

Artículo Científico

Desempeño agronómico y fisiológico de variedades nativas de tomate mexicano sometidas a deficiencias de agua y nutrientes

Performance of native varieties of Mexican tomatoes submitted to water and nutrient deficiencies

Ramiro Maldonado-Peralta^{1,2}, Nicacio Cruz-Huerta², Iván Ramírez-Ramírez², Fernando Castillo-González³, Manuel Livera-Muñoz³, Manuel Sandoval-Villa⁴, y Víctor A. González-Hernández^{2*}

¹ Instituto Tecnológico Superior de Guasave, antes en ² Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, ³ PREGEP-Genética, y ⁴ Edafología. Colegio de Postgraduados. km 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO. C. P. 56230.

*Correspondencia: vagh@colpos.mx (Víctor A. González-Hernández)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v16i1.882>

Recibido: 31 de octubre de 2021; Aceptado: 23 de marzo de 2022

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

El agua y los nutrimentos minerales son factores esenciales para el crecimiento vegetal y la producción agrícola. El objetivo de este trabajo fue comparar el desempeño de variedades nativas de tomate en respuesta a la reducción combinada de agua y de nutrientes (25 %) aplicada a cuatro variedades de tomates nativos y un híbrido comercial, en comparación con un régimen de riego y nutrición suficiente (100 %). Las principales variables evaluadas durante el ciclo de cultivo fueron: área foliar, biomasa, rendimiento, tamaño y número de frutos por planta, número de lóculos por fruto, firmeza, sólidos solubles totales, tasa fotosintética y eficiencia en el uso del agua (EUA). Se encontró que el híbrido comercial superó a los tomates nativos en área foliar, biomasa total, y en rendimiento de fruto, con y sin déficit hídrico. Entre los tomates nativos (que no han sido sometidos al mejoramiento genético formal) sobresalió la variedad de Oaxaca (OAX) por su alto potencial de rendimiento de fruto (estadísticamente similar al del híbrido) y por su alta EUA, tanto en ambiente favorable como en estrés hídrico-nutricional. La variedad del Edo. de México (EMX) destacó por su tolerancia al estrés expresada en rendimiento de fruto y en tasa de fotosíntesis. La variedad de Puebla (PUE) mostró tolerancia al estrés en área foliar y en biomasa total, así como buen rendimiento. Por su parte la variedad de Campeche (CAM) obtuvo el más alto contenido de sólidos solubles totales, tanto con y sin estrés. Estos resultados evidencian el potencial de estos tomates nativos en

productividad y calidad de fruto, potencial que podría ser utilizado para producción comercial y para formar nuevas variedades mejoradas.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., variedades nativas, área foliar, rendimiento, biomasa, eficiencia en uso del agua.

Abstract

Water and mineral nutrients are essential factors for plant growth and agricultural production. The objective of this work was to compare the response to a combined reduction (25 %) of water and mineral nutrition on four native tomato varieties and a commercial hybrid, compared to a sufficient irrigation and nutrition regime (100 %). The main variables evaluated during the growing cycle were: leaf area, biomass, yield, fruit size and number of fruits per plant, number of locules per fruit, and fruit firmness, total soluble solids, photosynthetic rate, and water use efficiency (WUE). It was found that the commercial hybrid outperformed the native tomatoes in leaf area, total biomass, and fruit yield, with and without water deficit. Among the native tomatoes (which have not been subjected to formal plant breeding), the variety from Oaxaca state (OAX) stood out for its high fruit yield potential (statistically similar to the hybrid) and its high WUE, both in a favorable environment and under water-nutrients stress. The variety from Mexico state (EMX) stood out for its tolerance to water and nutrient stress expressed in fruit yield and photosynthesis rate. Native variety from Puebla state (PUE) showed stress tolerance in leaf area and total biomass, as well as a good yield. Likewise, the variety from Campeche state (CAM) had the highest total soluble solids content, both with and without stress. These results show the potential of native tomatoes in productivity and fruit quality, which can be exploited directly for commercial production and as gene donors to form new improved varieties.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., native tomatoes, leaf area, yield, biomass, water use efficiency.

1. Introducción

La seguridad alimentaria mundial es amenazada por el rápido aumento de la población y los cambios drásticos en el clima (Fang y Xiong, 2015; Lesk *et al.*, 2016). El conocimiento de la diversidad genética de los tomates nativos (*Solanum lycopersicon* L.) y su desempeño ante los factores bióticos y abióticos coadyuva para realizar una agricultura sustentable que también permita su conservación y aprovechamiento (Monge-Pérez, 2014; Ripoll *et al.*, 2016, Tembe *et al.*, 2017; Kapoor *et al.*, 2020). Los tomates nativos mexicanos constituyen una fuente de riqueza genética, porque se ha demostrado que hay colectas nativas que toleran las condiciones adversas de cultivo en campo e incluso superan a híbridos comerciales (Maldonado-Peralta *et al.*, 2016).

El cultivo comercial de tomate es una actividad agrícola de alta demanda de agua durante todo el ciclo, de modo que la falta de agua le induce estrés hídrico que afecta su calidad de fruto (Takács *et al.*, 2020), después de haberle provocado disminución en clorofilas y en asimilación de CO₂, a la vez de aumento en respiración, así como menor crecimiento y rendimiento (Zlatev y Cebola, 2012; Yuan *et al.*, 2016.). La sequía también afecta la absorción, el transporte y la distribución de nutrientes en la

planta (Rouphael *et al.*, 2012). Es de suponer que estos efectos adversos de la falta de agua serían agravados por una deficiencia nutrimental en el sustrato.

Asimismo, la sequía estimula la producción de ácido abscísico (ABA), ácido jasmónico y poliaminas en la raíz como medidas de protección contra el estrés, compuestos que reducen su crecimiento y actividad metabólica (Zhang y Huang, 2013; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2016.). La subsecuente acumulación de ABA en el tallo provoca cierre de estomas y disminución de transpiración y fotosíntesis, lo que restringe aún más la absorción de nutrimentos por la raíz y su transporte a la parte aérea (Caspar *et al.*, 2015). Todo ello reduce el crecimiento de la planta (Lynch *et al.*, 2012) y el rendimiento de fruto (Tembe *et al.*, 2017).

A través de su evolución las plantas han desarrollado mecanismos de defensa a nivel morfológico, fisiológico, bioquímico, celular y molecular, para poder superar las condiciones de déficit hídrico y el estrés por sequía (Lesk *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2021). La resistencia a la sequía de las plantas se puede clasificar en cuatro tipos básicos: prevención de la sequía, tolerancia a la sequía, escape a la sequía y recuperación de la sequía (Fang y Xiong, 2015). Las plantas de tomate poseen el mecanismo fisiológico de ajuste osmótico mediante acumulación de osmolitos como prolina, glicina, y betaina (Al Hassan *et al.*, 2015), para mantener la turgencia celular y evadir la sequía. Este y otros mecanismos de tolerancia a sequía sirven para enfrentar los efectos del cambio climático asociado con el aumento del CO₂ y otros gases de efecto invernadero que provocan calentamiento global, lluvias escasas o torrenciales.

Por tanto, conviene seleccionar variedades tolerantes al estrés (Hatfield y Dold, 2019), que posean altos valores de rendimiento y de eficiencia en el uso del agua y nutrientes, mediante evaluación de genotipos en condiciones de riego y nutrición deficitaria (Liu *et al.*, 2019). Un índice usado para medir el consumo de agua por la planta es la eficiencia del uso del agua (EUA), que representa los gramos de agua evapotranspirada por cada gramo de materia seca producida (Aspiazú *et al.*, 2010). El objetivo de este trabajo fue comparar el desempeño de algunas variedades nativas de tomate y de un híbrido comercial a la reducción combinada de agua y nutrientes, bajo la hipótesis de que algunos de estos cultivares podrían ser tolerantes al estrés causado por la falta de agua y de nutrientes.

2. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en un invernadero de cubierta plástica UVII-720 ubicado en Texcoco, Estado de México (19° 28' LN y 98° 50' LW, altitud de 2250 m), donde se cultivaron cuatro variedades locales provenientes de diferentes estados del país: Campeche (CAM, colecta C-271), con fruto tipo calabaza; Estado de México (EMX, colecta M-428), con fruto en forma de pera; Oaxaca (OAX, colecta O-424), con fruto en forma de riñón; y Puebla (PUE, colecta P-447), con fruto en forma de pimiento. Como testigo se usó el híbrido Cid F1 (HIB, Harris Moran®) con fruto tipo saladette.

Las plántulas de 30 d de edad (provenientes de semillas sembradas el 26 de junio de 2016 en charolas germinadoras rellenas con turba como sustrato), se trasplantaron a bolsas negras de polietileno de 10 L (40 x 40 cm, 13 L) rellenas con grava fina (partículas de 2 a 5 mm de diámetro) de tezontle rojo como sustrato.

Las plantas fueron regadas y nutridas con una solución nutritiva (Steiner, 1961) aplicada mediante riego por goteo, con dos regímenes hídrico-nutricionales contrastantes en la disponibilidad de agua y de nutrientes (RHN): 1.2 L d⁻¹ por planta (100 %, testigo) y 0.3 L d⁻¹ por planta (25 % del testigo). Estos dos tratamientos se definieron de acuerdo con Flores *et al.* (2007), quienes reportaron que el consumo de agua del tomate varía de 0.2 L d⁻¹ en la etapa inicial y hasta 1.5 L d⁻¹ por planta en la etapa adulta.

Cada régimen hídrico y nutrimental (RHN) se preparó en un tinaco para poder aplicar simultáneamente las dos tasas de riego a sus respectivos tratamientos: RHN 100% (1.2 L d⁻¹) y RHN 25% (0.3 L d⁻¹). Estos dos RHN se iniciaron a partir de los 60 ddt. El diseño experimental usado para comparar los 10 tratamientos (cinco variedades por dos regímenes RHN) fue uno completamente al azar con arreglo factorial, con cuatro repeticiones y con una planta por repetición.

Las variables del crecimiento y calidad de planta medidas a los 135 ddt, fueron: 1) Biomasa total por planta, en g de peso seco después de secado hasta peso constante en estufa con circulación forzada (Riossa®, México) a 70 °C por 72 h; 2) Área foliar (m²) por planta, con la suma del área de todas las hojas frescas de las mismas plantas muestreadas para biomasa, medida con el aparato LI-3100 (Licor, Inc., Lincoln, Nebraska, Estados Unidos); 3) Lecturas SPAD (contenido de clorofila) en la hoja madura más joven, reportada como el promedio de mediciones hechas cada 7 d con el SPAD-Konica Minolta 502 (Japan) portátil. Las variables agronómicas cuantificadas fueron el rendimiento de fruto y sus componentes: 4) Rendimiento de fruto (kg por planta), obtenido con la suma de los frutos recolectados en cada corte; 5) Número de frutos por planta, suma de los frutos cosechados en cada muestreo; y 6) Peso por fruto (g), igual al cociente del peso total de frutos entre el número de frutos. Se midieron cuatro frutos muestreados al azar para determinar calidad del fruto en cada repetición de cada tratamiento: 7) Número de lóculos, en corte transversal; 8) Grosor de mesocarpio (mm), con vernier (Trupper, modelo digital, México) en los frutos cortados a la mitad; 9) Firmeza (kg cm⁻²), con un texturómetro de Chatillón (Wagner, modelo FDV-30, Estados Unidos), adaptado con un puntal cónico de 2 mm; 10) Contenido de sólidos solubles totales, con un refractómetro digital ATAGO PR-100® (Japan), en tres gotas de jugo de fruto, los resultados se reportan en porcentaje (AOAC, 2012); 11) pH, con un potenciómetro (Corning, modelo 12, Estados Unidos) en la pulpa de los frutos molidos y homogenizados.

Las variables fisiológicas se midieron entre las 11:00 y 14:00 horas en hojas maduras jóvenes, a partir de los 60 ddt, en cuatro plantas de cada tratamiento, y luego cada 7 d hasta los 135 ddt. La tasa de asimilación de CO₂ con un aparato portátil de fotosíntesis Licor-6400 (LI-COR, Lincoln, Nebraska, Estados Unidos), en $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (variable 12). Las dos variables de eficiencia en uso de agua fueron las propuestas por Salazar-Moreno *et al.* (2014) y Yang *et al.* (2019), aquí adaptadas a solución nutritiva en lugar de agua: 13) Eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb), en gramos de biomasa total por litro de solución nutritiva utilizada (g L⁻¹); y 14) Eficiencia en el uso del agua para producir fruto (EUAf), en litros de solución nutritiva usada para producir 1 kg de fruto fresco (L kg⁻¹).

Los análisis estadísticos que se aplicaron en las variables agronómicas, calidad del fruto y de biomasa, fueron análisis de varianza conforme a un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de dos factores, y una comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Estos análisis se ejecutaron con el programa estadístico SAS (versión 9.0). La comparación de medias de la tasa neta de fotosíntesis y los índices de EUA se compararon mediante desviaciones estándar en gráficos.

3. Resultados y discusión

Las variedades (Var) de tomate aquí estudiadas mostraron diferencias significativas (Prueba de F, $P \leq 0.05$), y fueron afectadas por RHN y por la interacción Var x RHN tanto en las variables de crecimiento y rendimiento de la planta como en las de calidad de fruto. En el tratamiento RHN 100 % (sin estrés), el HIB (testigo) y la variedad nativa OAX acumularon la mayor cantidad de biomasa, 248 y 249 g/planta, a los 135 ddt (Tabla 1). La reducción de agua y nutrientes del RHN 25 % perjudicó en mayor proporción a la variedad OAX (con pérdida de 30 %), mientras que la nativa EMX tuvo la menor pérdida (12 %), lo cual muestra que las variedades de tomate poseen diferentes grados de tolerancia al estrés hídrico y nutrimental. Según Farooq *et al.* (2009), el estrés hídrico reduce la asimilación de nitrógeno, fósforo y azufre, nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas.

En las variables contenido de clorofila medido con SPAD, área foliar, número de frutos por planta, biomasa total, grosor del mesocarpio y número de lóculos por fruto, la fuente de variación más importante fue el efecto genético (Var), mientras que, en tamaño y rendimiento de fruto, firmeza y pH del fruto, la variación más importante fue por el RHN, por la interacción Var x RHN, o por ambas.

Los valores de SPAD fueron similares en todas las variedades evaluadas (Tabla 1), excepto en la variedad nativa de Campeche (CAM) cuyas hojas son de color verde pálido y cuyo valor SPAD fue de apenas 60 % respecto a las demás variedades. En tres variedades nativas (PUE, EMX y CAM), el verdor foliar no se modificó significativamente por el estrés aplicado en el RHN 25 %, pero el híbrido comercial y la variedad nativa OAX tuvieron bajas de 6 %. Los bajos valores SPAD asociados al follaje verde pálido de la variedad CAM indican un menor contenido de pigmentos fotosintéticos, como demostraron Yuan *et al.* (2016) en tomate. Dado que el régimen RHN 25 % involucró menor disponibilidad de agua y de todos los nutrimentos, se puede inferir que también disminuyó el flujo de savia que es el principal medio de transporte interno de agua y de estos nutrientes.

Las cinco variedades de tomate evaluadas redujeron ($P \leq 0.05$) su crecimiento (Tabla 1) en biomasa total (BT) y sobre todo en área foliar (AF) cuando fueron sometidos a RHN 25 % que representa una deficiencia de 75 % combinada de agua y de nutrientes minerales. Expresadas en porcentajes, las pérdidas relativas fueron diferentes entre variedades pues las más severas en AF ocurrieron en el híbrido comercial que tuvo una reducción de 38 %, y las menores pérdidas que fueron de 19 % se dieron en la variedad nativa EMX; en BT la pérdida más grande fue de 30 % en la variedad nativa OAX y la menos afectada fue de 12 % en la nativa EMX por lo que ésta destacó por su tolerancia al estrés al haber tenido menos disminución en crecimiento foliar y en producción de biomasa. Al respecto, el mantenimiento de un área foliar adecuada es vital para la fotosíntesis como principal impulsor del crecimiento de las plantas (Deka *et al.*, 2018).

Tabla 1. Efecto de dos regímenes hídrico-nutrientales (RHN, 100 % [1.2 L] y 25 % [0.3 L] de solución nutritiva aplicada por día a cada planta, mediante riego por goteo), en el crecimiento de planta y lecturas SPAD de cinco variedades de tomate (cuatro nativas y un híbrido comercial), cultivadas a un tallo y a cuatro racimos en invernadero. Entre paréntesis se muestran los efectos relativos (en %) del déficit hídrico-nutricional en comparación con el testigo sin déficit, en cada variedad y en cada variable medida.

Table 1. Effect of two water-nutrient regimes (RHN, 100 % [1.2 L] and 25 % [0.3 L] of nutrient solution applied per day to each plant, by drip irrigation), on plant growth and SPAD readings of five tomato varieties (four native and one commercial hybrid), grown to one stem and four bunches in greenhouse. Relative effects (in %) of water-nutrient deficit compared to the control without deficit are shown in parentheses for each variety and for each variable measured.

| Trat. Var- RHN | Biomasa total (g) | Área foliar (m ² /planta) | Lecturas SPAD |
|-------------------|-------------------|---|------------------|
| HIB 100 | 248.1 a | 0.78 a | 58.5 a |
| HIB 25 | 195.5 b (80 %) | 0.48 c (61.5 %) | 53.1 c (91 %) |
| OAX 100 | 249.4 a | 0.60 b | 55.8 b |
| OAX 25 | 175.4 c (70 %) | 0.39 e (65 %) | 52.7 c (94 %) |
| PUE 100 | 194.9 b | 0.59 b | 57.5 ab |
| PUE 25 | 157.3 e (81 %) | 0.45 cd (76 %) | 57.4 ab (100 %) |
| EMX 100 | 143.9 f | 0.43 d | 58.2 a |
| EMX 25 | 126.4 g (88 %) | 0.35 e (81 %) | 58.4 a (100 %) |
| CAM 100 | 167.8 d | 0.39 e | 34.2 d |
| CAM 25 | 145.1 f (86 %) | 0.28 f (72 %) | 33.6 d (98 %) |

Varietades: Híbrido (HIB); Oaxaca (OAX); Puebla (PUE); Estado de México (EMX) y Campeche (CAM). Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

Varieties: Hybrid (HIB); Oaxaca (OAX); Puebla (PUE); State of Mexico (EMX) and Campeche (CAM). Means with different letters indicate significant differences (Tukey, 0.05).

Estos resultados confirman que hay diversidad genética entre las variedades aquí estudiadas en cuanto a su grado de tolerancia a los factores probados (75 % de falta de agua y de nutrición mineral). Tal diversidad podría atribuirse a diferencias genéticas entre las variedades de tomate, asociadas con su potencial genético y adaptación a los sitios de procedencia. También autores como Tembe *et al.* (2017) y Shamim *et al.* (2013) detectaron variabilidad en tolerancia a sequía por ajuste osmótico entre accesiones de tomate. Según Zanne *et al.* (2014), mediante cambios genéticos las plantas logran los ajustes evolutivos necesarios para adaptarse a los ambientes donde crecen. Al respecto, Zhang y Huang (2013) observaron que la planta produce ácido abscísico, ácido jasmónico y poliaminas libres, que le sirven para tolerar el estrés hídrico.

Las variedades de tomate también difirieron significativamente ($P \leq 0.05$) en tamaño y rendimiento de fruto, este último medido por su peso individual (Tabla 2; Figura 1). Los mayores rendimientos y valores de los componentes, peso de fruto y número de frutos por planta, se registraron en el híbrido comercial y en la variedad nativa OAX en el tratamiento RHN 100 %; en este tratamiento el tomate OAX obtuvo los frutos más grandes y pesados. Estas características de producción de fruto resultaron disminuidas ($P \leq 0.05$) por el estrés combinado que se aplicó (RHN 25 %), excepto en la variedad nativa EMX en la que la pérdida no fue significativa. El rendimiento de la variedad CAM tuvo pérdida de 27 %, mientras que 64 % en la variedad OAX, y en el híbrido CID las pérdidas por el estrés impuesto fueron de 64 % y 55 %. Según la clasificación de calibre del fruto de tomate para exportación (Premier Horticultura Group, http://www.premierhorticultura.com/exportacion_premier_horticultura_group.html), en el tratamiento RHN 100 % casi todas las variedades formaron frutos de tamaño grande (100 a 135 g por fruto), mientras que en el tratamiento RHN 25 % los frutos de cuatro variedades fueron de tamaño pequeño (43 g en OAX, 50 g en HIB, 53 g en EMX, y 57 g en CAM), y solo una variedad produjo frutos de tamaño mediano (72 g en variedad PUE).

Por otro lado, el número de frutos por planta (NFP) no fue modificado en grado significativo ($P \leq 0.05$) por el tratamiento RHN 25 %, aunque hubo desde una pérdida de 24 % en la variedad PUE hasta una ganancia de 11 % en la variedad OAX (Tabla 2). Respuestas similares del tomate al estrés hídrico fueron reportadas por Ripoll *et al.* (2016). El escaso efecto de la deficiencia hídrica-nutricional en el NFP podría atribuirse al ajuste osmótico celular (Al Hassan *et al.*, 2015), especialmente en tejidos meristemáticos e inmaduros como demostraron Barlow *et al.* (1980), de modo que la iniciación de los frutos, que ocurre en los meristemas florales, resultó inafectada. Recientemente, Nusrat *et al.* (2018) revelaron que el silicio puede mejorar la capacidad de ajuste osmótico del tomate y con ello aumentar su tolerancia a sequía.

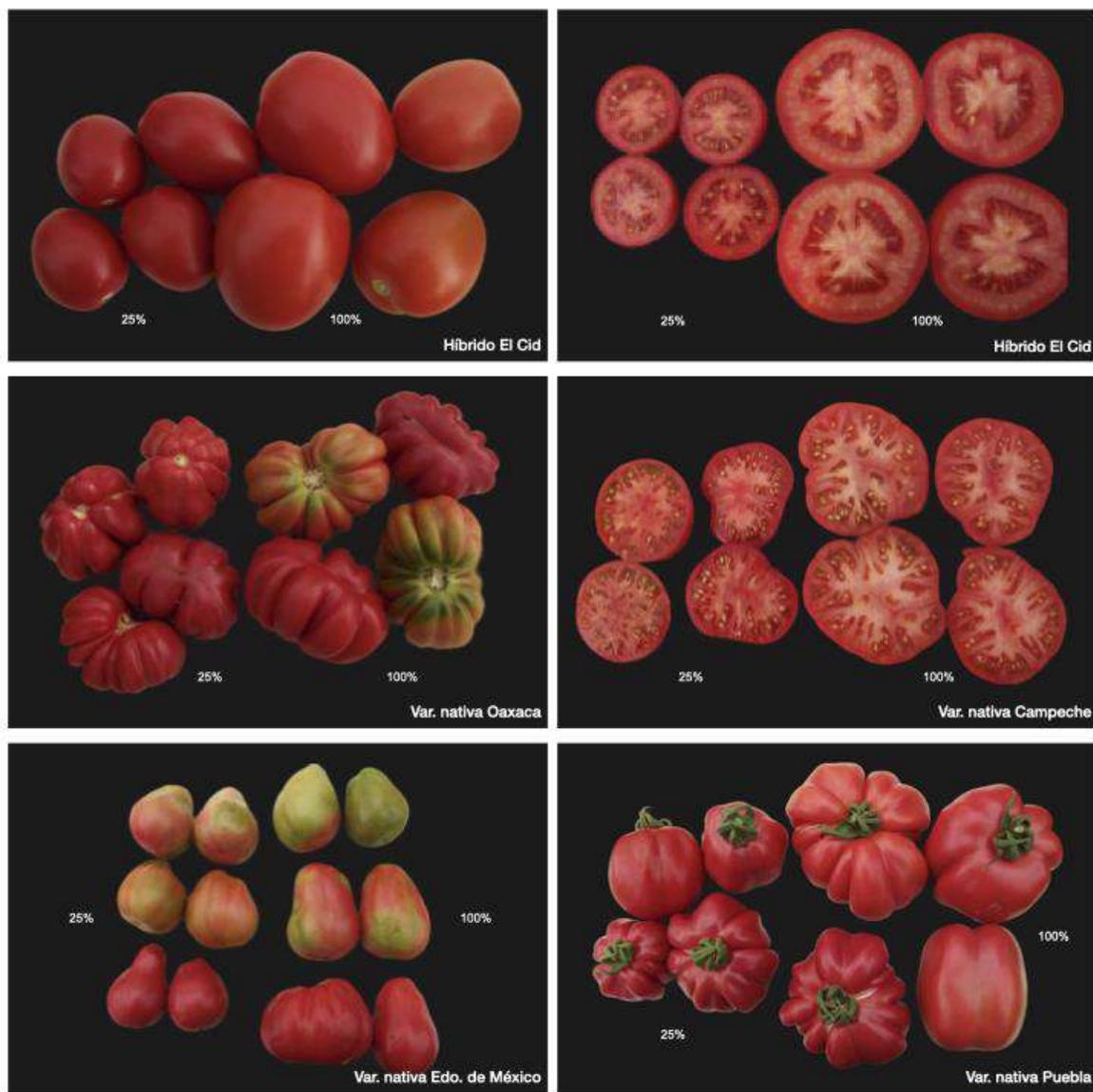


Figura 1. Frutos de los tomates cosechados en dos regímenes hídrico-nutricionales (25 % y 100 %), que ilustran sus diversas formas.

Figure 1. Fruits of tomatoes harvested in two water-nutrient regimes (25 % and 100 %), illustrating their various shapes.

Tabla 2. Efecto de dos regímenes hídricos-nutricionales (RHN, 100 % [1.2 L] y 25 % [0.3 L] de solución nutritiva aplicada por día y por planta, mediante riego por goteo) en el rendimiento de fruto y sus componentes (número de frutos por planta y peso por fruto), de cuatro variedades nativas de tomate y un híbrido comercial, cultivados a cuatro racimos en invernadero. Entre paréntesis se muestran los efectos relativos del déficit hídrico y nutricional en comparación con el testigo sin déficit, en cada variedad y en cada variable.

Table 2. Effect of two water-nutrient regimes (RHN, 100 % [1.2 L] and 25 % [0.3 L] of nutrient solution applied per day and per plant, by drip irrigation) on fruit yield and its components (number of fruits per plant and weight per fruit), of four native tomato varieties and one commercial hybrid, grown to four clusters in greenhouse. The relative effects of water and nutrient deficit compared to the control without deficit are shown in parentheses for each variety and for each variable.

| Trat. Var-RHN | Número de frutos | Peso por fruto (g) | Rendimiento |
|----------------|------------------|--------------------|-----------------|
| | | | (kg/planta) |
| HIB 100 | 34.0 a | 112.6 b | 3.77 a |
| HIB 25 | 33.5 a (98 %) | 50.4 ef (45 %) | 1.70 d (45 %) |
| OAX 100 | 27.5 ab | 154.8 a | 3.63 ab |
| OAX 25 | 30.5 a (111 %) | 43.5 e (28 %) | 1.30 d (36 %) |
| PUE 100 | 22.2 bc | 147.8 a | 3.20 b |
| PUE 25 | 17.0 c (76 %) | 72.4 cde (49 %) | 1.20 d (37.5 %) |
| EMX 100 | 31.0 a | 87.1 c | 2.65 d |
| EMX 25 | 27.2 ab (88 %) | 53.4 def (61 %) | 1.82 d (69 %) |
| CAM 100 | 30.5 a | 76.8 cd | 2.28 c |
| CAM 25 | 30.0 ab (98 %) | 56.7 def (74 %) | 1.67 d (73 %) |

Varietades: Híbrido comercial (HIB); Oaxaca (OAX); Puebla (PUE); Estado de México (EMX) y Campeche (CAM). Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

Varieties: Commercial hybrid (HIB); Oaxaca (OAX); Puebla (PUE); State of Mexico (EMX) and Campeche (CAM). Means with different letters indicate significant differences (Tukey, 0.05).

Las pérdidas en rendimiento registradas en el RHN 25 % podrían atribuirse a las reducciones en turgencia celular y en nutrición de los frutos con las consecuentes disminuciones en su crecimiento, como señalaron Deka *et al.* (2018). Otros autores como, Sibomana *et al.* (2013) reportaron que en condiciones de 40 % de la capacidad de campo hubo una disminución del 69 % en el rendimiento en tomate. Por su parte, Barraza (2012) reportó que al reducir la disponibilidad de nutrimentos en la

solución nutritiva de 175 % a 25 %, el rendimiento de fruto de pepino (*Cucumis sativus* L.) disminuyó de 8.2 a 3.3 kg/planta, lo que representa un decremento de 60 %. Las reducciones en rendimiento, así como en calidad y crecimiento de las plantas causadas por déficit hídrico, se deben a reducciones de la elongación celular, así como de fotosíntesis, transpiración y distribución de nutrientes en la planta (Rouphael *et al.*, 2012).

Es de destacar el alto potencial de rendimiento de la variedad nativa OAX que en ausencia de estrés dio casi el mismo rendimiento de fruto (96 %) que el híbrido mejorado. La variedad PUE también logró un alto rendimiento de fruto con 3.2 kg/planta, que equivale a 85% del híbrido. Es decir, en esta pequeña muestra de cuatro variedades nativas, dos de ellas mostraron alto potencial de rendimiento, aún sin haber sido sometidas a fitomejoramiento genético formal, como en el caso del híbrido. En tamaño de fruto destacaron las variedades nativas OAX y PUE que en ausencia de estrés (RHN 100 %) superaron ($P \leq 0.05$) al híbrido comercial. Al respecto, Klunklin y Savage (2017) también reportaron diferencias entre cultivares de tomate en tamaño de fruto. En este contexto, se puede inferir que OAX y PUE superan a otras variedades de tomate en capacidad de demanda del fruto para alcanzar altos rendimientos (Tabla 2), y también que su área foliar es suficiente (Tabla 1) para abastecer los fotoasimilados a los frutos en crecimiento.

Sin embargo, en condiciones de deficiencia hídrica y nutricional (RHN 25 %) la variedad OAX tuvo la mayor pérdida de peso de fruto (72 %), por lo que este tomate nativo de alto potencial de rendimiento también es sensible al estrés hídrico-nutricional. Esta baja en tamaño del fruto por efecto del estrés hídrico podría afectar su exportación en caso de que se llegara a establecer una demanda internacional de este tipo de fruto, pero no afectaría a su comercialización nacional en donde el calibre del fruto no es tan importante, y menos aún para la elaboración de purés y para extracción de antioxidantes, ya que el tomate eleva su contenido de antioxidantes en respuesta al estrés (Al Hassan *et al.*, 2015; Yuan *et al.*, 2016; Kunklin y Savage, 2017). Según Sibomana *et al.* (2013), la falta de agua es el principal factor que restringe el crecimiento y rendimiento del tomate. Además de reducir los parámetros fotosintéticos y el crecimiento del tomate, la sequía hace que las plantas sean más sensibles a la infestación del ácaro *Tetranychus evansi*, efecto asociado a la acumulación de azúcares libres y aminoácidos en los tejidos (Ximénez-Embún *et al.*, 2016). Por su parte, Liu *et al.* (2019) reportaron que una dosis moderada de K de 0.46 g por kg de suelo (50 % de la dosis óptima) puede aliviar el efecto de sequía en tomate durante la etapa de maduración del fruto. Bista *et al.* (2018) consideran que la sequía provoca absorción restringida de nutrientes y menor concentración en frutos y hojas.

Las variedades evaluadas también difirieron ($P \leq 0.05$) en tipo y calidad del fruto (Tabla 3; Figura 1). En este trabajo, el número de lóculos por fruto varió desde un promedio de 2.5 (2 a 3) en el HIB hasta un promedio de 13.7 (13 a 14) en la variedad nativa CAM. Pero esta característica no fue modificada por el tratamiento de estrés RHN 25 %, ello atribuible a que la cantidad de lóculos es definida genéticamente desde etapas muy tempranas del desarrollo floral que ocurren en los meristemos a escala microscópica, que están protegidos del déficit hídrico mediante el ajuste osmótico. El número de lóculos del tomate define la forma del fruto, como señalaron Vásquez-Ortiz *et al.* (2010). En cambio, el grosor del mesocarpio que se determina durante el crecimiento del fruto resultó reducido ($P \leq 0.05$) por dicho estrés, con pérdidas desde 12 % (no significativa) en la variedad nativa EMX, hasta de 35 % (significativa) en el HIB.

Tabla 3. Efecto de dos regímenes hídrico-nutrientales (RHN, 100 % [1.2 L] y 25 % [0.3 L] de solución nutritiva aplicada por día y por planta, mediante riego por goteo) en cinco características de la calidad de fruto medidas en cuatro variedades nativas de tomate y un híbrido comercial, todos cultivados a cuatro racimos en invernadero. Las cifras entre paréntesis son los efectos relativos del déficit hídrico y nutricional en comparación con el testigo sin déficit, para cada variedad y en cinco variables medidas.

Table 3. Effect of two water-nutrient regimes (RHN, 100 % [1.2 L] and 25 % [0.3 L] of nutrient solution applied per day per plant by drip irrigation) on five fruit quality characteristics measured on four native tomato varieties and one commercial hybrid, all grown to four bunches in greenhouse. Figures in parentheses are the relative effects of water and nutrient deficit compared to the no-deficit control, for each variety and on five measured variables.

| Trat. Var- | Número de lóculos | Grosor de | Sólidos | Firmeza | pH |
|------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------|----------------|
| | | mesocarpio (mm) | solubles totales (%) | | |
| RHN | | | | (kg cm ⁻²) | |
| HIB 100 | 2.5 f | 9.9 a | 5.8 cd | 3.75 a | 5.05 ab |
| HIB 25 | 2.5 f (100 %) | 6.4 bc (65 %) | 8.8 a (3 %) | 3.80 a (101 %) | 4.80 d (95 %) |
| OAX 100 | 10.7 bc | 6.8 b | 5.7 de | 1.63 bc | 5.00 b |
| OAX 25 | 10.5 c (98 %) | 5.8 bc (85 %) | 8.3 a (2.6 %) | 1.91 bc (117 %) | 5.00 b (100 %) |
| PUE 100 | 6.0 de | 8.9 a | 6.4 cd | 2.26 b | 5.05 ab |
| PUE 25 | 6.5 d (108 %) | 6.4 b (72 %) | 8.6 a (2.2 %) | 3.10 a (137 %) | 5.15 a (102 %) |
| EMX 100 | 4.0 ef | 6.7 b | 4.8 e | 1.23 bc | 4.95 bc |
| EMX 25 | 3.8 ef (95 %) | 5.9 bc (88 %) | 6.8 bc (2 %) | 0.69 c (56 %) | 4.85 cd (98 %) |
| CAM 100 | 13.7 a | 4.8 c | 6.5 bc | 1.26 bc | 4.60 e |
| CAM 25 | 13.0 ab (95 %) | 3.5 d (73 %) | 7.8 ab (1.3 %) | 0.94 bc (75 %) | 5.00 b (109 %) |

Varietades: Híbrido comercial (HIB); Oaxaca (OAX); Puebla (PUE); Estado de México (EMX) y Campeche (CAM). Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

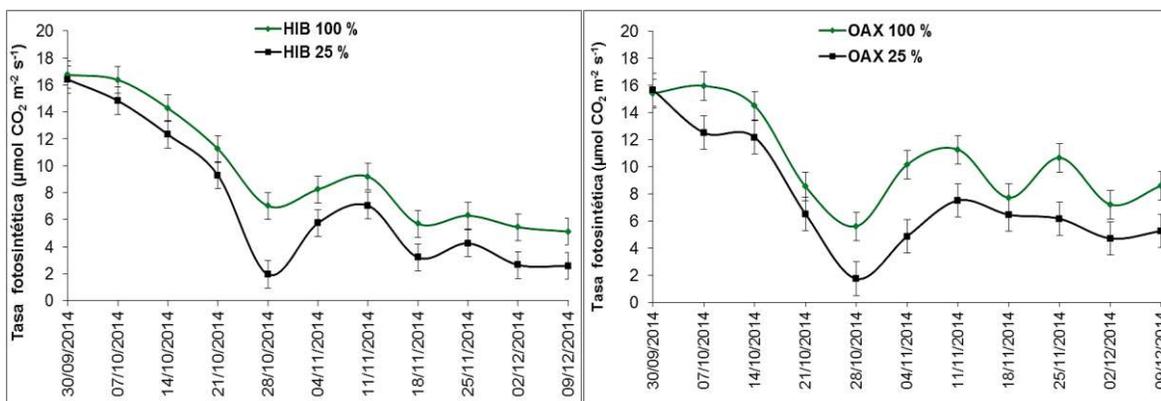
Varieties: Commercial hybrid (HIB); Oaxaca (OAX); Puebla (PUE); State of Mexico (EMX) and Campeche (CAM). Means with different letters indicate significant differences (Tukey, 0.05).

En las varias propiedades fisicoquímicas del fruto se encontró que en todas las variedades el estrés indujo aumentos significativos ($P \leq 0.05$) en el contenido de sólidos solubles totales (de los cuales predominan los azúcares), desde 1.3 % en la variedad nativa CAM (que pasó de 6.5 % sin estrés a 7.8 % con estrés) hasta un aumento de 3 % en el híbrido comercial (que subió de 5.8 a 8.8 %). Debido a que el estrés hídrico aumentó el dulzor del fruto en todas las variedades, en estas condiciones hubo menos diferencias entre variedades. En cuanto a la firmeza del fruto destacó el HIB en ausencia de estrés (RHN 100 %) con un valor de 3.8 kg cm⁻² que supera a todas las variedades nativas, las que fluctuaron de 1.23 kg cm⁻² en EMX hasta 2.26 kg cm⁻² en PUE. Las condiciones de estrés indujeron aumento de firmeza en dos variedades nativas, OAX y PUE con ganancias de 17 y 37 %, mientras que en las otras dos el estrés causó pérdidas de firmeza (de 44 % en EMX y de 25 % en CAM). Las diferencias en pH del jugo del fruto fueron pequeñas entre variedades y entre tratamientos de RHN.

Las respuestas varietales descritas evidencian la diversidad genética en propiedades cualitativas del fruto, incluyendo características de la cutícula del fruto que influyen en la firmeza y en sus respuestas a los dos niveles hídrico-nutricionales. En este rubro destaca la variedad nativa CAM por tener un pH más bajo que el resto de tomates, los que en ausencia de estrés tuvieron pH de 5 o valores muy cercanos.

Tasa de fotosíntesis neta

Las cinco variedades de tomate cultivadas bajo dos RHN disminuyeron sus tasas fotosintéticas netas a lo largo del ciclo, por efecto del estrés (Figura 2). La variedad nativa EMX se mostró tolerante al estrés porque presentó una tasa fotosintética igual que sus plantas testigo del tratamiento RHN 100 %. En contraste, las variedades nativas OAX y PUE resultaron ser las más susceptibles al tener la mayor pérdida fotosintética. El HIB y la variedad nativa CAM tuvieron pérdidas intermedias. Al respecto, es sabido que las respuestas a la falta de agua dependen del genotipo, la edad de la planta, y de la intensidad y duración de la sequía (Grzesiak *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2020).



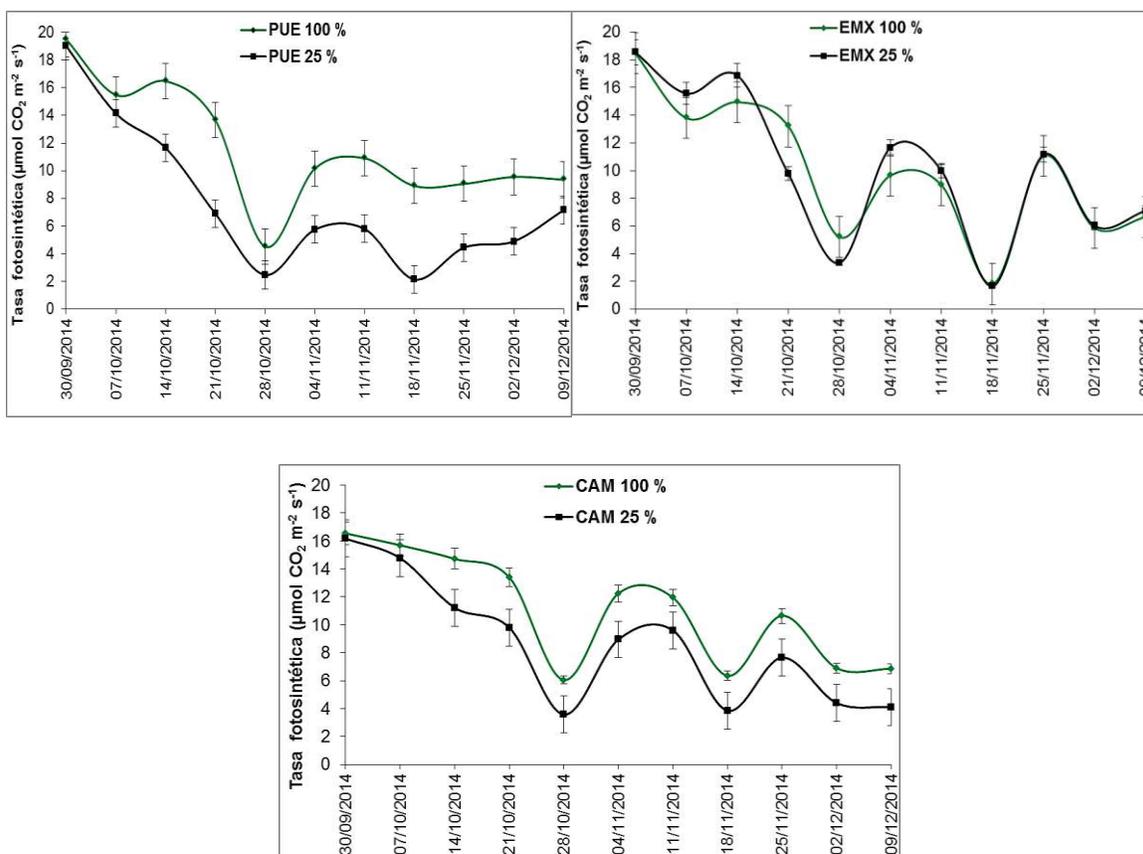


Figura 2. Tasa fotosintética en cinco variedades de tomate crecidas en invernadero y regadas con solución nutritiva mediante riego por goteo, bajo dos regímenes (RHN, 100 % [1.2 L] y 25 % [0.3 L] de solución nutritiva aplicada por día y por planta, mediante riego por goteo). Las variedades evaluadas son: El CID (HIB), Puebla (PUE), Oaxaca (OAX), Estado de México (EMX) y Campeche (CAM).

Figure 2. Photosynthetic rate in five tomato varieties grown in greenhouse and irrigated with nutrient solution by drip irrigation, under two regimes (RHN, 100 % [1.2 L] and 25 % [0.3 L] of nutrient solution applied per day and per plant, by drip irrigation). The varieties evaluated are: El CID (HIB), Puebla (PUE), Oaxaca (OAX), State of Mexico (EMX) and Campeche (CAM).

La reducida capacidad fotosintética registrada en el tratamiento RHN 25 % se reflejó en menor acumulación de biomasa, pero con diferentes magnitudes en las variedades. Por ejemplo, la variedad nativa OAX perdió 74 g por planta, mientras que la nativa EMX solo bajó 17 g. Este contraste varietal podría mostrar que la tolerancia al estrés hídrico depende del genotipo. Algunos autores mencionan que el estrés por sequía disminuye la tasa fotosintética (Liang *et al.*, 2019). Además, induce cierre de estomas, reduce el flujo de savia en xilema y el transporte de nutrientes (Yuan *et al.*, 2016), de lo cual se infiere que en consecuencia también se reduce el flujo de savia en xilema y el transporte interno de nutrimentos.

La deficiencia hídrica y nutricional afectó diversos aspectos del crecimiento de la planta, que involucraron cambios de anatomía, morfología, fisiología y bioquímica, como también apuntaron Florido y Bao (2014) y Kapoor *et al.* (2020). El conocimiento de los efectos del estrés en las

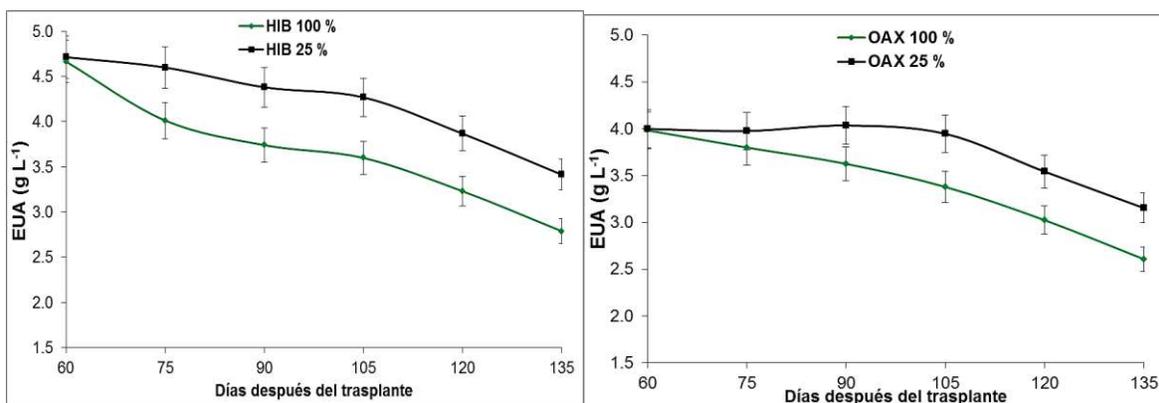
características de los tomates es importante, porque la agricultura sustentable requiere la explotación racional de variedades eficientes y tolerantes a los factores limitantes de la producción (Maldonado-Peralta *et al.*, 2016).

En este estudio se encontró que el rendimiento de fruto correlacionó más con el número de frutos por planta ($r = 0.40$) que con el peso individual del fruto ($r = 0.20$), lo que sugiere que el número de frutos tiene el doble de efecto que el tamaño del fruto. En cambio, otros autores (Anuradha *et al.*, 2018) reportaron que el tamaño del fruto correlaciona en alto grado ($r = 0.75$) con el rendimiento de tomate.

Eficiencia en el uso de agua

En las cinco variedades de tomate el estrés causado por RHN 25 % elevó su eficiencia en uso del agua para producir biomasa (EUAb, en g de materia seca acumulada por litro de agua consumida), en comparación con el RHN 100 % (Figura 3). Tal ganancia en EUAb fue más notoria en las variedades nativas OAX y PUE, lo que indica que estas variedades toleran mejor la deficiencia de agua. Durante su ciclo, las cinco variedades disminuyeron su EUAb con la edad, sobre todo durante fructificación (>90 ddt), mientras que en los primeros 90 días las variedades EMX y PUE incrementaron su EUAb, para luego disminuirla durante fructificación.

El HIB tuvo la mayor EUAb al inicio (4.7 g L^{-1}), que luego declinó a 3.4 g L^{-1} en RHN 25% y a 2.7 g L^{-1} en RHN 100 % sin estrés. Aún así, este HIB tuvo una EUAb inferior (12 a 18 g L^{-1}) reportada por Fernández y Camacho (2005) en tomate también cultivado en invernadero en Almería, España. Entre las variedades nativas la de mayor EUAb fue OAX que inició con 4 g L^{-1} y finalizó con 3 g L^{-1} en RHN 25 %, y 2.5 g L^{-1} en RHN 100 %. De igual manera, Morad *et al.* (2009) reportaron que en condiciones de estrés hídrico un cultivo eleva su eficiencia en el uso del agua, en comparación con la ausencia de tal estrés. Por su parte, Liu *et al.* (2019) observaron que una dosis media de K puede mitigar el efecto de sequía en tomate durante la etapa de cuajado del fruto, lo cual indica que una baja en la nutrición de K puede ser benéfica al cultivo.



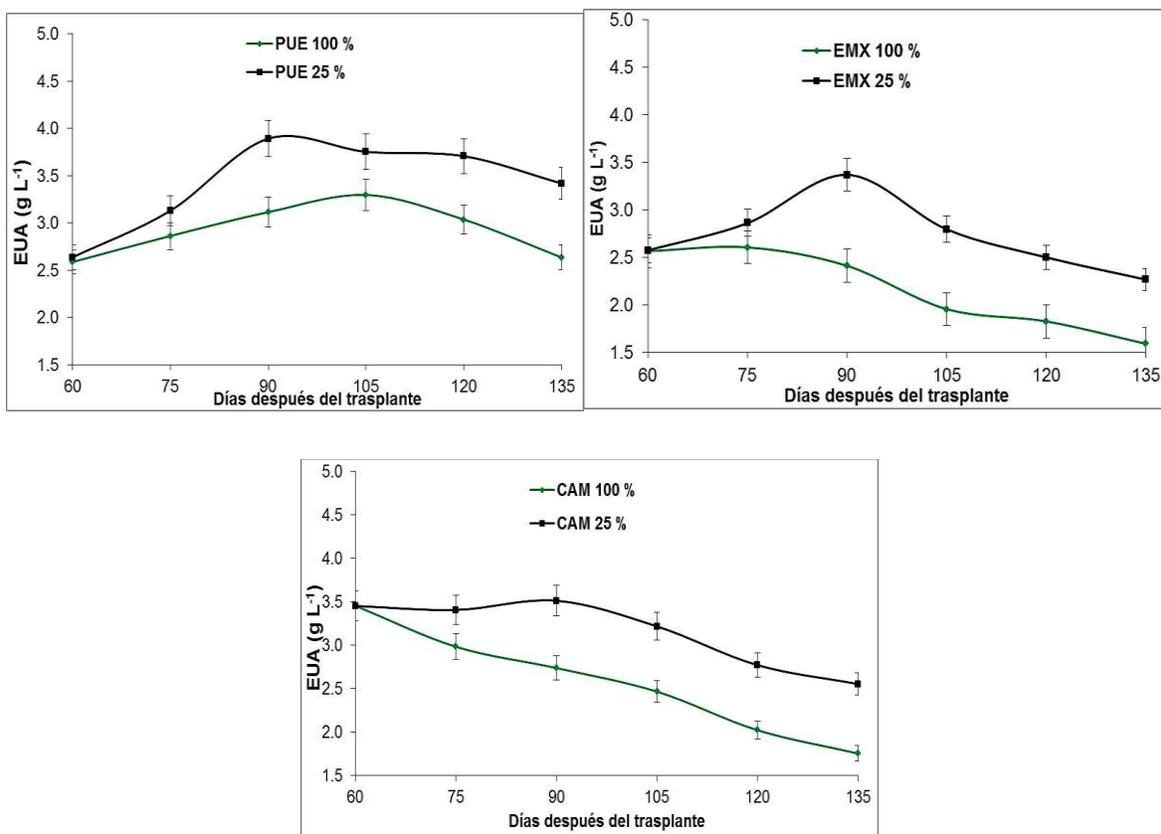


Figura 3. Eficiencia en uso de agua para producir biomasa (EUAb, en g de biomasa por litro de solución nutritiva consumida) de cinco variedades de tomate crecidas en invernadero con riego por goteo, bajo dos regímenes hídricos (100 y 25 % de 1.2 L d⁻¹ por planta). Las variedades son: El CID (HIB), Puebla (PUE), Oaxaca (OAX), Estado de México (EMX) y Campeche (CAM).

Figure 3. Water use efficiency to produce biomass (EUAb, in g of biomass per liter of nutrient solution consumed) of five tomato varieties grown in drip irrigated greenhouses under two water regimes (100 and 25 % of 1.2 L d⁻¹ per plant). The varieties are: El CID (HIB), Puebla (PUE), Oaxaca (OAX), State of Mexico (EMX) and Campeche (CAM).

Mediante valores de eficiencia en el uso del agua para producir fruto (EUAf) se encontró que en riego las variedades de tomate con mayor rendimiento y menor requerimiento de agua para producir 1 kg de fruto (Cuadro 4), fueron el HIB (27 L kg⁻¹) y la variedad OAX (29 L kg⁻¹) que presentaron valores similares a los 27 L kg⁻¹ reportados por Stanghellini (2005) para tomate crecido en invernadero en Almería. En Nigeria, Agele *et al.* (2011) estimaron que el tomate requiere de 9 a 13 L de agua para producir 1 kg de fruto, basados en tasas de evapotranspiración. En este estudio, la variedad nativa PUE tiene la menor EUAf (45 L kg⁻¹) debido a que el déficit hídrico-nutricional le redujo severamente el rendimiento de fruto. En contraste, el tomate nativo EMX incrementó en 25 % su EUAf al pasar de riego (39 L kg⁻¹) a sequía (30 L kg⁻¹); destaca que esta variedad fue también la menos afectada por el régimen de déficit hídrico-nutricional 25 % en tasa de fotosíntesis (Figura 2).

Cuadro 4. Eficiencia en el uso del agua para producir fruto (EUAF), en cuatro variedades nativas y un híbrido comercial de tomate expuestos a dos regímenes hídrico-nutricionales (100 y 25 % de 1.2 L d⁻¹ por planta), crecidas en condiciones de cultivo hidropónico en invernadero.

Table 4. Water use efficiency to produce fruit (EUAF), in four native varieties and one commercial tomato hybrid exposed to two water-nutrient regimes (100 and 25 % of 1.2 L d⁻¹ per plant), grown under greenhouse hydroponic culture conditions.

| Variedad | Regímenes de agua y nutrientes | |
|----------|--------------------------------|-----------------------|
| | Testigo | Tratamiento de estrés |
| HIB | 27 c | 34 bc |
| OAX | 29 c | 43 a |
| PUE | 32 bc | 47 a |
| EMX | 39 ab | 30 ab |
| CAM | 45 a | 33 bc |

4. Conclusiones

El déficit hídrico-nutricional de 75 % redujo el área foliar en todas las variedades de tomate estudiadas, en mayor grado al híbrido comercial local El Cid (39 % de pérdida) y en menor grado a la variedad nativa del estado de México (19 % de reducción). En biomasa total el estrés impuesto afectó en mayor proporción a la variedad nativa de Oaxaca con 30 % de pérdida, en contraste con la variedad nativa del Estado de México que tuvo la menor pérdida (12 %). La variedad nativa del Estado de México bajo estrés también destacó por tener una tasa fotosintética neta igual a las plantas sin estrés, lo que denota su tolerancia fisiológica a tal adversidad. Estos resultados muestran diversidad genética entre las variedades nativas de tomate en tolerancia a estrés hídrico y nutricional, diversidad que puede aprovecharse para formar nuevas variedades de tomate más tolerantes al estrés y más adaptadas a diversos sistemas de producción. Todos los tomates evaluados fueron más eficientes en el uso del agua cuando crecieron en déficit hídrico-nutricional que cuando recibieron la dotación completa de solución nutritiva, lo que indica que es posible ahorrar agua en el cultivo hidropónico del tomate. Además, la reducción del riego y nutrientes resultó ser una estrategia promisoriosa para mejorar el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua del tomate.

5. Referencias

AOAC 2012. Official Methods of Analysis. 19th Edition. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland, USA. 220p.

Agele, S.O., G.O. Iremiren & S.O. Ojeniyi, 2011. Evapotranspiration, water use efficiency and yield of rainfed and irrigated tomato. International Journal of Agriculture & Biology 13: 469–476. <https://bit.ly/3uOmsOr>

- Al Hassan M., M. Martínez F., F.J. Ramos S., O. Vicente, & M. Boscaiu. 2015. Effects of salt and water stress on plant growth and on accumulation of osmolytes and antioxidant compounds in cherry tomato. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 43(1): 1-11. <https://doi.org/10.15835/nbha4319793>
- Anuradha B., P. Saidaiah, H. Sudini, A. Geetha & K. R. Reddy 2018. Correlation and path coefficient analysis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7(5): 2748-2751. ISSN 2278-4136 <https://bit.ly/3DuvfLY>
- Aspiazú I., T. Sedyama, T., J.I. Rribeiro jr., A.A. Silva, G. Concenco, E.E. Ferreira, L. Galon, A.F. Silva, E.T. Borges, & W.F. Araujo. 2010. Water use efficiency of cassava plants under competition conditions. *Planta Daninha* 28(4):699-703. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000400001>
- Barlow E.W.R., R.E. Munns, & C.J. Brady. 1980. Drought responses of apical meristems. In: *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. N.C. Turner and P.J. Kramer (eds.). John Wiley & Sons, New York. Pp: 191-206.
- Barraza A., F.V. 2012. Acumulacion de materia seca del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. *Revista Temas Agrarios* 17(2):1-18. <https://doi.org/10.21897/rta.v17i2.699>
- Bista D. R., S. A. Heckathorn, D. M. Jayawardena, S. Mishra, & J. K. Boldt. 2018. Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and -tolerant grasses. *Plants (Basel)* 7(2):28. <https://doi.org/10.3390/plants7020028>
- Caspar C., K. Peng, M. Movahedi, J.A. Dunn, H.J. Walker, Y-K. Liang, D.H. McLachlan, S. Casson, J.C. Isner, I. Wilson, S.J. Neill, R. Hedrich, J.E. Gray, & A.M. Hetherington. 2015. Elevated CO₂-induced responses in stomata require ABA and ABA signaling. *Current Biology* 25 (20): 2709-2716. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.09.013>
- Cui J., G. Shao J. Lu, L. Keabetswe & G. Hoogenboom. 2020. Yield, quality and drought sensitivity of tomato to water deficit during different growth stages. *Scientia Agricola* 77 (2). <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0390>
- Deka D., A. K. Singh, & A. Singh, 2018. Effect of drought stress on crop plants with special reference to drought avoidance and tolerance mechanisms: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 7(9): 2703-2721. <https://doi.org/10.20546/ijcmas>
- Fang, Y. J. & L.Z. Xiong. 2015. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences* 72, 673-689. <http://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>
- Farooq M., A. Wahid, N. Kobayashi D. Fujita & S. M. A. Basra. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*. 29 (1):185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Fernández R. E. y F. Camacho. 2005. Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros* 86-89. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531987011>
- Flores J., W. Ojeda-Bustamante, I. López, A. Rojano e I. Salazar. 2007. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana* 25(2):127-134. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325204>
- Florido B. M. y F. L. Bao. 2014. Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales* 35(3):70-88. <https://bit.ly/3DCoasI>

- Grzesiak S., M.T. Grzesiak, T. Hura, I. Marcinska & A. Rzepka. 2013. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany* 88:2-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.01.010>
- Hatfield J.L. & C. Dold. 2019. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science* 10:103. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Kapoor D., S. Bhardwaj, M. Landi, A. Sharma, M. Ramakrishnan & A. Sharma. 2020. The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences* 10:1-19. doi: <https://doi.org/10.3390/app10165692>
- Klunklin W. & G. Savage. 2017. Effect on quality characteristics of tomatoes grown under well-watered and drought stress conditions. *Foods* 6(8):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods6080056>
- Lesk C., P. Rowhani & N. Ramankutty. 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* 529:84-87. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Liang G., J. Liu, J. Zhang, & J. Guo. 2019. Effects of drought stress on photosynthetic and physiological parameters of tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 145(1):12-17 DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS04725-19>
- Liu J, T. Hu, P. Feng, L. Wang, & S. Yang. 2019. Tomato yield and water use efficiency change with various soil moisture and potassium levels during different growth stages. *PLoS ONE* 14(3): e0213643. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213643>
- Lynch J., P. Marschner, & Z. Rengel. 2012. Effect of internal and external factors on root growth and development. In: Marschner P. (ed.). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. Academic Press, London. 643 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00013-3>
- Maldonado-Peralta R., P. Ramírez-Vallejo†, V.A. González Hernández, F. Castillo-González, M. Sandoval-Villa, M. Livera-Muñoz y N. Cruz-Huerta. 2016. Riqueza agronómica en colectas mexicanas de tomates nativos. *Agroproductividad* 12:68-75. <https://bit.ly/3J3lswp>
- Monge-Pérez J. E. 2014. Caracterización de 14 genotipos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 27(4):59-68. <https://doi.org/10.18845/tm.v27i4.2086>
- Morad H. A., M. A. Ebrahimzadeh & S. Beecham. 2009. The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region. *Agricultural Water Management* 96: 93-99. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.07.004>
- Nusrat A., A. Schwarzenberg, J-C. Yvin, A. H. Seyed. 2018. Regulatory role of silicon in mediating differential stress tolerance responses in two contrasting tomato genotypes under osmotic stress. *Frontiers in Plant Science* 9:1475. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01475>
- Ripoll J., L. Urban, B. Brunel, & N. Bertin. 2016. Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. *Journal of Plant Physiology* 190:26-35. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.006>
- Rouphael Y., M. Cardarelli, D. Schwarz, P. Franken & G. Colla. 2012. Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: *Plant Responses to Drought Stress*. Pp:171-198. http://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_7

- Salazar-Moreno R., A. Rojano-Aguilar, e I.L. López-Cruz. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencia del Agua* 5(2):177-183. <https://bit.ly/3DEOaj>
- Sánchez-Rodríguez E., L. Romero, J.M. Ruiz. 2016. Accumulation of free polyamines enhances the antioxidant response in fruits of grafted tomato plants under water stress. *Journal of Plant Physiology* 90:72-78. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.010>
- Shamim F., H. Athar, & A. Waheed. 2013. Role of osmolytes in degree of water stress tolerance in tomato. *Pakistan Journal of Phytopathology* 25(1):37-42. <https://bit.ly/3DCbZfu>
- Sibomana I. C., J. N. Aguyoh & A. M. Opiyo. 2013. Water stress affects growth and yield of container grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants. *Global Journal of Bio-Science and Biotechnology* 2(4):461-466. <https://bit.ly/3DEO3OT>
- Stanghellini, C. 2005. Irrigation water: use, efficiency and economics. In: *Improvement in Water Use Efficiency in Protected Crops*. Junta de Andalucía, Sevilla, España. pp. 23-33.
- Steiner A., A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15: 134-154. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01347224>
- Takács S., Z. Pék, D. Csányi, H.G. Daood, P. Szuvandzsiev, G. Palotás, & L. Helyes. 2020. Influence of water stress levels on the yield and lycopene content of tomato. *Water* 12:2165. <https://doi.org/10.3390/w12082165>
- Tembe K., G.N. Chemining'wa, J. Ambuko, & W. Owino W. 2017. Effect of water stress on yield and physiological traits among selected African tomato (*Solanum lycopersicum*) land races. *International Network for Natural Sciences – Research Journal* 10(1):78-85. <https://bit.ly/3LINC2S>
- Vásquez-Ortiz, R., J. C. Carrillo-Rodríguez y P. Ramírez-Vallejo. 2010. Evaluación morfo-agronómica de una muestra del jitomate nativo del centro y sureste de México. *Naturaleza y Desarrollo* 8(2): 49-64. <https://bit.ly/3LrjtR>
- Ximénez-Embún M.G., F. Ortego, & P. Castañera. 2016. Drought-stressed tomato plants trigger bottom-up effects on the invasive *Tetranychus evansi*. *PLoS ONE* 11(1): e0145275. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145275>
- Yang H, M.K. Shukla, X. Mao, S. Kang & T. Du. 2019. Interactive regimes of reduced irrigation and salt stress depressed tomato water use efficiency at leaf and plant scales by affecting leaf physiology and stem sap flow. *Frontiers in Plant Science* 10: 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00160>
- Yuan, X.K., Z.Q. Yang, Y.X. Li, Q. Liu, & W. Han. 2016. Effects of different levels of water stress on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of greenhouse tomato. *Photosynthetica* 54: 28–39. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0122-5>
- Zanne A. E., D. C. Tank, W. K. Cornwell, J. M. Eastman, S. A. Smith, R. G. FitzJohn, D. J. McGlenn, B. C. O'Meara, A. T. Moles, P. B. Reich, D. L. Royer, D. E. Soltis, P. F. Stevens, M. Westoby, I. J. Wright, L. Aarssen, R. I. Bertin, A. Calaminus, R. Govaerts, F. Hemmings, M. R. Leishman, J. Oleksyn, P. S. Soltis, N. G. Swenson, L. Warman & J. M. Beaulieu. 2014. Three keys to the radiation of angiosperms into freezing environments. *Nature* 506: 89-92. <https://doi.org/10.1038/nature12872>

- Zhang C. & Z. Huang. 2013. Effects of endogenous abscisic acid, jasmonic acid, polyamines, and polyamine oxidase activity in tomato seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae* 159:172-177. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.013>
- Zhao X., L. Kang, Q. Wang, C. Lin, W. Liu, W. Chen, T. Sang & J. Yan. 2021. Water use efficiency and stress tolerance of the potential energy crop *Miscanthus lutarioriparius* grown on the Loess Plateau of China. *Plants* 13,10(3):544. <https://doi.org/10.3390/plants10030544>
- Zlatev Z. & F. L. Cebola. 2012. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 24: 57-72. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v24i1.10599>

2022 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>