

Estudio del efecto de la sequía inducida por polietilenglicol en *Capsicum frutescens* en un sistema hidropónico

Study of the effect of drought induced by polyethylene glycol in *Capsicum frutescens* in a hydroponic system

—
Blanca Olivia Trejo-Paniagua¹ • d06270242@tuxtla.tecnm.mx
ORCID: 0009-0008-3617-149X

María Goretty Caamal-Chan² • goretty_caamal@hotmail.com
ORCID: 0000-0002-9351-4734

Rosa Isela Cruz-Rodríguez¹ • rosa.cr@tuxtla.tecnm.mx
ORCID: 0000-0002-4743-9112

Anayancy Lam-Gutiérrez • alam@cintalapa.tecnm.mx
ORCID: 0000-0001-9124-5721

Nancy Ruiz-Lau⁴ • nancy.rl@tuxtla.tecnm.mx*
ORCID: 0000-0002-5624-8561

1 TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO, CAMPUS TUXTLA. TUXTLA
GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MÉXICO

2 CONAHCyT/CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE
S.C. LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

3 TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO CAMPUS CINTALAPA. CINTALAPA,
CHIAPAS, MÉXICO

* Agradecimientos: Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT-México) por el apoyo otorgado a través de la beca 919744 para los estudios de doctorado de Trejo-Paniagua, B. O.



Para citar este artículo:

Trejo Paniagua, B. O., Caamal Chan, M. G., Cruz Rodríguez, R. I., Lam Gutiérrez, A., & Ruiz Lau, N. Estudio del efecto de la sequía inducida por polietilenglicol en *Capsicum frutescens* en un sistema hidropónico. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 12(34). <https://doi.org/10.31644/IMASD.34.2023.a03>

RESUMEN

La sequía es el factor más común que limita el desarrollo y productividad de los cultivos, afectando severamente a la agricultura. En México, uno de los cultivos de importancia económica y gastronómica sensible al estrés hídrico es el género *Capsicum*. En el presente estudio se evaluó la aplicación de prolina en plantas de *Capsicum frutescens* expuestas a sequía inducida por polietilenglicol (PEG) en un sistema hidropónico. Empleando un diseño factorial 2², se evaluaron un total de 60 plántulas durante 120 h divididas en cuatro tratamientos: PEG (0 y 10 %) y Pro (0 y 10 mM) como variables de estudio. Los resultados demostraron que la exposición a 10 mM de Pro indujo un aumento significativo en la concentración de clorofila y de prolina endógena (hoja y raíz) en las plántulas en ausencia de estrés. Además, se observó un 80 % de supervivencia de las plántulas y un aumento en el contenido de prolina en aquellas que estuvieron expuestas a 10 mM Pro + 10 % PEG. De igual manera, se presentó un aumento en el contenido de clorofila (13 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), contenido relativo de agua (CRA) en raíz (77.6 %), porcentaje de electrolitos en hoja y raíz (~44 y ~52 % respectivamente), en comparación con el tratamiento de 0 mM Pro + 10 % PEG. Los resultados sugieren que la aplicación previa de prolina tiene un efecto positivo en la supervivencia de las plántulas bajo condiciones de sequía inducida por PEG.

Palabras clave:

Sequía; Capsicum frutescens; tolerancia; supervivencia.

— Abstract—

Drought is the most common factor limiting crops development and productivity, severely affecting agriculture. In Mexico, one of the crops of economic and gastronomically important sensitive to water stress is the *Capsicum* genus. In the present study, the application of proline on *Capsicum frutescens* plants exposed to drought induced by polyethylene glycol (PEG) in hydroponic system was evaluated. Using a 22 factorial design, a total of 60 seedlings were evaluated for 120 hours divided into four treatments: PEG (0 and 10 %) and Pro (0 and 10 mM) as study variable. The results showed that exposure to 10 mM of Pro induced a significant increase in the chlorophyll concentration and endogenous proline (leaf and root) in seedlings in the absence of stress. In addition, 80 % survived of seedlings and an increase in proline content was observed in those exposed to 10 mM Pro + 10 % PEG. Similarly, there was an increase in chlorophyll content ($13 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), relative water content (RWC) in the root (77.6 %), percentage of electrolytes in leaf and root (~44 and ~52 % respectively) compared to the treatment of 0 mM Pro + 10 % PEG. These results suggest that pre-application of proline has a positive effect on seedlings survival under PEG induced drought conditions.

Keywords:

Drought; Capsicum frutescens; tolerance; survival.

La sequía se considera el principal estrés que afecta el crecimiento y la productividad de los cultivos agrícolas, y se estima que las pérdidas económicas superan las causadas por otros tipos de estrés abiótico, lamentablemente, debido al cambio climático se esperan condiciones más extremas en los próximos años (dos Santos *et al.*, 2022). Uno de los cultivos afectados de gran importancia debido a la amplia variedad de aplicaciones culinarias y económicas es el chile. El género *Capsicum* pertenece a la familia Solanaceae y es nativo de América tropical y subtropical. Hasta el 2019 se han identificado 40 especies, de las cuales cinco son de gran relevancia económica (*C. annum*, *C. chinense*, *C. baccatum*, *C. frutescens* y *C. pubescens*) y han sido domesticadas o semidomesticadas según la región en la que se cultivan. No obstante, experimenta un impacto significativo en su producción debido al estrés hídrico durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo, lo que limita su desarrollo y productividad (Tripodi & Kumar, 2019; Toppino *et al.*, 2021). Los efectos del déficit hídrico en las plantas dependen de su etapa de desarrollo, el tiempo de exposición, la especie y el grado de severidad, lo que conduce a alteraciones metabólicas como la reducción en la síntesis de pigmentos fotosintéticos, pérdida de turgencia, aumento en las especies reactivas de oxígeno, entre otros (Jalil & Ansari, 2020; Taiwo *et al.*, 2020). Actualmente, México es el cuarto productor a nivel mundial de chile fresco y se cultivan las cinco principales especies de importancia económica (Food and Agriculture Organization [FAOSTAT], 2023). Además, que en el territorio se encuentran presentes alrededor de 25 especies silvestres o semidomesticadas, una de ellas es *C. frutescens*, distribuida en el sureste del país (la Cruz-Lázaro *et al.*, 2017) el acervo genético de especies semidomesticadas ofrece la oportunidad de utilizarlo como modelos únicos de estudio para el fitomejoramiento de los cultivos. En los últimos años se ha llevado a cabo diversas investigaciones para mitigar los efectos del estrés hídrico y mejorar la tolerancia de las plantas. La aplicación exógena de bioestimulantes para aumentar el rendimiento y minimizar los efectos del estrés medioambiental es una de las estrategias más prometedoras (Sahoo *et al.*, 2019). El aminoácido prolina (Pro) es considerado como una de las moléculas de señalización más importantes, además de participar como osmoprotector al presentar correlación positiva entre la acumulación de prolina y la tolerancia al estrés (Elewa *et al.*, 2017; Suekawa *et al.*, 2019). No obstante, la aplicación de prolina exógena en diversos cultivos agrícolas bajo condiciones de sequía redujo las afectaciones y aumentó su tolerancia (Elewa *et al.*, 2017; Farooq *et al.*, 2017; Alkahtani *et al.*, 2021). Sin embargo, la respuesta de las plantas varía en función de los genotipos, la gravedad y el alcance de la sequía. Por lo tanto, en este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de prolina y la sequía inducida por polietilenglicol (PEG) en plántulas de chile (*C. frutescens*) semidomesticadas en un sistema hidropónico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Las semillas de chile se germinaron en semilleros de poliestireno con una mezcla de turba (Peat moss®) y agrolita (Termolita® Hortiperl) en una proporción de 3:1 v/v. Después de 30 días de la germinación, las plántulas se trasplantaron a un sistema hidropónico con solución Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950) durante 3 días bajo aireación constante para su adaptación (de Freitas *et al.*, 2019), con un fotoperiodo de 16/8 h luz/oscuridad, a una temperatura media de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. La solución de Hoagland contiene $50 \mu\text{M}$ de CaCl_2 (Sigma Aldrich®), $12.5 \mu\text{M}$ de H_3BO_3 (Sigma Aldrich®), 1 mM MnSO_4 (Sigma Aldrich®), $1 \mu\text{M}$ de ZnSO_4 (Sigma Aldrich®), $0.5 \mu\text{M}$ de CuSO_4 (Sigma Aldrich®), $0.1 \mu\text{M}$ $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_3\text{O}_{24}$ (Sigma Aldrich®), $0.1 \mu\text{M}$ de NiCl (Sigma Aldrich®), $10 \mu\text{M}$ Fe-EDTA (Sigma Aldrich®), 1.2 mM de KNO_3 (Sigma Aldrich®), 0.8 mM de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Sigma Aldrich®), 0.2 mM de KH_2PO_4 (Sigma Aldrich®), y 0.2 mM de MgSO_4 (Sigma Aldrich®).

2.2 Estrés hídrico inducido por polietilenglicol

El experimento se realizó utilizando un diseño factorial 2^2 para analizar el efecto de la prolina y la sequía inducida por polietilenglicol (PEG-8000 Sigma Aldrich®) en plántulas de chile. Se evaluó un total de 60 plántulas distribuidas en cuatro tratamientos. Después de la aclimatación de las plantas de chile se les aplicó un tratamiento con prolina durante 48 h, la cual se realizó mediante la suplementación de la solución de Hoagland en el cultivo hidropónico, utilizando concentraciones de 0 y 10 mM de prolina (Sigma Aldrich®).

Posteriormente, las plántulas fueron expuestas a 0 y 10 % PEG durante 120 h.

Al finalizar la exposición a estrés por sequía, se evaluó el porcentaje de supervivencia, contenido relativo de agua (CRA), cuantificación de electrolitos, contenido de clorofila y prolina endógena para cada uno de los tratamientos.

2.3. Tasa de supervivencia

La tasa de supervivencia de las plántulas de chile se determinó calculando el porcentaje de plantas vivas al final de la fase experimental en relación al número de plantas vivas al inicio, utilizando la ecuación (2), propuesta por Linares (como se citó en Peñalba, 2022).

$$\% \text{ de supervivencia} = \frac{P_v}{P_v + P_m} * 100 \quad (2)$$

Donde:

P_v = Plantas vivas

P_m = Plantas muertas

2.4. Contenido relativo de agua (CRA)

Para evaluar el CRA de hojas y raíces se determinó el peso fresco (P_f) de las plántulas después de la colecta. Posteriormente, se secaron a 65 °C en un desecador Hamilton Beach® de aire caliente durante 48 h para obtener el peso seco constante (P_s). Se utilizó la ecuación (1) descrita por Jothimani & Arulbalachandran, (2020).

$$\% \text{ CRA} = \frac{P_f - P_s}{P_f} * 100 \quad (1)$$

Donde:

% CRA = Contenido relativo de agua

P_f = Peso fresco del tejido vegetal

P_s = Peso seco del tejido vegetal

2.5. Cuantificación de electrolitos

Para evaluar el porcentaje de fuga de electrolitos se siguió la metodología descrita por Restrepo *et al.* (2013), con algunas modificaciones. Se colocaron discos del material vegetal fresco en tubos de ensayo con agua tridestilada. Se midió la conductividad inicial (CE_1), utilizando una sonda de conductividad CON-BTA (Vernier®), después de 2 h de incubación a temperatura ambiente (30±2 °C). Posteriormente, las muestras se incubaron a 120 °C durante 20 min, y se midió la conductividad final (CE_2). El porcentaje de electrolitos liberados se calculó utilizando la ecuación (3).

$$\% \text{ electrolitos} = \frac{CE_1}{CE_2} * 100 \quad (3)$$

2.6. Contenido de clorofila

Se determinó el contenido de clorofila total, utilizando el método de Inskeep & Bloom (1985) con modificaciones. Se maceraron 50 mg de hoja fresca con acetona (MEYER®) al 80 % y se incubaron a 4 °C durante 60 min, después se centrifugó a 10,000 rpm por 5 min. La cuantificación de clorofila total se

realizó por la técnica de espectrofotometría de UV-Visible, utilizando un espectrofotómetro marca HACH®, DR modelo 5000, a las longitudes de onda (λ) de 664 y 647 nm, utilizando la ecuación (4).

$$\text{Clorofila total } (\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}) = 17.95A_{647} + 7.90A_{664} \quad (4)$$

2.7. Determinación del contenido de prolina endógena en hoja y raíz

Se utilizó el protocolo de Escalante-Magaña (2020) para extraer y cuantificar la prolina endógena en muestras de hoja y raíz. La reacción se llevó a cabo con ninhidrina ácida (Sigma Aldrich®) y ácido acético glacial (MEYER®), y las muestras se incubaron a 96 °C durante 60 min. Posteriormente, se extrajo la fase orgánica con tolueno (MEYER®) y se cuantificó la cantidad de prolina mediante espectrofotometría a λ de 520 nm, utilizando la ecuación (5).

$$\mu\text{moles de prolina} \cdot \text{g}^{-1} = \left(\frac{(\mu\text{g de prolina} \cdot \text{mL}^{-1})(\text{mL de tolueno})}{\frac{115.5 \mu\text{g} \cdot \mu\text{mol}^{-1}}{\frac{\text{g muestra}}{5}}} \right) \quad (5)$$

2.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se evaluaron utilizando un análisis de varianza (ANOVA) unidireccional y la comparación de medias se realizó por la prueba de LSD ($P \leq 0.05$), a través del software Statgraphics Centurion XIX® (Statgraphics Technologies, Inc., Madrid, España).

3. RESULTADOS

Para determinar el efecto de la aplicación de prolina en plántulas de chile (*C. frutescens*) de 35 días posterior a la germinación, se sometieron a estrés hídrico inducido por PEG-8000 al 10 % durante 120 h. Los resultados indican que la exposición a 10 mM de Pro mejoró significativamente la capacidad de supervivencia alcanzando un valor del 80 % en las plántulas tratadas previamente con prolina (Tabla 1), comparado con un 40 % en aquellas sin tratar.

3.1. Contenido de clorofila

Las plántulas de chile tratadas previamente con prolina presentaron un mayor contenido de clorofila, en comparación con el tratamiento control en ausencia de estrés (Tabla 2). Por otro lado, al exponer las plántulas al estrés

por sequía inducido por PEG, se observó que el tratamiento con 10 mM Pro + 10 % PEG tuvo un mayor contenido de clorofila total que el tratamiento con 0 mM Pro + 10 % PEG, el cual mostró una disminución significativa debido a los efectos de la sequía.

3.2. Contenido relativo de agua (CRA)

Se observó que el CRA, tanto en la parte aérea como el sistema radicular, de las plántulas de chile disminuyó significativamente bajo condiciones de sequía (Tabla 3), en comparación con el control (sin PEG). No obstante, las plántulas tratadas previamente con prolina y expuestas a PEG presentaron un CRA significativamente mayor en el sistema radicular, en comparación con las plántulas sin tratamiento previo de prolina. Estos resultados sugieren que la aplicación de prolina podría haber ayudado a mantener la hidratación en las raíces durante la sequía.

3.3. Porcentaje de fuga de electrolitos

La exposición a sequía inducida por PEG aumentó significativamente la fuga de electrolitos en los tejidos de las hojas y raíz en plántulas de chile (*C. frutescens*) (Tabla 4), con respecto al control. No obstante, el tratamiento previo con prolina redujo la pérdida de electrolitos en ambos tejidos, en comparación con el tratamiento 0 mM Pro + 10 % PEG.

3.4. Contenido de prolina endógena

Los valores obtenidos indican que el contenido de prolina endógena en las hojas y raíces de las plántulas de *C. frutescens* aumentó significativamente en respuesta al tratamiento con PEG al 10 %, en comparación con los tratamientos en ausencia de estrés (Tabla 5). Esto sugiere que las plantas expuestas a la sequía inducida por el PEG aumentaron la síntesis de prolina como una respuesta de defensa al estrés hídrico. Además, se observó una diferencia significativa en la concentración de prolina endógena en las hojas y raíces de las plántulas de *C. frutescens* tratadas con prolina exógena. Es importante destacar que las plántulas, previamente tratadas con prolina exógena y posteriormente expuestas a estrés, presentaron el mayor contenido de prolina endógena.

4. DISCUSIÓN

El estrés por sequía redujo la tasa de supervivencia de las plántulas de chile, el contenido relativo de agua en los tejidos de hoja y raíz, clorofila total, así como un aumento en el porcentaje de fuga de electrolitos y el contenido de

prolina endógena en ambos tejidos. Esto se debe a que el potencial hídrico y la turgencia de la planta se reducen significativamente, lo que puede interferir con las funciones metabólicas de las plantas (Pandey *et al.*, 2019; Abobatta, 2020).

Jothimani y Arulbalachandran (2020) reportaron que el déficit hídrico inducido por PEG al 20 % en cultivo de tomate afecta críticamente la fotosíntesis, debido al incremento de especies reactivas de oxígeno (EOR), alterando el contenido de clorofila total, y daño en las membranas celulares. Mientras que Restrepo *et al.* (2013) demostraron que la pérdida de electrolitos puede indicar la integridad de las membranas celulares, y que las afectaciones se deben, principalmente, a la peroxidación de lípidos bajo condiciones de estrés, debido a las EOR que actúan sobre los radicales libres de los lípidos que conforman las membranas celulares en plantas de maíz expuestas a estrés abiótico.

A pesar de que los efectos de la sequía inducida por PEG al 10 % en *C. frutescens* fueron negativos, en las plántulas a las cuales se les aplicó un tratamiento previo con prolina a la concentración de 10 mM se observó una disminución en el impacto negativo del estrés. Esto conllevó a un aumento significativo en la tasa de supervivencia, el CRA del sistema radicular, y un decremento en el porcentaje de fuga de electrolitos, lo que sugiere que se mantuvo la integridad de la membrana celular, y la eficiencia de la fotosíntesis al presentar un incremento en el contenido de clorofila total, en comparación con las plantas no tratadas.

La prolina es considerada un aminoácido multifuncional bajo condiciones de estrés. Su acumulación en altas concentraciones está relacionada con la capacidad de brindar protección y participar en diversos procesos celulares, como la regulación osmótica, energética, disponibilidad de nutrientes y cambios en el equilibrio redox. La acumulación de este aminoácido bajo condiciones de deshidratación, como las plántulas expuestas a PEG, se debe a que el anabolismo de la Pro, principalmente en las hojas, se activa y el catabolismo es reprimido (Abobatta, 2020; Alvarez *et al.*, 2022; Hosseinifard *et al.*, 2022).

Es probable que la aplicación previa de prolina exógena en las plántulas de chile expuestas a sequía pudo haber activado mecanismos fisiológicos y bioquímicos que mejoraron su capacidad de tolerancia al estrés inducido por PEG, que permitieron un aumento en el contenido de clorofila, reducción de la fuga de electrolitos y mayor porcentaje de supervivencia. Semida *et al.* (2020) reportan un aumento de la clorofila en plantas de cebolla tratadas con prolina (1 – 2 mM) de manera foliar, indicando que uno de los mecanismos que puede estar relacionado con el aumento se debe a la protección de la estructura y función de los fotosistemas. Además, la prolina también puede actuar como un antioxidante, protegiendo las células de las especies reactivas de oxígeno al reducir el

daño en la membrana celular de los cloroplastos y la degradación de la clorofila (Ashraf *et al.*, 2018; Merwad *et al.*, 2018; Cha-um *et al.*, 2019).

Con respecto a la disminución en el porcentaje de fuga de electrolitos y el aumento en la concentración de prolina endógena, Farooq *et al.* (2017) reportaron que la aplicación foliar de osmoprotectores (prolina, ácido gamma-aminobutírico) en trigo redujo la peroxidación de lípidos de las membranas celulares, permitiendo una mayor estabilidad en la integridad de las membranas celulares; y que la prolina, aplicada exógenamente, mejoró el contenido de prolina endógena, bajo condiciones de estrés por sequía podría estar relacionado a un incremento en el contenido de los precursores de la prolina (ornitina, ácido glutámico y arginina).

CONCLUSIÓN

La aplicación previa de prolina exógena a una concentración de 10 mM tiene un efecto positivo en el porcentaje de supervivencia, electrolitos, contenido relativo de agua, clorofila y prolina en plantas de chile (*C. frutescens* expuestas a 10 % PEG en condiciones *in vitro*). Estos hallazgos podrían sentar las bases para investigar diferentes concentraciones de prolina y establecer la concentración óptima para mejorar el porcentaje de supervivencia en cultivo hidropónico bajo condiciones de estrés por sequía.

REFERENCIAS

- Abobatta**, W. F. (2020). *Plant Responses and Tolerance to Combined Salt and Drought Stress*. 17–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40277-8_2
- Alkahtani**, M. D. F., Hafez, Y. M., Attia, K., Rashwan, E., Husnain, L. Al, Algwaiz, H. I. M., & Abdelaal, K. A. A. (2021). Evaluation of Silicon and Proline Application on the Oxidative Machinery in Drought-Stressed Sugar Beet. *Antioxidants* 2021, Vol. 10, Page 398, 10(3), 398. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX10030398>
- Alvarez**, M. E., Savouré, A., & Szabados, L. (2022). Proline metabolism as regulatory hub. *Trends in Plant Science*, 27(1), 39–55. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2021.07.009>
- Ashraf**, M. A., Iqbal, M., Rasheed, R., Hussain, I., Perveen, S., & Mahmood, S. (2018). Dynamic Proline Metabolism: Importance and Regulation in Water-Limited Environments. *Plant Metabolites and Regulation under Environmental Stress*, 323–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812689-9.00016-9>
- Cha-um**, S., Rai, V., & Takabe, T. (2019). Proline, Glycinebetaine, and Trehalose Uptake and Inter-Organ Transport in Plants Under Stress. *Osmoprotectant-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants*, 201–223. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27423-8_9
- de Freitas**, P. A. F., de Carvalho, H. H., Costa, J. H., Miranda, R. de S., Saraiva, K. D. da C., de Oliveira, F. D. B., Coelho, D. G., Prisco, J. T., & Gomes-Filho, E. (2019). Salt acclimation in sorghum plants by exogenous proline: physiological and biochemical changes and regulation of proline metabolism. *Plant Cell Reports*, 38(3), 403–416. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02382-5>
- dos Santos**, T. B., Ribas, A. F., de Souza, S. G. H., Budzinski, I. G. F., & Domingues, D. S. (2022). Physiological Responses to Drought, Salinity, and Heat Stress in Plants: A Review. *Stresses*, 2(1), 113–135. <https://doi.org/10.3390/stresses2010009>
- Elewa**, T. A., Sadak, M. S., & Saad, A. M. (2017). Proline treatment improves physiological responses in quinoa plants under drought stress. *Bioscience Research*, 14(1), 21–33.
- Escalante-Magaña**, C. A. (2020). *Efecto del estrés salino (NaCl) sobre el metabolismo de la prolina (Pro) y el papel de este aa suplementado de manera exógena en plantas de chile habanero (Capsicum chinense Jacq.)* [Tesis que presenta Camilo Andrés Escalante Magaña, en opción al título de Doctorado en Ciencias (Ciencias Biológicas: Opción Bioquímica y Biología Molecular)] Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.
- Food and Agriculture Organization**, FAOSTAT. (Retrieved April 24, 2023). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

- Farooq, M., Nawaz, A., Chaudhry, M. A. M., Indrasti, R., & Rehman, A.** (2017). Improving resistance against terminal drought in bread wheat by exogenous application of proline and gamma-aminobutyric acid. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6), 464–472. <https://doi.org/10.1111/JAC.12222>
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I.** (1950). Preparing the nutrient solution. *The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil*, 347, 29–31.
- Hosseini-fard, M., Stefaniak, S., Javid, M. G., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M.** (2022). Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 5186, 23(9), 5186. <https://doi.org/10.3390/IJMS23095186>
- Inskeep, W. P., & Bloom, P. R.** (1985). Extinction Coefficients of Chlorophyll a and b in N, N-Dimethylformamide and 80% Acetone. *Plant Physiology*, 77(2), 483–485. <https://doi.org/10.1104/pp.77.2.483>
- Jalil, S. U., & Ansari, M. I.** (2020). Stress implications and crop productivity. *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I: General Consequences and Plant Responses*, 73–86. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2156-0_3
- Jothimani, K., & Arulbalachandran, D.** (2020). Physiological and biochemical studies of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) under polyethylene glycol induced drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29(June), 101777. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101777>
- la Cruz-Lázaro, D., Efraín de la Cruz-Lázaro, M., Márquez-Quiroz, C., Osorio-Osorio, R., Preciado-Rangel, P., y Márquez-Hernández, C.** (2017). Caracterización morfológica in situ de chile silvestre pico de paloma (*Capsicum frutescens*) en Tabasco, México. *Acta Universitaria*, 27(2), 10–16. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1083>
- Merwad, A. R. M. A., Desoky, E. S. M., & Rady, M. M.** (2018). Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Scientia Horticulturae*, 228, 132–144. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2017.10.008>
- Pandey, A. K., Ghosh, A., Rai, K., Fatima, A., Agrawal, M., & Agrawal, S. B.** (2019). Abiotic Stress in Plants. *Approaches for Enhancing Abiotic Stress Tolerance in Plants*, 1–46. <https://doi.org/10.1201/9781351104722>
- Peñalba, D.** (2022). *Recursos Naturales y Ambiente* 41(22), 78–84. <https://orcid.org/0000-0002-0407-3712/>
- Restrepo, H., Gómez, M. I., Garzón, A., Alzate, F. y López, J.** (2013). Respuesta bioquímica de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) a diferentes condiciones de temperaturas nocturnas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2), 252–262.

- Sahoo, S., Borgohain, P., Saha, B., Moulick, D., Tanti, B., & Panda, S. K. (2019).** Seed Priming and Seedling Pre-treatment Induced Tolerance to Drought and Salt Stress: Recent Advances. *Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings*, 253–263. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1_12
- Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Rady, M. O. A., Marey, R. A., & Abd El-Mageed, T. A. (2020).** Exogenously applied proline enhances growth and productivity of drought stressed onion by improving photosynthetic efficiency, water use efficiency and up-regulating osmoprotectants. *Scientia Horticulturae*, 272, 109580. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109580>
- Suekawa, M., Fujikawa, Y., & Esaka, M. (2019).** Exogenous proline has favorable effects on growth and browning suppression in rice but not in tobacco. *Plant Physiology and Biochemistry*, 142, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.06.032>
- Taiwo, A. F., Daramola, O., Sow, M., & Semwal, V. K. (2020).** Ecophysiology and responses of plants under drought. *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I: General Consequences and Plant Responses*, 231–268. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0_8
- Toppino, L., Prohens, J., Rotino, G. L., Plazas, M., Parisi, M., Carrizo García, C., & Tripodi, P. (2021).** *Pepper and Eggplant Genetic Resources*. 119–154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30343-3_6
- Tripodi, P., & Kumar, S. (2019).** *The Capsicum Crop: An Introduction*. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97217-6_1

Tabla 1
Efecto de la aplicación de prolina en *Capsicum frutescens* bajo sequía por PEG

Tratamientos		% Supervivencia
% PEG	[mM Pro]	
0	0	100 ^{Aa}
	10	100 ^{Aa}
10	0	40 ^{Bc}
	10	80 ^{Ab}

Nota. Letras mayúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa dentro de un mismo tratamiento (% PEG); mientras que, letras minúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa entre tratamientos LSD ($P \leq 0.05$)

Tabla 2
Contenido de clorofila total en *Capsicum frutescens* expuestas a sequía

Tratamientos		Clorofila ($\mu\text{g/mL}$)
% PEG	[mM Pro]	
0	0	19.03 ^{Bb} \pm 1.4
	10	28.96 ^{Aa} \pm 2.1
10	0	6.05 ^{Bd} \pm 1.7
	10	13.14 ^{Ac} \pm 2.9

Nota. Letras mayúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa dentro de un mismo tratamiento (% PEG); mientras que, letras minúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa entre tratamientos LSD ($P \leq 0.05$)

Tabla 3
Contenido relativo de agua (CRA) en plántulas de *Capsicum frutescens* bajo condiciones de sequía

Tratamientos		% parte aérea	% sistema radicular
% PEG	[mM Pro]		
0	0	86.80 ^{Aa} \pm 1.3	85.32 ^{Aa} \pm 1.2
	10	85.95 ^{Aa} \pm 0.9	85.34 ^{Aa} \pm 1.6
10	0	80.46 ^{Ab} \pm 5.2	55.90 ^{Bc} \pm 2.6
	10	82.44 ^{Ab} \pm 1.4	77.63 ^{Ab} \pm 2.6

Nota. Letras mayúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa dentro de un mismo tratamiento (% PEG); mientras que, letras minúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa entre tratamientos LSD ($P \leq 0.05$)

Tabla 4

Porcentaje de fuga de electrolitos en plántulas de Capsicum frutescens expuestas a sequía

Tratamientos		% parte aérea	% sistema radicular
% PEG	[mM Pro]		
0	0	14.87 ^{Ac} ±2.6	31.16 ^{Ac} ±2.4
	10	12.31 ^{Ac} ±1.1	30.88 ^{Ac} ±1.1
10	0	58.47 ^{Aa} ±0.9	72.96 ^{Aa} ±3.9
	10	43.91 ^{Bb} ±3.0	51.81 ^{Bb} ±3.6

Nota. Letras mayúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa dentro de un mismo tratamiento (% PEG); mientras que, letras minúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa entre tratamientos LSD ($P \leq 0.05$)

Tabla 5

Contenido de prolina endógena en plántulas de Capsicum frutescens expuestas a sequía

Tratamientos		Hoja (μ moles Pro-gPF/mL)	Raíz (μ moles Pro-gPF/mL)
% PEG	[mM Pro]		
0	0	33.52 ^{Bd} ±1.4	29.77 ^{Bd} ±4.9
	10	57.06 ^{Ac} ±3.2	37.16 ^{Ac} ±2.6
10	0	168.87 ^{Bb} ±2.3	99.17 ^{Bb} ±3.1
	10	212.38 ^{Aa} ±11.8	129.03 ^{Aa} ±4.5

Nota. Letras mayúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa dentro de un mismo tratamiento (% PEG); mientras que, letras minúsculas distintas indican una diferencia estadística significativa entre tratamientos LSD ($P \leq 0.05$)