún con g_s bajas (Bunce, 2010).

En cuanto al contenido de prolina, a pesar de un incremento aparente en los tratamientos con mayor proporción de vermicompost (Figura 2), no se registraron diferencias significativas ($p > 0.05$). La acumulación de prolina es considerada una respuesta de ajuste osmótico de las plantas en estrés hídrico (Reza *et al.*, 2016). Sin embargo, se ha considerado que el maíz Tuxpeño, como otros maíces de origen tropical, no expresan el ajuste osmótico en respuesta a la selección, como lo demuestran Bolaños *et al.* (1993b); los mismos autores sugieren que algún mecanismo para la acumulación de solutos sigue funcionando, pero no lo describen.

CONCLUSIONES

Siete días sin riego inhibieron totalmente el intercambio de gases y la g_s en ambos cultivares, sin efecto mitigante del vermicompost. La adición de vermicompost incrementó el valor de PMP en el suelo y estimuló la producción de biomasa de raíz. El cultivar Tuxpeño tolerante a sequía (C8) mostró reacciones relacionadas al proceso de mejoramiento y selección en una etapa temprana del cultivo (mayor estabilidad en la conductancia estomática, menor transpiración y menor área foliar). Se evidenció la complejidad de la reacción fisiológica al déficit de humedad del maíz, por la interacción Vermicompost x Cultivar en las variables de crecimiento. Bajo las condiciones de evaluación, el contenido de prolina no se expresó como un mecanismo de tolerancia al estrés hídrico.

Agradecimientos

Al Programa de Valles Altos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por la donación del germoplasma evaluado. Al módulo de abonos orgánicos y lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo por aportar el vermicompost.

Funding. The work did not received external funding.

Conflict of interest. Nothing to declare.

Compliance with ethical standards. Do not apply.

Data availability. Data is available upon reasonable request to Gisela Aguilar Benítez (gisela.aguilar@uaslp.mx).

REFERENCIAS

- Antonio, L.P., Carballo, C. A., Martínez, G.A. and López, S.H., 2000. Producción de semilla de híbridos de maíz en suelos con diferente capacidad de retención de humedad en el valle de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 23(2), pp. 227-238. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/23-2/5r.pdf>.
- Akinwale, R.O., Awosanmi, F.E., Ogunniyi, O.O. and Fadoju, A.O., 2017. Determinants of drought tolerance at seedling stage in early and extra-early maize hybrids. *Maydica*, 62, pp. 1-9.
- Atteya, A.M., 2003. Alteration of water relations and yield of corn genotypes in response to drought stress. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 29(1-2), pp. 63-76.
- Avendaño, A.C.H., Trejo, L.C., López, C.C., Molina, G.J.D., Santacruz, V.A. and Castillo, G.F., 2005. Comparación de la tolerancia a la sequía de cuatro variedades de maíz (*Zea mays* L.) y su relación con la acumulación de prolina. *Interciencia*, 30(9), pp. 560-564.
- Avramova, V., AbdElgawad, H., Zhang, Z., Fotschki, B., Casadevall, R., Vergauwen L., Knapen D., Taleisnik E., Guisez Y., Asard H. and Beemster, G.T.S., 2015. Drought induces distinct growth response, protection, and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. *Plant Physiology*, 169, pp. 1382-1396. <http://www.plantphysiol.org/content/169/2/1382>.
- Ayers, R.S. and Wescot, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 29 Rev 1, Rome, Italy. pp. 174. <http://www.fao.org/3/t0234e/t0234e.pdf>.
- Badr, A., El-Shazly, H.H., Tarawneh, R.A. and Börner A., 2020. Screening for drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) germplasm using germination and seedling traits under simulated drought conditions. *Plants (Basel)*, 9(5):565, pp. 2-23. Doi:10.3390/plants9050565.
- Barros, D.L., Pasqualoto, C.L., Lopes, O.F., Oliveira, A.N., Pererira, P. L.E., Azevedo, M., Spaccini, R., Piccolo, A. and Facanha A. R., 2010. Bioactivity of chemical transformed humic matter from vermicompost on plant root growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6), pp. 3681-3688. <https://doi.org/10.1021/jf904385c>.
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, pp. 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.
- Berova, M., Karanatsidis, G., Sapundzhieva, K. and Nikolova, V., 2010. Effect of organic fertilization on growth and yield of pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Folia Horticulturae*, 22(1), pp. 1-7. Doi: 10.2478/fhort-2013-0143.
- Bolaños, J., Edmeades, G., 1993a. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Research*, 31, pp. 233-252. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90064-T](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90064-T).
- Bolaños, J., Edmeades, G. and Martínez, L., 1993b. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought-adaptive physiological and morphological traits. *Field Crops Research*, 31, pp. 269-286. Doi: 10.1016/0378-4290(93)90066-V.
- Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., Lartigue, S., Barot, S. and Mathieu J., 2019. Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(34), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0579-x>.
- Buckley, T.N., Mott, K.A. and Farquhar, G.D., 2003. A hydromechanical and biochemical model of stomatal conductance. *Plant, Cell & Environment*, 26, pp. 1767-1785. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01094.x>.
- Bunce, J.A., 2010. Leaf transpiration efficiency of some drought-resistant maize lines. *Crop Science*, 50(4), pp. 1409-1413. Doi: 10.2135/cropsci2009.11.0650.
- Canatoy, C. R., 2018. Effects of vermicompost on the growth and yield of sweet corn in Bukidnon, Philippines. *Asian Journal of Soil Science*

- and *Plant Nutrition*, 3(2), pp. 1-8. Doi: 10.9734/AJSSPN/2018/42273.
- Canellas, L.P., Dobbss, L.B., Oliveira, A.L., Chagas, J.G., Aguiar N.O., Rumjanek V.M., Novotny E.H., Olivares F.L., Spaccini, R. and Piccolo, N.O., 2012. Chemical properties of humic matter as related to induction of plant lateral roots. *European Journal of Soil Science*, 63, pp. 315-324. Doi: 10.1111/j.1365-2389.2012.01439.x.
- Canellas, P.L., Olivares L.F., Canellas, A.N.O., Mazzei, P. and Piccolo A., 2019. Humic acids increase the maize seedlings exudation yield. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6(3), pp. 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0139-7>.
- Castellanos, J.Z., Uvalle, B.J.X. and Aguilar, S.A., 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª ed. *Colección Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola*, México. pp. 226.
- Dikinya, O., Lehmann, P., Hinz, C. and Aylmore, G., 2007. Using a pore-scale model to quantify the effect of particle re-arrangement on pore structure and hydraulic properties. *Hydrological Processes*, 21(8), pp. 989-997. <https://doi.org/10.1002/hyp.6299>.
- Eden, M., Gerke, H. H. and Houot, S., 2017. Organic waste recycling in agriculture and related effects on soil water retention and plant available water: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(11), pp. 1-21. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0419-9>.
- FAOSTAT (División de Estadística de la FAO)., 2021. Datos sobre alimentación y agricultura. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#home> (consultado en enero 2021).
- Fernández S.R., Morales, L.A. and Gálvez, A.M., 2013. Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(3-A), pp. 275-283. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/286/260>.
- Foley, B.J. and Cooperband, L.R., 2002. Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. *Journal of Environmental Quality*, 31, pp. 2086-2095. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.2086>.
- Glab, T. and Gondek, K., 2009. Effect of organic amendments on water retention characteristics of Stagnic Gleysol soil. *Polish Journal of Soil Science*, 42(I), pp. 111-120.
- Grzesiak, M.T., Grzesiak, S. and Skoczowski, A., 2006. Changes of leaf water potential and gas exchange during and after drought in triticale and maize genotypes differing in drought tolerance. *Photosynthetica*, 44(4), pp. 561-568. <https://doi.org/10.1007/s11099-006-0072-z>.
- Grzesiak, M.T., Waligórski, P., Janowiak, F., Marcinska, I., Hura, K., Szczyrek, P. and Glab, T., 2012. The relations between drought susceptibility index based on grain yield (DSI_{GY}) and key physiological seedling traits in maize and triticale genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, pp. 549-565. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1097-5>.
- Hayano, K.C., Calderón, V.C., Ibarra, L.E., Herrera, E.L. and Simpson, J., 2009. Analysis of gene expression and physiological responses in three Mexican maize landraces under drought stress and recovery irrigation. *PLoS One*, 4(10), pp. 1-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007531>.
- Hsiao, T.C. and Acevedo, E., 1974. Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. *Agricultural Meteorology*, 14, pp. 59-84. Doi.org/10.1016/002-1571(74)90011-9.
- INEGI., 2005. Principales resultados por localidad 2005 (ITER). Sistema Nacional de Información Municipal. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?s=est&c=10395>
- International Seed Testing Association (ISTA)., 2010. *International Rules for Seed Testing*. Rules 2010. ISTA Ed. Zurich. Switzerland, pp. 243.
- Jones, H. H., 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 49, pp. 387-398.
- Kang, S. and Zhang J., 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact of water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), pp. 2437-2446. Doi: 10.1093/jxb/erh249.
- Kuehl, R., 2001. *Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. 2ª ed. Thomson. México. pp. 666.
- Li, X., Mu, C. and Lin, J., 2014. The germination and seedlings growth response of wheat and corn to drought and low temperature in spring of Northeast China. *Journal of Animal & Plant*

- Sciences*, 21(1), pp. 3213-3222. <https://www.m.elewa.org/JAPS/2014/21.1/1.pdf>.
- Min, H., Chen, C., Wei, S., Shang, X., Sun, M., Xia, R., Liu, X., Hao, D. and Chen, H., Xie Q., 2016. Identification of drought tolerant mechanisms in maize seedlings based on transcriptome analysis of recombination imbred lines. *Frontiers in Plant Sciences*, 7, pp. 1:19.
- Mirzabaiki, M., Ebrahimipark N.A., Pazira, E. and Samavat, S., 2020. Investigation of different organic fertilizers application on the soil water holding capacity. *Desert* (Online), 25(2), pp. 165-174. https://jdesert.ut.ac.ir/article_79254_1fb1cb3a633570ede788be082e686696.pdf.
- Naveed, M., Mitter, B., Reichenauer, T.G., Wieczorek, K., and Sessitsch, A., 2014. Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by *Burkholderia phytofirmans* PsJN and *Enterobacter* sp FD17. *Environmental and Experimental Botany*, 97, pp. 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.014>.
- NMX-FF-109-scfi-2007. Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana NMX-FF-109-scfi-2007 humus de lombriz (lombricomposta) especificaciones y métodos de prueba). Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5044562&fecha=10/06/2008
- Parthasarathi, K., Balamurugan, M. and Ranganathan, L.S., 2008. Influence of vermicompost on the physico-chemical and biological properties in different types of soil along with yield and quality of the pulse crop-blackgram. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 5(1), pp. 51-58. Doi: 10.3389/fpls.2016.01080.
- Peña, V.C.B., Sánchez, U.A.B., Trejo, L.C., Aguirre, R.J.R. and Cardenas, E., 2005. Root anatomy of drought sensitive and tolerant maize (*Zea mays* L.) seedlings under different water potentials. *Cereal Research Communications*, 33(4), pp. 705-712. Doi: 10.1556/CRC.33.2005.2-3.138.
- SAS Institute Inc., 2004. SAS/STAT® 9.1 User's guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/stat_ug_7313.pdf
- SIAP-SAGARPA., 2021. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/ (consultado en enero 2021).
- Sasal, C.M., Léonard, J., Andriulo, A. and Boizard, H., 2017. A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 173, pp. 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.017>.
- Schmidt, J.J., Blankenship, E.E. and Lindquist, J.L., 2011. Corn and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) transpiration in response to drying soil. *Weed Science*, 59(1), pp. 50-54. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00078.1>.
- Steudle, E., 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany*, 51(350), pp. 1531-1542. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1531>.
- Thu, D.T., Thi, N.P., Rumpel, C., Van, N.B. and Jouquet, P., 2013. Interactions between compost, vermicompost and earthworms influence plant growth and yield: A one-year greenhouse experiment. *Scientia Horticulturae*, 160, pp. 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.042>.
- Troeh, F. R. and Thompson L.M., 1993. Soils and soil fertility. Editorial Oxford University Press. 5ª edición. pp. 498.
- Reza, M.S.V., Nasri, M. and Azizi, P., 2016. The effect of different type of vermicompost organic fertilizer litter on quantitative, qualitative and biochemical characteristics of green mung bean (*Vigna radiata* L.) in drought stress conditions in Varamin. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 7(4), pp. 205-215.
- Vidal, V.A.M., Álvarez, A B., Coutiño, B.E., Ruiz, J.A., Ramírez, C.J.L.D. and Sánchez, J.J.G., 2018. Patrones raciales etnogenéticos de maíces Tabloncillo y Tuxpeño como mecanismos de conservación de germoplasma nativo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), pp. 1727-38. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/agricolas/article/view/1487>.