



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**



**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA**

**COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

# **LUZ, CO<sub>2</sub> y TEMPERATURA EN PLÁNTULA DE JITOMATE MODIFICAN EL NÚMERO DE FLORES EN LAS PRIMERAS TRES INFLORESCENCIAS**



**TESIS**

**Que como requisito parcial para  
obtener el grado de:**

**APROBADA**

**DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**



**Presenta:**

**FRANCISCA DE LOS ÁNGELES MEJÍA BETANCOURT**

**Bajo la dirección del Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez**



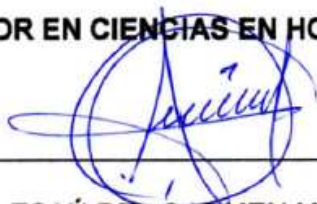
**Chapingo, Estado de México, diciembre de 2024**

# LUZ, CO<sub>2</sub> Y TEMPERATURA EN PLÁNTULA DE JITOMATE MODIFICAN EL NÚMERO DE FLORES EN LAS PRIMERAS TRES INFLORESCENCIAS

Tesis realizada por **Francisca de los Ángeles Mejía Betancourt**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

DIRECTOR:



DR. ESAÚ DEL CARMEN MORENO PÉREZ

ASESOR:



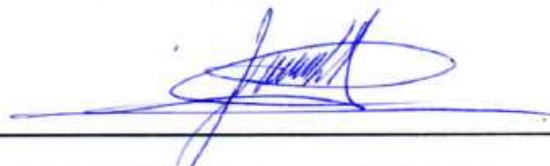
DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



DRA. MARÍA TERESA BERYL COLINAS Y LEÓN

ASESOR:



DR. J. JESÚS MAGDALENO VILLAR

LECTOR EXTERNO:



DRA. LUCILA GONZÁLEZ MOLINA

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
DEDICATORIA .....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS .....	xi
RESUMEN GENERAL.....	12
GENERAL ABSTRACT .....	13
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	14
1.1 Literatura citada .....	18
CAPITULO II. ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO EN PLÁNTULA DE JITOMATE PARA INCREMENTAR EL NÚMERO DE FLORES Y FRUTOS POR PLANTA.....	22
2.1. RESUMEN.....	285
2.3. INTRODUCCIÓN.....	285
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	286
2.4.1. Ubicación del estudio y material vegetal.....	286
2.4.2. Establecimiento del experimento .....	286
2.4.3. Tratamientos y diseño experimental .....	286
2.4.4. Manejo de las plántulas.....	287
2.4.5. Variables evaluadas .....	288
2.4.6. Análisis estadístico.....	289

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	289
2.5.1. Variables fisiológicas.....	289
2.5.2. Variables morfológicas y peso seco.....	289
2.5.3. Rendimiento y sus componentes .....	290
CONCLUSIONES .....	291
2.6. AGRADECIMIENTOS.....	291
2.7. BIBLIOGRAFÍA .....	291
CAPITULO III. RHIZOSPHERE TEMPERATURE MODIFIES TOMATO SEEDLING GROWTH AND FLOWERING .....	23
3.1. Abstract.....	24
3.2. Introduction .....	24
3.3. Materials and Methods .....	25
3.3.1. Study site.....	25
3.3.2. Treatments and experimental design.....	25
3.3.3. Experimental conditions .....	26
3.3.4. Evaluated variables .....	26
3.3.5. Agronomic management after transplanting .....	26
3.3.6. Statistical analysis .....	27
3.4. Results and discussion.....	27
3.5. Conclusions .....	31
3.6. Authors' Contributions .....	31
3.7. Ethical approval (for researches involving animals or humans).....	31
3.8. Acknowledgements.....	31
3.9. Conflict of Interests.....	31
3.10. References .....	31

CAPITULO IV. LUZ SUPLEMENTARIA Y TEMPERATURA NOCTURNAS MODIFICAN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS Y LA PRODUCCIÓN DE FLORES Y FRUTOS DE JITOMATE .....	34
4.1. RESUMEN.....	35
4.2. SUMMARY .....	36
4.3. INTRODUCCIÓN.....	36
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
4.4.1. Localización y condiciones del experimento .....	39
4.4.2. Material vegetal .....	40
4.4.3. Siembra y manejo de las plántulas .....	40
4.4.4. Trasplante y manejo del cultivo .....	40
4.4.5. Diseño experimental y tratamientos .....	41
4.4.5. Variables evaluadas.....	42
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	43
4.6. CONCLUSIONES.....	50
4.7. LITERATURA CITADA.....	50
CONCLUSIONES GENERALES.....	55

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Temperatura y humedad relativa mínima y máxima en diferentes tratamientos de CO <sub>2</sub> aplicados en plántulas de tomate. ....	289
Cuadro 2. Comparación de medias entre tratamientos de variables fisiológicas evaluadas en plántulas de tomate cultivar Paipai. ....	289
Cuadro 3. Comparación de medias entre tratamientos de variables de crecimiento evaluadas en plántulas de tomate cultivar Paipai. ....	290
Cuadro 4. Comparación de medias de tratamientos de variables del rendimiento y sus componentes evaluadas en plantas de tomate variedad Paipai. ....	290
Table 1. Comparison of means of growth variables in 34 days old tomato seedlings of the varieties ‘Condor’ and ‘Cedral’, cultivated with different temperatures in the root zone.....	27
Table 2. Comparison of treatment means of growth variables evaluated at the beginning of harvest in the tomato varieties ‘Condor’ and ‘Cedral’.....	29
Table 3. Comparison of treatment means of the variables of yield and its components evaluated in tomato plants of the varieties ‘Condor’ and ‘Cedral’.	30
Cuadro 1. Comparación de medias de variables de crecimiento en plántulas de jitomate de 35 días de edad manejadas bajo dos condiciones de luz suplementaria y tres temperaturas nocturnas .....	45
Cuadro 2. Comparación de medias de variables en hojas de plántulas de jitomate de 35 días de edad manejadas bajo dos condiciones de luz suplementaria y tres temperaturas nocturnas.....	46
Cuadro 3. Comparación de medias entre tratamientos de variables del rendimiento y sus componentes evaluadas en planta de jitomate variedad Ramses.....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la cámara de crecimiento: dimensiones y equipamiento. .....	287
Figura 2. Cámaras de crecimiento al interior del invernadero. a) Tratamiento 1, b) tratamiento 2, c) tratamiento 3.....	288
Figure 1. Effect of seedling rhizosphere temperature on stem dry weight (a), leaf dry weight (b), root dry weight(c) and total dry weight (d) of two tomato varieties 34 days after sowing. Vertical bars with the same letter(s) for each variety are not significantly different (Tukey, $P \leq 0.05$ )..	288
Figure 1. Interacción entre condición de luz suplementaria y temperatura nocturna para altura de plántula (a) y concentración de clorofila total (b) en plántulas de jitomate, 35 días después de la siembra.....	48

## DEDICATORIA

*Con el más profundo amor y gratitud, dedico este logro a Dios, a mi madre Petrona Betancourt, a mi compañero de vida Rommel, a mis hermanos, a la señora María Teresa Gutiérrez, a la familia Alvarado Rodríguez, y a todos aquéllos cuya presencia y apoyo han iluminado mi camino hacia este sueño hecho realidad.*

*Este triunfo es tanto mío como de ustedes.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por ser mi fuente de sabiduría, paciencia y optimismo, permitiéndome culminar exitosamente mis estudios de doctorado.

A mi familia Betancourt-Mendoza y Alvarado-Rodríguez, por sus oraciones, su apoyo constante y por motivarme a seguir creciendo profesionalmente.

A la familia Carbajal-Murillo, por acogerme como uno más durante mi estancia en México y brindarme su apoyo incondicional.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por abrirme las puertas a un mundo de conocimientos y experiencias que han fortalecido mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, por su valioso respaldo económico, facilitando mi permanencia durante estos estudios.

A los miembros del comité asesor de esta tesis, con quienes ha sido un honor trabajar: al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, a la Dra. María Teresa Beryl Colinas y León, y al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar. Gracias por su guía y compromiso en este proceso formativo. En particular, agradezco:

Al Dr. Esaú Moreno por su orientación en el experimento y sus valiosas recomendaciones en la redacción de esta tesis; y al Dr. Felipe Sánchez por compartir su admirable experiencia y conocimientos para el desarrollo exitoso de este trabajo.

Al Dr. Jesús Magdaleno Villar por su amistad y apoyo incondicional durante mi estancia en México y durante la ejecución de los experimentos del proyecto de investigación.

Al Dr. Juan Martínez Solís, por su apoyo, motivación y consejos brindados durante toda mi estancia en México.

A todo el equipo del posgrado de Fitotecnia, al Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego, y a los Licenciados Rogelio Deheza, Verónica Bello y Ana Robles, por su apoyo en todos los trámites durante los cuatro años de estudios doctorales.

A la Dra. Ma. Teresa Martínez Damián y a la Lic. Itzel Nayelli Silvestre González, por su apoyo en la determinación de clorofilas en hojas de jitomate y facilitarme las instalaciones del Laboratorio de fisiología de Frutales de la UACH.

A el C. Luis Angel Romero Rivero, al Ing. Ignacio Salazar, doña Ma. Inés Acosta Martínez y Yadira Pérez Reyes por su amistad y apoyo durante la fase experimental y toma de datos del proyecto de investigación.

Al Dr. Nicasio Huerta Cruz, del Colegio de Posgraduados, por brindarme acceso a las instalaciones del Laboratorio de Fisiología Vegetal, donde se llevó a cabo el procesamiento y la medición de variables morfológicas en plántulas de jitomate.

A mis amigos y compañeros, Elín Pérez, Jhusua Reina, Alma De anda, Ana Paredes, Nancy González, Camilo Castañeda, Juana Pérez, Nora Useche, Isis Montalvo, Eva, Miguel, Gabo, Laura, etc. por su apoyo durante el proceso de investigación y hacer de mi estancia la mejor experiencia de vida.

Gracias a todos los que no mencioné, pero que también han puesto un granito de arena para el alcance de todas las metas propuestas.

## DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Francisca de los Ángeles Mejía Betancourt

Fecha de nacimiento: enero 27 1990.

Lugar de nacimiento: Chinandega, Nicaragua.

CURP: MEBF900127MNEJTR05

Cédula profesional: 1271584



### Desarrollo académico

Maestría: Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad autónoma Chapingo.

Licenciatura: Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional Agraria ubicada en Managua-Nicaragua.

Técnica: Técnico Agropecuario, IPADEN ubicada en Matagalpa-Nicaragua.

## RESUMEN GENERAL

### LUZ, CO<sub>2</sub> Y TEMPERATURA EN PLÁNTULA DE JITOMATE MODIFICAN EL NÚMERO DE FLORES EN LAS PRIMERAS TRES INFLORESCENCIAS

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada en invernadero debido a su alta demanda a nivel mundial. Por ello, una de las principales metas en su producción es aumentar el rendimiento por unidad de superficie. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la luz, CO<sub>2</sub> y temperatura en el crecimiento de plántulas de jitomate que permitan incrementar la producción de flores y frutos en plantas establecidas en alta densidad de población y despuntadas al tercer racimo. Para ello, fueron conducidos tres experimentos independientes, cada uno con un diseño experimental en bloques completos al azar y cuatro repeticiones; todos los tratamientos se aplicaron en la fase de plántula, durante la diferenciación de las tres primeras inflorescencias (18-34 días después de la siembra); en cada caso, se realizó análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). En el primer experimento, se probaron tres intervalos de concentración (ppm) de CO<sub>2</sub> (T1: 420-460, T2: 500-700, T3: 700-1000) en una cámara de crecimiento; se encontró que, con los tratamientos T2 y T3 las plántulas presentaron un incremento significativo en altura, área foliar y peso seco, y con el T2, las plantas produjeron cuatro flores y frutos más que con el T1, asociado a una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y conductancia estomática. En el segundo experimento, se evaluaron cuatro intervalos de temperatura (°C) en la rizósfera de las plántulas (9-12, 12-15, 15-18 y 18-21) en dos variedades de jitomate; se encontró que, las temperaturas entre 12 y 18 °C favorecieron el crecimiento de las plántulas y aumentaron el número de flores y frutos por planta en ambas variedades. En el tercer experimento se evaluó el efecto de la temperatura nocturna (11, 15 y 18 °C) y luz LED suplementaria durante la iniciación floral de los tres primeros racimos. Se observó que con la temperatura de 15 °C se mejoró el crecimiento vegetativo en las plántulas y se aumentó la producción de flores y frutos por planta, pero la luz suplementaria aplicada no tuvo efecto alguno. Los resultados permiten deducir que el mejor ambiente en las plántulas de jitomate para un mejor crecimiento y posteriormente más flores en las tres primeras inflorescencias, es una temperatura de la rizósfera entre 12 y 15 °C, temperatura ambiente nocturna de 15 °C, y concentración de CO<sub>2</sub> de al menos 500 ppm.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum* L., iniciación floral, concentraciones de CO<sub>2</sub>, temperatura nocturna, luz suplementaria nocturna.

---

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.  
Autor: Francisca de los Ángeles Mejía Betancourt  
Director de tesis: Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

## GENERAL ABSTRACT

### LIGHT, CO<sub>2</sub> AND TEMPERATURE ON TOMATO SEEDLING MODIFY THE NUMBER OF FLOWERS IN THE FIRST THREE INFLORESCENCES

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the most grown vegetable in greenhouses due to its high demand worldwide. Therefore, one of the main goals in its production is to increase yield per unit area. The objective of this study was to determine the effect of light, CO<sub>2</sub>, and temperature on the growth of tomato seedlings to increase flower and fruit production in plants established at high population density and pruned to the third cluster. For this purpose, three independent experiments were conducted, each one with a randomized complete block design and four replicates; all treatments were applied at the seedling stage, during the differentiation of the first three inflorescences (18 - 34 days after sowing); in each case, Tukey's analysis of variance and comparisons of means ( $P \leq 0.05$ ) were performed. In the first experiment, three concentration intervals (ppm) of CO<sub>2</sub> (T1: 420-460, T2: 500-700, T3: 700-1000) were tested in a growth chamber; it was found that, with treatments T2 and T3 the seedlings presented a significant increase in height, leaf area, and dry weight, and with T2, the plants produced four more flowers and fruits than with T1, associated with a higher rate of CO<sub>2</sub> assimilation and stomatal conductance. In the second experiment, four temperature intervals (°C) were evaluated in the rhizosphere of seedlings (9-12, 12-15, 15-18 and 18-21) in two varieties of tomato; it was found that temperatures between 12 and 18 °C favored seedling growth and increased the number of flowers and fruits per plant in both varieties. In the third experiment, the effect of nighttime temperature (11, 15, and 18 °C) and supplementary LED light during flower initiation of the first three clusters was evaluated. It was observed that, the temperature of 15 °C improved vegetative growth in seedlings and increased flower and fruit production per plant, but the supplementary light applied had no effect. The results allow us to deduce that the best environment in tomato seedlings for better growth and subsequently more flowers in the first three inflorescences, is a rhizosphere temperature between 12 and 15 °C, nighttime ambient temperature of 15 °C, and CO<sub>2</sub> concentration of at least 500 ppm.

**Key words:** *Solanum lycopersicum* L., flower initiation, CO<sub>2</sub> concentrations, night temperature, night supplementary light.

---

Doctoral Thesis in Horticultural Science, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Francisca de los Ángeles Mejía Betancourt

Advisor: Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la segunda hortaliza más cultivada a nivel mundial, después de la papa. En 2022, se produjeron 186,821,216 t en un área de 5,051,983 hectáreas. Entre los principales países productores se encuentran China, India, Estados Unidos y Turquía (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2022), y México ocupa el décimo lugar con una producción de 3,418,899 t año<sup>-1</sup> (Abera et al., 2020; Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2019; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2022), siendo Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Morelos y Baja California Sur, los estados más destacados en la producción de este cultivo (FIRA, 2023).

El sistema convencional de producción de jitomate bajo invernadero, se basa en el uso de variedades de crecimiento indeterminado, cultivadas en un ciclo anual, con densidades de 2 a 3 plantas/m<sup>2</sup>. Esto permite la cosecha de hasta 25 racimos por planta y rendimientos de 300 a 500 toneladas por hectárea en invernaderos de mediana a alta tecnología (Kubota et al., 2018). Sin embargo, presenta inconvenientes como: la dificultad de realizar algunas prácticas agrícolas, manejo fitosanitario complicado por el ciclo tan prolongado y la manipulación frecuente, condiciones que favorecen la aparición y reproducción de plagas y enfermedades; además, se necesitan invernaderos altos y robustos, que incrementan los costos de producción (Heuvelink et al., 2018; Sánchez & Moreno, 2017).

Como alternativa, en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) se ha desarrollado un sistema alternativo de producción que permite establecer de tres a cuatro ciclos de cultivo al año, con rendimientos que superan los sistemas convencionales sin que se incrementen los costos de producción anuales (Sánchez-Del Castillo et al., 2010; Sánchez-Del Castillo et al., 2012). Para ello, se incluyen distintas técnicas de manejo del cultivo distintas como el trasplante a los 45-60 días y despunte del ápice de crecimiento por arriba del tercer racimo, para reducir el tiempo de trasplante a fin de cosecha a 90 días. Con el despunte

temprano, a cada planta se le deja desarrollar sólo 10 hojas, formando poca área foliar, lo que permite el manejo de una densidad de población relativamente alta (7 a 8 plantas/m<sup>2</sup>), con un índice de área foliar entre 3 y 4 que es apropiado para una máxima fotosíntesis (Sánchez y Moreno, 2015 y Heuvelink et al., 2018), llegando así a un rendimiento promedio de 16 kg m<sup>-2</sup> por ciclo, con lo que se lograría obtener 500 t h año<sup>-1</sup> en tres ciclos de producción (Mejía-Betancourt et al., 2023; Moreno-Pérez et al., 2021; Sánchez-Del Castillo et al., 2012).

Aunque el rendimiento logrado ya es alto, es posible incrementarlo mediante la formación de un mayor número de frutos por planta (Mejía-Betancourt et al., 2024; Sánchez-Del Castillo et al., 2021). Dado que este sistema depende de la producción de sólo tres racimos por planta, se busca que en cada uno se forme un mayor número de flores y frutos posibles sin que éstos pierdan calidad y peso (Moreno-Pérez et al., 2021; Sánchez-Del Castillo et al., 2012), lo que finalmente se debe traducir en un mayor rendimiento por unidad de superficie.

De acuerdo con Heuvelink et al. (2020) el rendimiento de una planta depende del genotipo, pero también de las condiciones ambientales en que crecen como la nutrición mineral, fertilización carbónica, temperaturas ambientales diurnas y nocturnas, temperatura de la raíz, humedad relativa y la radiación solar, entre otros (Aslani et al., 2020; León-Burgos et al., 2021; Mejía-Betancourt et al., 2024).

Por otra parte, se sabe que, en el proceso de floración del jitomate, en una inflorescencia dada normalmente inicia su desarrollo, con más primordios florales, que los que finalmente llegan a flores visibles y que eventualmente pasan a ser frutos. Esto debido a que para que un primordio de flor no aborte, se requiere de una cantidad mínima de azúcares, que muchas veces no es suficiente por la competencia entre los primordios de una misma inflorescencia, además porque paralelamente, los distintos órganos de la planta (raíz, tallo, hoja), también demandan fotoasimilados para crecer, de tal forma que los azúcares que forman las plántulas en las etapas iniciales de su desarrollo son escasos para la alta demanda de fotoasimilados (Contreras-Magaña et al., 2013; Heuvelink & Okello, 2018).

Por lo tanto, para promover la formación de más flores y frutos en cada racimo, se requiere, durante el periodo de iniciación floral de cada inflorescencia, aumentar la producción de fotoasimilados en cada plántula (aumentar la fuente), que puede ser mediante el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> que actúa como materia prima para la fotosíntesis (Mejía-Betancourt et al., 2024; Rangaswamy et al., 2021) así como del manejo de la radiación solar que no sólo proporciona la energía necesaria para la fotosíntesis, sino que también actúa como un estímulo que regula el crecimiento, la floración y la morfogénesis de las plantas (Li et al., 2020; Momokawa et al., 2011; Takahashi & Badger, 2011).

Por otro lado, también parece influir el control de la temperatura, ya que regula las actividades enzimáticas que son la base de todos los procesos fisiológicos de la planta (Aslani et al., 2020; Ji et al., 2020; León-Burgos et al., 2021), particularmente temperaturas relativamente bajas en la zona de la raíz que reduce la respiración y con ello el crecimiento vegetativo (disminuir la demanda) favoreciendo el cuajado de más flores por inflorescencia (Glanz-Idan & Wolf, 2020; Yang et al., 2020). La influencia de estos factores, son especialmente importantes durante las primeras dos a cuatro semanas del desarrollo de las plántulas de jitomate bajo el sistema de producción de tres racimos por planta, que es cuando ocurre la diferenciación floral de los primeros tres racimos (Heuvelink & Okello, 2018).

El enriquecimiento con CO<sub>2</sub>, la temperatura baja en la raíz y una mayor cantidad de luz durante el día, aunado a una temperatura diurna apropiada, son factores que favorecen la fotosíntesis, con lo que se logra obtener plántulas con calidad al trasplante y posteriormente plantas con más flores y frutos por planta (Fernández & Johnston, 2006; Fujishige, 1991; Mejía-Betancourt et al., 2024).

Aunque existen diversas investigaciones del efecto de los factores ambientales en la floración del jitomate, pocas se refieren a su influencia posterior cuando se implementan únicamente en la etapa de plántula.

Considerando lo anterior, se llevó a cabo el presente trabajo de investigación, con el objetivo de obtener plántulas con calidad al trasplante y promover el

cuajado de un mayor número de primordios florales para lograr más flores en las primeras tres inflorescencias. Para lo cual, se realizaron tres experimentos independientes durante la etapa de plántula, aplicando los siguientes tratamientos: enriquecimiento carbónico, temperaturas relativamente bajas en la zona de la raíz, y una combinación de temperatura ambiente y luz suplementaria aplicadas durante la noche.

En el escrito de este documento de tesis, se presenta cada experimento como un capítulo independiente, estructurado según la guía de autores a la que fueron enviados para su posible publicación.

## 1.1 Literatura citada

- Abera, G., Ibrahim, A. M., Forsido, S. F., & Kuyu, C. G. (2020). Assessment of post-harvest losses of tomato (*Lycopersicon esculentem* Mill.) in selected districts of East Shewa Zone of Ethiopia using a commodity system analysis methodology. *Heliyon*, 6(4), Article e03749. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03749>
- Aslani, L., Gholami, M., Mobli, M., & Sabzalian, M. R. (2020). The influence of altered sink-source balance on the plant growth and yield of greenhouse tomato. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(11), 2109–2123. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00891-2>
- Contreras-Magaña, E., Arroyo-Pozos, H., Ayala-Arreola, J., Sánchez-Del-Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. C. (2013). Caracterización morfológica de la diferenciación floral en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 19(4), 59–70. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.010>
- Fernández, G., & Johnston, M. (2006). Crecimiento y temperatura. In F. A. Squeo, & L. Cardemil (Eds.), *Fisiología vegetal* (pp. 1–28). Universidad de La Serena.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2019). *Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial.* <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2019/06/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019.pdf>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2023). *Cierre de la producción agropecuaria en México 2023, tomate rojo (jitomate).* <https://www.fira.gob.mx/InvYEvalEcon/EvaluacionIF>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *FAOSTAT: FAO statistical databases.* <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

- Fujishige, N., Sugiyama, T., & Ogata, R. (1991). Effect of root temperature on the flower formation and fruit yield of tomatoes. *Engei Gakkai Zasshi*, 60(1), 97–103. <https://doi.org/10.2503/jjshs.60.97>
- Glanz-Idan, N., & Wolf, S. (2020). Upregulation of photosynthesis in mineral nutrition-deficient tomato plants by reduced source-to-sink ratio. *Plant Signaling & Behavior*, 15(2), Article 1712543. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1712543>
- Heuvelink, E., Li, T., & Dorais, M. (2018). Crop growth and yield. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., pp. 89–136). CABI International.
- Heuvelink, E., Okello, R. C. O., Peet, M., Giovanoni, J. J., & Dorais, M. (2020). Tomato. In H. C. Wien, & H. Stützel (Eds.), *The physiology of vegetable crops* (2nd ed., pp. 138–178). CABI International.
- Ji, Y., Ocaña, D. N., Choe, D., Larsen, D. H., Marcelis, L. F. M., & Heuvelink, E. (2020). Far-red radiation stimulates dry mass partitioning to fruits by increasing fruit sink strength in tomato. *New Phytologist*, 228(6), 1914–1925. <https://doi.org/10.1111/nph.16805>
- Kubota, C., de Gelder, A., & Peet, M. M. (2018). Greenhouse tomato production. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., pp. 276–313). CABI internacional.
- León-Burgos, A. F., Beltrán-Cortes, G. Y., Barragán-Pérez, A. L., & Balaguera-López, H. E. (2021). Distribution of photoassimilates in sink organs of plants of Solanaceas, tomato and potato. *Revista Ciencia y Agricultura*, 18(3), 79–97. <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13566>
- Li, Y., Xin, G., Liu, C., Shi, Q., Yang, F., & Wei, M. (2020). Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO<sub>2</sub> assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings. *BMC Plant Biology*, 20, Article 318. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02523-z>

Mejía-Betancourt, F. A., Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., & González-Molina, L. (2023). Esquejes enraizados, una alternativa para la producción de jitomate bajo invernadero en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 389–399. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3038>

Mejía-Betancourt, F. A., Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., & Colinas-Léon, M. B. T. (2024). Enriquecimiento carbónico en plántulas de tomate para incrementar el número de flores y frutos por planta. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 47(3), 285–292. <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.3.285>

Momokawa, N., Kadono, Y., & Kudoh, H. (2011). Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany*, 108(7), 1299–1306. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr236>

Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-Del Castillo, F., Ruiz-Díaz, M., & Contreras-Magaña, E. (2021). Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(1), 5–17. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>

Rangaswamy, T. C., Sridhara, S., Ramesh, N., Gopakkali, P., El-Ansary, D. O., Mahmoud, E. A., Abdelmohsen, S. A. M., Abdelmohsen, A. M. M., Elansary, H. O., & Abdel-Hamid, A. M. E. (2021). Assessing the impact of higher levels of CO<sub>2</sub> and temperature and their interactions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants*, 10(2), Article 256. <https://doi.org/10.3390/plants10020256>

Sánchez, D. C. F., & Moreno, P. E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.

Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Coatzín, R. R., Colinas León, M. T., & Peña López, A. (2010). Evaluación agronómica y fisiotécnica de

cuatro sistemas de producción en dos híbridos de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(3), 207–214. <https://revistas.chapingo.mx/horticultura/revista/articulos/viewer.html?file=rchshXVI1808.pdf>

Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Morales-Maza, A., Peña-Lomelí, A., & Colinas-León, M. T. (2012). Densidad de población y volumen de sustrato en plántulas de jitomate (*Lycopersicon lycopersicon* Mill.). *Agrociencia*, 46(3), 243–254. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30223119005>

Sánchez-Del Castillo, F., Portillo-Márquez, L., Moreno-Pérez, E. C., Magdaleno-Villar, J. J., & Vázquez-Rodríguez, J. C. (2021). Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 71–84. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>

Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. (2023). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/784856/Jitomate\\_Noviembre.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/784856/Jitomate_Noviembre.pdf)

Takahashi, S., & Badger, M. R. (2011). Photoprotection in plants: A new light on photosystem II damage. *Trends in Plant Science*, 16(1), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.001>

Yang, Y., Dong, L., Shi, L., Guo, J., Jiao, Y., Xiong, H., Dickson, R., & Shi, A. (2020). Effects of low temperature and low light on the physiology of tomato seedlings. *American Journal of Plant Sciences*, 11(2), 162–179. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.112013>

– Como se publicó en la Revista Fitotecnia Mexicana –

**CAPITULO II. ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO EN PLÁNTULA  
DE JITOMATE PARA INCREMENTAR EL NÚMERO DE FLORES  
Y FRUTOS POR PLANTA**

## ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO EN PLÁNTULAS DE TOMATE PARA INCREMENTAR EL NÚMERO DE FLORES Y FRUTOS POR PLANTA

### CARBON ENRICHMENT ON TOMATO SEEDLINGS TO INCREASE THE NUMBER OF FLOWERS AND FRUITS PER PLANT

Francisca de los Á. Mejía-Betancourt<sup>1</sup>, Felipe Sánchez-Del Castillo<sup>2</sup>, Esaú del C. Moreno-Pérez<sup>2\*</sup> y María T. B. Colinas-León<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Agraria, Departamento de Producción Vegetal, Managua, Nicaragua. <sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (esaump10@yahoo.com.mx)

#### 2.1. RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada bajo invernadero. El objetivo del presente estudio fue favorecer la fotosíntesis de plántulas de tomate mediante enriquecimiento carbónico en esta etapa, que conduzca potencialmente a un mejor crecimiento y posteriormente a una mayor producción de flores y frutos por planta podada al tercer racimo. Se probaron tres niveles de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en plántulas de tomate aplicados de los 15 a los 35 días después de la siembra (dds). Las plántulas, crecidas en charolas de 60 cavidades, fueron acomodadas al interior de una cámara de crecimiento de 1 m<sup>3</sup> de volumen. Para adicionar CO<sub>2</sub> se utilizaron velas encendidas para lograr las siguientes concentraciones en ppm: ambiente natural al interior de la cámara (T1: 420-460), una vela (T2: 500-700), dos velas (T3: 700-1000) y el testigo fuera de la cámara y sin vela (T4: 317-402). El diseño usado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. A los 30 dds se midieron variables fisiológicas, y a los 35 días altura, diámetro de tallo, área foliar y peso seco de las plántulas. El trasplante se hizo a los 35 dds a una densidad de ocho plantas m<sup>-2</sup>. Posteriormente, se midieron variables de rendimiento y sus componentes. Los resultados indicaron que con los tratamientos T2 y T3 las plántulas tuvieron mayor altura, área foliar y peso seco con respecto al testigo, y con el tratamiento T2 las plantas produjeron cuatro flores y cuatro frutos más que el testigo, asociado con una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y conductancia estomática en las hojas. Se concluye que el enriquecimiento carbónico en plántulas de tomate favorece la fotosíntesis, y con ello se producen plántulas con calidad al trasplante y más flores y frutos por planta.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum* L., alto rendimiento, concentraciones de CO<sub>2</sub>, floración en tomate.

#### 2.2. SUMMARY

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the vegetable most grown under greenhouse conditions. The objective of this study was to promote photosynthesis of tomato seedlings through carbon dioxide enrichment at that stage, which could lead to better growth and subsequently to a higher production of flowers and fruits per plant pruned to the third cluster. Three levels of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) were tested in tomato seedlings applied from 15 to 35 days after planting. The seedlings, grown in 60-cavity trays, were placed inside a growth chamber of 1 m<sup>3</sup> volume. To add CO<sub>2</sub>, lit candles were used to attain the following concentrations in ppm: natural environment inside the chamber (T1: 420-460), one candle (T2: 500-700), two candles (T3: 700-1000) and out-of-chamber control without candles (T4 = 317-402).

A complete randomized blocks experimental design with four replicates was used. At 30 days after planting (dap), physiological variables were measured, and at 35 days height, stem diameter, leaf area and dry weight of the seedlings. The transplant was done at 35 dds to a density of eight plants m<sup>-2</sup>. Subsequently, yield and its components were measured. Results indicated that with T2 and T3 treatments the seedlings had greater height, leaf area and dry matter weight compared to the control, and with T2 treatment the plants produced four more flowers and four more fruits than the control, associated with a greater rate of CO<sub>2</sub> assimilation and stomatal conductance in the leaves. It is concluded that carbon enrichment in tomato seedlings promote photosynthesis, and thus, seedlings with transplanting quality are produced and more flowers and fruits per plant.

**Index words:** *Solanum lycopersicum* L., CO<sub>2</sub> concentrations, high yield, tomato flowering.

#### 2.3. INTRODUCCIÓN

En la Universidad Autónoma Chapingo se ha desarrollado tecnología de producción hidropónica en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero, que consiste en efectuar trasplante tardío (plántulas de 45 a 60 días), realizar despunte del ápice de las plantas a la altura del tercer racimo y establecerlas en densidades de población de 8 plantas m<sup>-2</sup> de invernadero, con lo que se han logrado rendimientos anuales de hasta 450 t ha<sup>-1</sup> en tres ciclos de cultivo al año (Mejía-Betancourt *et al.*, 2023; Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2021), pero se considera que es posible incrementarlo aún más (Moreno-Pérez *et al.*, 2021).

Dado que con este sistema sólo se cosechan tres racimos por planta, es importante maximizar el potencial productivo de cada racimo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2021) mediante la formación de un mayor número de flores por racimo, lo que directamente influirá en una mayor producción de frutos y mayor rendimiento por planta y por unidad de superficie, por lo que es pertinente el estudio de los factores que regulan los procesos de

floración y fructificación del tomate bajo este sistema de cultivo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014; Vitale *et al.*, 2014).

El proceso de floración del tomate, normalmente se inicia con la formación de más meristemas reproductivos, los que finalmente se desarrollan en flores, debido a que para que un meristemo se desarrolle en una flor es necesario que haya un flujo mínimo de fotoasimilados hacia dichos meristemas, además de las condiciones ambientales en las que las plantas crecen (Heuvelink y Okello, 2018). Es entonces la insuficiencia de fotoasimilados para el desarrollo de estos meristemas lo que afecta el amarre de más flores por inflorescencia. Para evitar este problema, es necesario implementar prácticas que favorezcan un flujo adecuado de fotoasimilados hacia los órganos reproductores, en este caso hacia los primordios florales, promoviendo así la formación de más flores y frutos por racimo (Contreras-Magaña *et al.*, 2013), lo que podría lograrse aumentando la producción de fotoasimilados por la planta (Rodrigues *et al.*, 2019) mediante el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> del ambiente, acompañado de un control adecuado de otros factores que influyen en la fotosíntesis como la radiación solar, temperatura, humedad relativa y agua (Aslani *et al.*, 2020; Ji *et al.*, 2020; León-Burgos *et al.*, 2021) y haciendo un uso eficiente de los mismos como podas de hojas y aplicación de reguladores del crecimiento para disminuir el crecimiento vegetativo (Aslani *et al.*, 2020; Glanz-Idan y Wolf, 2020), ya que los factores ambientales señalados ejercen influencias directas o indirectas en la iniciación floral; por ejemplo, la intensidad y duración de la radiación solar actúa como fuente de energía para la fotosíntesis, así como señal que controla el crecimiento, la floración y morfogénesis (Momokawa *et al.*, 2011), las concentraciones de CO<sub>2</sub> como materia prima de la fotosíntesis y la temperatura que regula funciones enzimáticas, las cuales juegan roles significativos en este proceso (Lanoue *et al.*, 2018; Mamatha *et al.*, 2014; Rangaswamy *et al.*, 2021). El periodo sensitivo en el que estos factores ambientales pueden influir en la cantidad de flores del primer racimo es aproximadamente ocho días después de la expansión de los cotiledones, coincidiendo con el momento en que la tercera hoja sobrepasa los 10 mm de longitud; el segundo y tercer racimo se inician entre una y dos semanas después (Contreras-Magaña *et al.*, 2013; Heuvelink y Okello, 2018).

Heuvelink y Okello (2018) también mencionaron que la disponibilidad de carbohidratos es fundamental para el desarrollo y diferenciación floral, ya que son los principales compuestos que proporcionan la energía necesaria para estos procesos. En este contexto, al elevarse la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente por arriba de 500 ppm, las plantas C<sub>3</sub>, como el tomate, pueden incrementar su tasa fotosintética, lo que se traduce en una mayor

síntesis de azúcares y otros compuestos orgánicos necesarios para el crecimiento y desarrollo, y por ende, una mayor productividad y rendimiento (Pan *et al.*, 2020; Rangaswamy *et al.*, 2021). Con frecuencia el CO<sub>2</sub> es un factor limitante de la producción en los cultivos; en especial, en invernaderos con ventilación deficiente (Li *et al.*, 2017; Sánchez y Moreno, 2017).

A pesar de que existen investigaciones sobre el crecimiento y respuestas fisiológicas del tomate sobre el aumento del CO<sub>2</sub> (Li *et al.*, 2017; Rangaswamy *et al.*, 2021), se sabe poco del efecto posterior de cuando es aplicado en etapa de plántula en un periodo corto de tiempo (Pan *et al.*, 2020), por lo que se llevó a cabo el presente estudio con el objetivo de favorecer la fotosíntesis de plántulas de tomate mediante el enriquecimiento carbónico en esta etapa, que conduzca a un mejor crecimiento y producción de más fotoasimilados para aumentar el número de flores y frutos en los tres primeros racimos de la planta.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1. Ubicación del estudio y material vegetal

El estudio se llevó a cabo de junio a noviembre de 2022 en condiciones de invernadero, en la Universidad Autónoma Chapingo en Texcoco, Estado de México, México, ubicado en las coordenadas geográficas 19° 29' 35.03" latitud norte y 98° 52' 19.86" longitud oeste, a 2250 msnm. Se utilizó el híbrido de tomate Paipai de la empresa semillera Enza Zaden, que es de fruto tipo saladette (Roma) y hábito de crecimiento indeterminado.

### 2.4.2. Establecimiento del experimento

La siembra de la semilla se hizo en charolas de 60 cavidades, utilizando como sustrato una mezcla de turba (peat moss) y perlita en proporción 1:1 (v:v). Estas charolas fueron colocadas dentro de un invernadero de producción de plántula de 300 m<sup>2</sup>, con cubierta de polietileno térmico, de alta dispersión de radiación y 70 % de transmisión de radiación solar, ventanas laterales con cortinas de polietileno y mallas antiáfidos, calefacción a base de gas LP y un muro húmedo con extractores de aire como sistema de enfriamiento.

### 2.4.3. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub> aplicadas durante 20 días en la etapa de plántula (de los 15 a los 35 días después de la siembra (dds)). Como fuente de CO<sub>2</sub>, se utilizaron velas de cera de 25 cm de altura y 2.5 cm de diámetro, encendidas diariamente durante ocho horas (de las 9:00 am a las 5:00 pm), ubicadas al

interior de una cámara de crecimiento de 1 m<sup>3</sup> de volumen (Figura 1), construidas con estructura metálica (PTR) de 1.27 cm y cubiertas con polietileno transparente con 90 % de transmisión de la radiación solar, a la que se incorporó una ventana de forma triangular con malla antiáfidos de 27 cm de base por 17 cm de alto para expulsar el aire caliente y en la que se instaló un mini ventilador eléctrico portable (Hertekdo® Desktop Fan, Fujian, China) que permitía una velocidad mínima de 3.9 m s<sup>-1</sup> para promover la recirculación del aire y mantener la concentración correspondiente de CO<sub>2</sub> en toda la cámara, al mismo tiempo que facilitó la salida del aire caliente a través de la ventana (Figura 1). Los tratamientos fueron:

**Tratamiento 1.** Plántulas de tomate expuestas a 420-460 ppm de CO<sub>2</sub> ambiental. Las plántulas fueron colocadas dentro de una cámara de crecimiento.

**Tratamiento 2.** Plántulas de tomate expuestas a 500-700 ppm de CO<sub>2</sub>. Las plántulas fueron colocadas dentro de una cámara de crecimiento; en su interior se tenía una vela de cera encendida, que permitió mantener la concentración de CO<sub>2</sub> mencionada.

**Tratamiento 3.** Plántulas de tomate expuestas a 700-1000 ppm de CO<sub>2</sub>. Las plántulas fueron colocadas dentro de una cámara de crecimiento; en su interior se tenía dos velas de cera encendidas, que mantuvieron dicha concentración de CO<sub>2</sub>.

**Tratamiento 4.** Testigo con plántulas de tomate

expuestas a 317-402 ppm de CO<sub>2</sub> durante el día. Las plántulas crecieron directamente bajo el invernadero de producción de 300 m<sup>2</sup>, sin cámaras de crecimiento y sin velas.

En los primeros tres tratamientos las cámaras de crecimiento estaban, a su vez, colocadas al interior del invernadero de producción de 300 m<sup>2</sup> (Figura 2).

El experimento fue establecido bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro tratamientos, cuatro repeticiones y un grupo de 10 plántulas como unidad experimental.

#### 2.4.4. Manejo de las plántulas

Los primeros cinco días después de la siembra (dds) las plántulas fueron irrigadas de forma manual con agua sola; posteriormente, y hasta el momento del trasplante (35 dds), el riego se hizo con solución nutritiva que contenía las siguientes concentraciones (mg L<sup>-1</sup>): N: 100, P: 25, K: 125, Ca: 125, S: 75, Mg: 25, Fe: 1.0, Mn: 0.1, Cu: 0.1, Mn: 1, B: 0.5 y Zn: 0.1.

Con la finalidad de monitorear la concentración de CO<sub>2</sub> al interior del invernadero y de cada cámara de crecimiento fue colocado un medidor de CO<sub>2</sub> infrarojo (AG Electrónica®, KCO<sub>2</sub>-manual, Shenzhen, China), como se muestra en la Figura 1, así como un Datalogger (RHT10, Extech Instruments Co., Waltham, Massachusetts, EUA) para registrar temperatura y humedad relativa a lo largo del día.

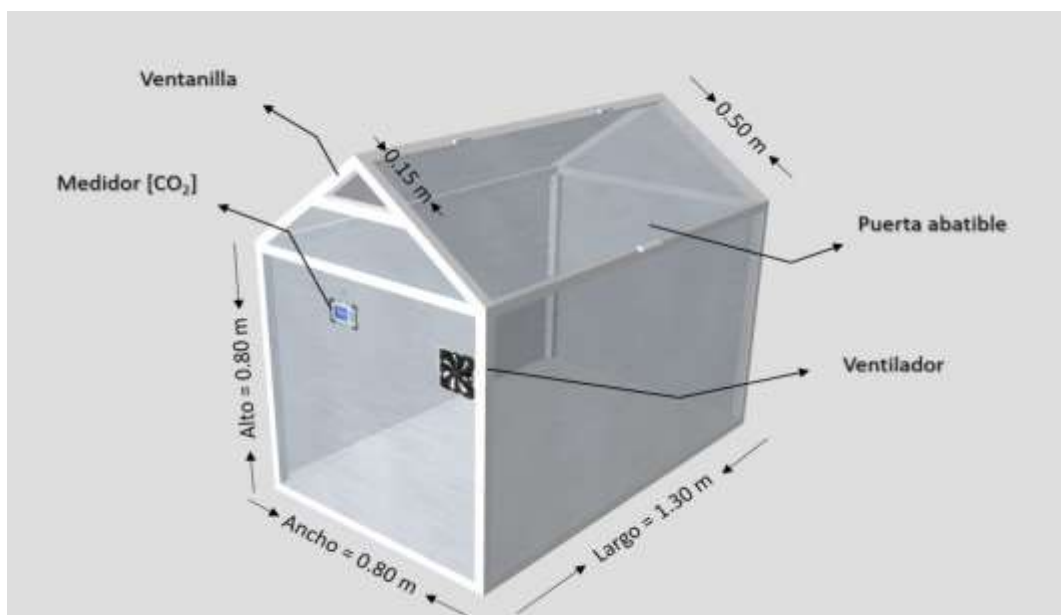


Figura 1. Esquema de la cámara de crecimiento: dimensiones y equipamiento.



Figura 2. Cámaras de crecimiento al interior del invernadero. a) Tratamiento 1, b) tratamiento 2, c) tratamiento 3.

Los datos registrados se muestran en el Cuadro 1; además, se dispuso de un sensor cuántico de fotones (Light Meter, LX-1108, China) para determinar la intensidad lumínica dentro del invernadero y de las cámaras de crecimiento ubicadas dentro del invernadero en 840 a 1200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiación fotosintéticamente activa y dentro de las cámaras de crecimiento solamente 10 % menor. En un invernadero de 1000 m<sup>2</sup> con condiciones similares al de producción de plántula se llevó a cabo el trasplante utilizando plántulas de 35 días de edad, en camas de cultivo rellenas con sustrato a base de arena de tezontle rojo con partículas de 1 a 3 mm de diámetro. Sobre las camas se colocó un acolchado plástico de color plata-negro. El cultivo se estableció en dos hileras a una densidad de población de 8 plantas m<sup>-2</sup> de invernadero, y el riego se realizó mediante cintillas de goteo con goteros integrados cada 20 cm, pero utilizando el doble de concentración que en plántula.

Se hizo tutorado de las plantas con un anillo de plástico y rafia amarrado a alambres ubicados a una altura de 1.8 m a lo largo de las camas. Los brotes laterales fueron eliminados a medida que surgían, y se eliminó el ápice principal de cada planta, dejando dos hojas por encima del tercer racimo. En esta etapa de desarrollo del cultivo, con la ayuda de un ceptómetro portátil de sonda lineal de 80 sensores (LAI Ceptometer LP-80, MeterGroup Pullman, Washington, EUA), se registró la radiación solar

incidente en distintas posiciones del dosel de las plantas, encontrándose una radiación de 1000-2000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  por arriba del dosel, 500-550  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en la parte mediana y 150-200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en la parte inferior.

#### 2.4.5. Variables evaluadas

A los 30 dds se identificó y marcó el foliolo terminal de la segunda hoja bien formada, y con un analizador de gases infrarrojo (CI-340, CID Bio-Science®, Camas, Washington, EUA) se realizaron mediciones en un día soleado a las 9:00, 13:00 y 17:00 horas, y se determinaron las siguientes variables fisiológicas: tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), temperatura de la hoja (°C), conductancia estomática ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y déficit de presión de vapor (kPa).

El mismo día del trasplante se efectuaron las mediciones siguientes: altura de plántula (cm) desde la base de la plántula hasta el meristemo apical, utilizando un flexómetro; diámetro de tallo (mm) entre la segunda y tercera hoja medido con un vernier electrónico; área foliar a través de un integrador de área foliar (LI-3000A, LICOR®, Lincoln, Nebraska, EUA) y peso seco total por plántula (g) con una balanza electro analítica (MC-173467, Ohaus®, Parsippany, Nueva Jersey, EUA). Posteriormente, se cuantificó el número de flores y frutos por planta, peso promedio de fruto (g) y rendimiento (g/planta).

### 2.4.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), con el programa Statistical Analysis System for Windows 9.0 (SAS, 2002).

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.5.1. Variables fisiológicas

Los resultados del análisis de comparación de medias (Cuadro 2) indican que hubo diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) debido a las concentraciones de CO<sub>2</sub> sobre las variables fisiológicas evaluadas durante la etapa de plántula en tomate.

El tratamiento de 700-1000 ppm de CO<sub>2</sub> (T3), con una temperatura de hoja promedio de 35.64 °C, fue estadísticamente más alto que los demás tratamientos, mientras que con el tratamiento de 420 a 460 (T1) se tuvo la temperatura de hoja más baja (27.39 °C). Las temperaturas altas (como en T3) pueden acelerar el crecimiento; sin embargo, también pueden ocasionar estrés térmico, que puede afectar negativamente los procesos fisiológicos, principalmente el de fotosíntesis, ya que como mencionaron Yamori *et al.* (2014), la fotosíntesis se inhibe a altas temperaturas y este efecto correlaciona

con una reducción en la actividad de la Rubisco activasa (Salvucci *et al.*, 2001).

EL tratamiento de 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> (T2) mostró la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y de conductancia estomática más alta (14.04 y 240.25  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente), que indica que con estos niveles de concentración de CO<sub>2</sub> aumenta la apertura estomática, lo que facilita la transpiración y absorción de CO<sub>2</sub> (Xu *et al.*, 2016).

Al respecto, Vargas *et al.* (2012) reportaron que las tasas más altas de fotosíntesis se logran cuando las condiciones de temperatura oscilan entre 25 y 30 °C, con una humedad relativa en el intervalo de 30-40 %, además de mantener el déficit de presión de vapor por debajo de 2.5 kPa para garantizar la apertura estomática y facilitar la entrada de CO<sub>2</sub> en el interior de las hojas.

### 2.5.2. Variables morfológicas y peso seco

En el Cuadro 3 se muestra que en los ambientes con concentraciones de CO<sub>2</sub> de 500 a 700 y de 700 a 1000 ppm, la altura de plántula, el área foliar y el peso seco de plántula, fueron significativamente mayores con respecto al testigo. El mayor peso seco en estos tratamientos se debió a la mayor altura y área foliar formada por plántula, ya que en diámetro de tallo no hubo diferencias. Es posible que una mayor cantidad de fotoasimilados haya sido acumulada

**Cuadro 1. Temperatura y humedad relativa mínima y máxima en diferentes tratamientos de CO<sub>2</sub> aplicados en plántulas de tomate.**

Tratamiento (T)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
T1: plántulas con 420-460 ppm de CO <sub>2</sub>	25-31 ± 1	55-68 ± 1
T2: plántulas con 500-700 ppm de CO <sub>2</sub>	26-31 ± 1	56-74 ± 1
T3: plántulas con 700-1000 ppm de CO <sub>2</sub>	27-32 ± 1	53-64 ± 1
T4: plántulas con 317-402 ppm de CO <sub>2</sub> (testigo)	27-36 ± 1	47-50 ± 1

Manejo de las plantas de trasplante a cosecha

**Cuadro 2. Comparación de medias entre tratamientos de variables fisiológicas evaluadas en plántulas de tomate cultivar Paipai.**

Tratamiento (T)	TH (°C)	TA ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	CE ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	DPV (kPa)
T1 (plántulas con 420-460 ppm de CO <sub>2</sub> )	27.39 c	10.40 b	186.35 b	1.33 c
T2 (plántulas con 500-700 ppm de CO <sub>2</sub> )	28.87 b	14.04 a	240.25 a	1.47 bc
T3 (plántulas con 700-1000 ppm de CO <sub>2</sub> )	35.64 a	7.51 bc	162.36 b	1.8 ab
T4 (plántulas con 317-402 ppm de CO <sub>2</sub> ) <sup>†</sup>	28.31 bc	5.74 c	89.32 c	1.88 a
DSH (0.05)	0.95	3.01	43.03	0.36

<sup>†</sup>Testigo. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). ppm: partes por millón, CO<sub>2</sub>: bióxido de carbono, TH: temperatura de la hoja, TA: tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>, CE: conductancia estomática, DPV: déficit de presión de vapor, DSH: diferencia significativa honesta.

preferentemente en las hojas, lo que contribuyó a que las plantas sometidas a altas concentraciones de CO<sub>2</sub> tuvieran más área foliar, lo que se vio reflejado en un mayor peso seco, como también lo señalaron Rangaswamy *et al.* (2021).

Mamatha *et al.* (2014) encontraron mayor altura de planta en tomate con la concentración de 550 ppm de CO<sub>2</sub> que con 700, y concluyeron que el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta la altura de la planta hasta cierto punto, pero que por arriba de las 700 ppm de CO<sub>2</sub>, la altura tiende a disminuir, lo que es congruente con los resultados del presente estudio.

Los resultados indican que la concentración de CO<sub>2</sub> y el ambiente que se generó (temperatura y humedad relativa) en el interior en las cámaras de crecimiento tuvieron un impacto significativo en el desarrollo inicial de las plántulas al haber más carbono para la fotosíntesis (Cuadro 2), pues con la concentración de 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> se logró una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> neta, lo que condujo a la obtención de plántulas con alto vigor.

Otros autores han señalado que el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> puede mejorar el peso fresco y seco de las plántulas, así como la altura, grosor del tallo y el área foliar en plántulas de tomate, caracteres que le dan a la planta una apariencia robusta (Lenka *et al.*, 2017; Rangaswamy *et al.*, 2021).

### 2.5.3. Rendimiento y sus componentes

El análisis de varianza (datos no mostrados) y las comparaciones de medias (Cuadro 4) muestran diferencias significativas entre tratamientos para cada una de las variables del rendimiento evaluadas.

Los tratamientos con mayor concentración de CO<sub>2</sub> (500-700 ppm y 700-1000 ppm) tuvieron incrementos significativos en el número de flores por planta (23.9 y 21.9 flores, respectivamente) comparado con el testigo (19 flores por planta); es decir, que la adición de CO<sub>2</sub> en las plántulas de tomate permitió incrementar de tres a cuatro flores por planta.

El número de flores en la inflorescencia de tomate

**Cuadro 3. Comparación de medias entre tratamientos de variables de crecimiento evaluadas en plántulas de tomate cultivar Paipai.**

Tratamiento (T)	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Peso seco (g)
T1 (plántulas con 420-460 ppm de CO <sub>2</sub> )	41.8 b	4.78 b	193.48 b	1.16 b
T2 (plántulas con 500-700 ppm de CO <sub>2</sub> )	46.3 a	4.84 b	198.38 b	1.58 a
T3 (plántulas con 700-1000 ppm de CO <sub>2</sub> )	44.3 ab	5.26 a	242.94 a	1.85 a
T4 (plántulas con 317-402 ppm de CO <sub>2</sub> ) <sup>†</sup>	23.17 c	5.34 a	97.69 c	0.81 b
DSH (0.05)	4.25	0.39	43.00	0.52

<sup>†</sup>Testigo. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). ppm: partes por millón. CO<sub>2</sub>: bióxido de carbono, DSH: diferencia significativa honesta.

**Cuadro 4. Comparación de medias de tratamientos de variables del rendimiento y sus componentes evaluadas en plantas de tomate variedad Paipai.**

Tratamiento (T)	Número de flores/planta	Número de frutos/planta	Peso de fruto (g)	Rendimiento (kg/planta)
T1 (plántulas con 420-460 ppm de CO <sub>2</sub> )	22.0 b	19.2 ab	128.23 a	2.47 a
T2 (plántulas con 500-700 ppm de CO <sub>2</sub> )	23.9 a	21.0 a	123.47 a	2.60 a
T3 (plántulas con 700-1000 ppm de CO <sub>2</sub> )	21.9 b	20.9 a	124.48 a	2.58 a
T4 (plántulas con 317-402 ppm de CO <sub>2</sub> ) <sup>†</sup>	19.00 c	16.6 b	109.73 b	1.83 b
DSH (0.05)	1.9	2.9	12.59	0.43

<sup>†</sup>Testigo. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). ppm: partes por millón, CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono, DSH: diferencia significativa honesta

está influenciado por el genotipo y por las condiciones ambientales (Mamatha *et al.*, 2014; Rangaswamy *et al.*, 2021). Heuvelink y Okello (2018) mencionaron que un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> puede favorecer la floración, este efecto se atribuye a la disponibilidad de más fotoasimilados para los primordios de las flores en desarrollo, lo que favorece la producción de flores adicionales en cada inflorescencia, tal como se observó con las plántulas sometidas a 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> en el presente estudio. No obstante, con el aumento a 700-1000 ppm de CO<sub>2</sub> el número de flores por planta ya no se incrementó, posiblemente debido a un cambio en las condiciones generadas por otros factores del ambiente como la temperatura, que se incrementó 1 °C y la humedad relativa, que disminuyó en aproximadamente 5 % (Cuadro 1) al colocar dos velas en lugar de una en la cámara de crecimiento, lo que pudo provocar un cierre parcial de estomas y con ello provocar una disminución del intercambio gaseoso y aprovechamiento en la asimilación del CO<sub>2</sub> como lo señalan Šigut *et al.* (2015), pues como se observó en el Cuadro 2, estos cambios se manifestaron en un aumento significativo de la temperatura de la hoja, una disminución en la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y un incremento notable en el déficit de presión de vapor en comparación con el testigo, lo que influyó en el número de flores formadas por planta. Cabe destacar que el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>, por sí solo, induce resistencia estomática (Xu *et al.*, 2016).

Dado que la densidad de población establecida fue de 8 plantas m<sup>-2</sup> de invernadero (80,000 plantas/hectárea/ ciclo de cultivo), el aumento de tres o cuatro flores por planta resulta agrónomicamente relevante, ya que en cada m<sup>2</sup> se pueden producir hasta 32 frutos más, que con el peso promedio de 123.47 gramos obtenido, representa un incremento potencial de 40 t ha<sup>-1</sup> en un ciclo de cultivo de poco menos de cuatro meses de trasplante a fin de cosecha; es decir, hasta 120 toneladas más al año al exponer las plántulas de tomate a concentraciones de 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> durante un período de 15 días. Cabe señalar que la radiación solar difusa incidente de 500 a 1200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, registrada en el dosel de plantas en la etapa reproductiva, fue suficiente para la densidad de población establecida, como también lo mencionan Heuvelink y Dorais (2018).

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se llevó a cabo el presente estudio, los resultados permiten concluir que el enriquecimiento con CO<sub>2</sub> durante la iniciación floral en plántulas de tomate favorece la fotosíntesis, con lo que obtienen plántulas con calidad al trasplante, así como más flores y frutos por planta.

## 2.6. AGRADECIMIENTOS

El autor principal agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías por la beca concedida y al Posgrado en Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo por proporcionar las oportunidades necesarias para llevar a cabo la investigación durante el transcurso de los estudios de doctorado.

## 2.7. BIBLIOGRAFÍA

- Aslani L., M. Gholami, M. Mobli and M. R. Sabzalian (2020) The influence of altered sink-source balance on the plant growth and yield of greenhouse tomato. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 26:2109-2123, <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00891-2>
- Contreras-Magaña E., H. Arroyo-Pozos, J. Ayala-Arreola, F. Sánchez-Del-Castillo y E. C. Moreno-Pérez (2013) Caracterización morfológica de la diferenciación floral en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19:59-70, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.010>
- Glanz-Idan N. and S. Wolf (2020) Upregulation of photosynthesis in mineral nutrition-deficient tomato plants by reduced source-to-sink ratio. *Plant Signaling & Behavior* 15:1712543, <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1712543>
- Heuvelink E. and M. Dorais (2018) Crop growth and yield. In: Tomatoes. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:85-144, <https://doi.org/10.1079/9780851993966.0085>
- Heuvelink E. and R. C. O. Okello (2018) Developmental processes. In: Tomatoes. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:59-88, <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>
- Ji Y., D. Nuñez O., D. Choe, D. H. Larsen, L. F. M. Marcelis and E. Heuvelink (2020) Far-red radiation stimulates dry mass partitioning to fruits by increasing fruit sink strength in tomato. *New Phytologist* 228:1914-1925, <https://doi.org/10.1111/nph.16805>
- Lanoue J., E. D. Leonardos and B. Grodzinski (2018) Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science* 9:756, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00756>
- Lenka N. K., S. Lenka, J. K. Thakur, R. Elanchezian, S. B. Aher, V. Simaiya, ... and A. K. Patra (2017) Interactive effect of elevated carbon dioxide and elevated temperature on growth and yield of soybean. *Current Science* 113:2305-2310, <https://doi.org/10.18520/cs/v113/i12/2305-2310>
- León-Burgos A. F., G. Y. Beltrán C., A. L. Barragán P. and H. E. Balaguera-López (2021) Distribución de fotoasimilados en los órganos vertederos de plantas Solanaceas, caso tomate y papa. Una revisión. *Revista Ciencia y Agricultura* 18:79-97, <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13566>
- Li X. J., S. Z. Kang, F. S. Li, X. T. Zhang, Z. L. Huo, R. S. Ding and S. E. Li (2017) Light supplement and carbon dioxide enrichment affect yield and quality of off-season pepper. *Agronomy Journal* 109:2107-2118, <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0044>
- Mamatha H., N. K. S. Rao, R. H. Laxman, K. S. Shivashankara, R. M. Bhatt and K.C. Pavithra (2014) Impact of elevated CO<sub>2</sub> on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica* 52:519-528, <https://doi.org/10.1007/s11099-014-0059-0>
- Mejía-Betancourt F. A., F. Sánchez-del Castillo, E. C. Moreno-Pérez y L. González-Molina (2023) Esquejes enraizados, una alternativa para la producción de jitomate bajo invernadero en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14:389-399, <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3038>
- Momokawa N., Y. Kadono and H. Kudoh (2011) Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany* 108:1299-1306, <https://doi.org/10.1093/aob/mcr236>
- Moreno-Pérez E. C., F. Sánchez-del Castillo, L. González-Molina, E. Contreras-Magaña y R. U. Messina-Fernández (2016) Métodos de enraizamiento de esquejes para la producción de jitomate

- (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico. *Agroproductividad* 9:50-55.
- Moreno-Pérez E. C., F. Sánchez-del Castillo, M. Ruiz-Díaz and E. Contreras- Magaña (2021)** Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27:5-17, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>
- Pan T., Y. Wang, L. Wang, J. Ding, Y. Cao, G. Qin, ... and Z. Zou (2020)** Increased CO<sub>2</sub> and light intensity regulate growth and leaf gas exchange in tomato. *Physiologia Plantarum* 168:694-708, <https://doi.org/10.1111/ppl.13015>
- Rangaswamy T. C., S. Sridhara, N. Ramesh, P. Gopakkali, D. O. El-Ansary, E. A. Mahmoud, ... and A. M. E. Abdel-Hamid (2021)** Assessing the impact of higher levels of CO<sub>2</sub> and temperature and their interactions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants* 10:256, <https://doi.org/10.3390/plants10020256>
- Rodrigues J., D. Inzé, H. Nelissen and N. J. M. Saibo (2019)** Source-sink regulation in crops under water deficit. *Trends in Plant Science* 24:652-663, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.04.005>
- Salvucci M. E., K. W. Osteryoung, S. J. Crafts-Brandner and E. Vierling (2001)** Exceptional sensitivity of Rubisco activase to thermal denaturation *in vitro* and *in vivo*. *Plant Physiology* 127:1053-1064, <https://doi.org/10.1104/pp.010357>
- Sánchez C. F. y E. C. Moreno P. (2017)** Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México. 432 p.
- Sánchez-Del Castillo F., E. C. Moreno-Pérez, A. Morales-Maza, A. Peña-Lomelí y M. T. Colinas-León (2012)** Densidad de población y volumen de sustrato en plántulas de jitomate (*Lycopersicon lycopersicon* Mill.). *Agrociencia* 46:255-266.
- Sánchez-Del Castillo F., O. A. Bastida-Cañada, E. C. Moreno-Pérez, E. Contreras- Magaña y J. Sahagún-Castellanos (2014)** Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 20:239-251, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.10.037>
- Sánchez-Del Castillo F., L. Portillo-Márquez, E. C. Moreno-Pérez, J. J. Magdaleno-Villar y J. C. Vázquez-Rodríguez (2021)** Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27:71-84, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- Šigut L., P. Holišová, K. Klem, M. Šprtová, C. Calfapietra, M. V. Marek, ... and O. Urban (2015)** Does long-term cultivation of saplings under elevated CO<sub>2</sub> concentration influence their photosynthetic response to temperature? *Annals of Botany* 116:929-939, <https://doi.org/10.1093/aob/mcv043>
- Vargas S. J. M., I. L. López C. y E. Rico G. (2012)** Estimación de la fotosíntesis foliar en jitomate bajo invernadero mediante redes neuronales artificiales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:1289-1304, <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1334>
- Vitale A., M. Rocco, S. Arena, F. Giuffrida, C. Cassaniti, A. Scaloni, ... and C. Leonardi (2014)** Tomato susceptibility to Fusarium crown and root rot: effect of grafting combination and proteomic analysis of tolerance expression in the rootstock. *Plant Physiology and Biochemistry* 83:207-216, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.006>
- Xu Z., Y. Jiang, B. Jia and G. Zhou (2016)** Elevated-CO<sub>2</sub> response of stomata and its dependence on environmental factors. *Frontiers in Plant Science* 7:657, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00657>
- Yamori W., K. Hikosaka and D. A. Way (2014)** Temperature response of photosynthesis in C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research* 119:101-117, <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>

Como se envió a la Revista Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca –

**CAPITULO III. RHIZOSPHERE TEMPERATURE MODIFIES TOMATO  
SEEDLING GROWTH AND FLOWERING**

# RHIZOSPHERE TEMPERATURE MODIFIES TOMATO SEEDLING GROWTH AND FLOWERING

Esaú del C. Moreno-Pérez<sup>1</sup>, Francisca de los Á. Mejía-Betancourt<sup>2</sup>, Felipe Sánchez-Del Castillo<sup>1\*</sup>, J. Jesús Magdaleno-Villar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, departamento de fitotecnia, Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco 56230, Estado de México, México; [esaump10@yahoo.com.mx](mailto:esaump10@yahoo.com.mx); [fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx](mailto:fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx) (\*corresponding autor); [jmagdalenovillar8@gmail.com](mailto:jmagdalenovillar8@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidad Nacional Agraria, Departamento de Producción Vegetal, Carretera norte-Managua km.12.5, Managua 453, Nicaragua; [franciscabetancourt@hotmail.com](mailto:franciscabetancourt@hotmail.com)

---

## 3.1. Abstract

The number of flowers in a tomato (*Solanum lycopersicum* L.) inflorescence is determined genetically. However, this trait can be modified by environmental conditions, which can influence floral differentiation. The objective was to determine the effect of root environment temperature during the phase of initial flowering of the first three inflorescences on seedling growth and number of flowers and fruits per plant in two tomato varieties ('Condor' with Roma-type fruits, and 'Cedral' with globe fruits). We tested the temperatures 9-12 °C, 12-15 °C, 15-18 °C and 18-21 °C. The seedlings grew in trays with 200 cm<sup>3</sup> cavities filled with a mixture of peat moss and perlite in a volumetric proportion of 1:1. Irrigation with nutritive solution at the temperature of each treatment was applied every hour from 9:00 to 17:00 h. Transplant was 34 days after sowing, establishing 6 plants m<sup>-2</sup> of greenhouse area. The growing tip was eliminated to harvest only three clusters. The experimental design was complete randomized blocks with four replications; the data obtained were subjected to an analysis of variance and mean comparison test (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). In the two varieties, temperatures between 15 and 21 °C promoted greater seedling growth than temperatures between 9 and 15 °C. The largest number of flowers and fruits per plant were achieved with temperatures between 12 and 18 °C. We concluded that the temperature of the tomato seedling root modifies plant growth and number of flowers and fruits formed per plant.

**Keywords:** flower primordia; high plant density; low temperatures; seedlings; tomato varieties.

---

## 3.2. Introduction

Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) are the vegetable most cultivated in greenhouses in Mexico (USDA, 2024). Under a production system that consists of lengthening the seedbed phase up to 50 days after seeding, by removing the shoot tip and leaving only three clusters on each plant and managing high plant density (6 to 8 plants m<sup>-2</sup>), shorter crop cycles have been achieved (Mejía et al., 2023). A crop cycle of less than 120 days from transplant to harvest has allowed three crop cycles per year under greenhouse conditions with medium technology (Sánchez et al., 2012). Using hydroponic systems with substrate, yields of 500 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> have been reported (Sánchez et al., 2017; Moreno et al., 2021). Given that under this management system yield depends on harvesting only three clusters from each plant (Ramos et al., 2020), the number of flowers and fruits formed in each inflorescence and the mean weight achieved per fruit are determinant for yield per unit of area, especially because of the potential of this system to achieve three crop cycles per year (Sánchez et al., 2021).

To highlight the importance of increasing the number of flowers per cluster under a production system like that described, we present the following example. If it were possible to produce one more fruit

weighing 150 g on each cluster at a density of seven plants  $m^{-2}$  per cycle and three cycles per year, there would be an increase of three fruits per plant, or 21 fruits  $m^{-2}$  per cycle, 63 fruits more per year in three cycles. That is, an increase in yield of  $63 \times 0.15 \text{ kg} = 9.45 \text{ kg } m^{-2} \text{ year}^{-1}$  equivalent to almost  $100 \text{ t } ha^{-1} \text{ year}^{-1}$  in addition to the yield in normal conditions.

The number of flowers in a tomato inflorescence is determined in part by genetics (Bernier and Périlleux, 2005); Wigge and Jaeger, 2020). However, it is known that this trait can be modified by the environmental conditions in which it grows (Quintana et al., 2010; Heuvelink and Okello, 2018), particularly by effect of conditions of light, temperature,  $CO_2$ , and mineral nutrition, among others (Mamatha *et al.*, 2014; Lanoue *et al.*, 2018; Rangaswamy *et al.*, 2021), that prevail during the sensitive period, or that of floral differentiation of the first three inflorescences, which begins approximately eight days after expansion of the cotyledons and extends some two weeks more to influence also expression of the second and third inflorescences in formation (Contreras *et al.*, 2013; Heuvelink and Okello, 2018). The above example underlines the importance of studying the factors involved to favor the formation of a larger number of flowers and fruits per cluster, which means higher yield per plant and per unit of area (Contreras *et al.*, 2013; Moreno *et al.*, 2021; Sánchez *et al.*, 2021).

It has been reported that with average temperatures of the aerial part below  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  during the period of initial flowering, rachis ramification is favored, generating more flowers per inflorescence (Fernández and Johnston, 2006). Likewise, a relatively low temperature in the root zone contributes to increase the number of flowers per cluster (Fujishige, 1991). This behavior is possibly related to modifications in the process of cell respiration, since relatively lower temperatures result in a lower respiration rate, which is reflected in slow growth of the vegetative part, as mentioned by Yang *et al.* (2020), permitting that more sugars from photosynthesis remain available to sustain growth of developing floral primordia (Heuvelink *et al.*, 2020) and, with this, a decrease in the abortion rate (Heuvelink et al., 2018; He *et al.*, 2014). It is worth underlining that the root is crucial for absorption of water and nutrients, which, in turn, impacts production of aerial biomass (Cooper, 1973; He *et al.*, 2014).

Numerous studies have approached the importance of temperature in tomato plant growth, but very few have focused on the influence of temperature in the root zone on growth and production of this crop (Fujishige, 1991). For this reason, this study had the objective of determining the range of temperatures that, applied during the floral initiation stage of the first three inflorescences, causes more flowers per plant.

### 3.3. Materials and Methods

#### 3.3.1. Study site

The seedlings were managed in a greenhouse located in the experimental station of the Universidad Autónoma Chapingo. The greenhouse is covered with high light dispersion thermal polyethylene and has lateral movable curtains, anti-aphid screens, heating system and moist wall with extractors to control internal temperature and relative humidity to a certain extent. After transplant, plants were managed in another  $1000 \text{ m}^2$  greenhouse with characteristics similar to those of the greenhouse used in the seedling stage.

#### 3.3.2. Treatments and experimental design

We used two tomato varieties obtained from the company Ahern Seeds: 'Condor' with an indeterminate growth habit and Roma type fruits and 'Cedral' also of indeterminate growth but with globe type fruit. Each variety was set up as an independent experiment, in both cases the experimental design was complete randomized blocks with four replications. The experimental unit consisted of 10 plants, both in the seedbed phase and the reproductive stage.

In each experiment, we tested four treatments (T) of root zone temperature ranges applied during the sensitive period of floral initiation of the first three inflorescences of the seedlings (between 15 and 34 days after seeding): T1 =  $9\text{-}12 \text{ }^\circ\text{C}$ , T2 =  $12\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$ , T3 =  $15\text{-}18 \text{ }^\circ\text{C}$  and T4 =  $18\text{-}21 \text{ }^\circ\text{C}$ . We endeavored to maintain the temperature at the lowest value of the range established in each treatment as long as possible. To this

end, in a 20 L recipient containing nutrient solution was kept refrigerated (2.5 - 4°C), and in a 200 L tank the nutrient solution was kept at ambient temperature (between 16 and 19 °C). With these two sources, we made mixtures of different proportions for continuous irrigation that allowed maintaining the root ambient temperature between irrigations. The mixture of refrigerated solution with the solution kept at ambient temperature at a ratio of 2:1 maintained a temperature range of 9 to 12°C. For temperature of 12 to 15 °C, we used a mixture with a 1:2 ratio. A ratio of 1:4 provided an ambient temperature in the range of 15 to 18 °C, while for the treatment of 18 to 20°C, we used the nutrient solution directly from the 200 L tank. On rainy and cloudy days, when the temperature of the solution of the tank descended below 18 °C, we used an electric resistance to heat the solution to reach the temperature corresponding to the last treatment.

### 3.3.3. Experimental conditions

Seeding was done in 60-cavity trays (200 cm<sup>3</sup> volume per cavity) filled with a mixture of peat moss + perlite as the substrate in a 1:1 (v:v) proportion. One seed was planted in each cavity. Irrigation with nutrient solution at the temperature corresponding to each treatment was applied every hour from 9:00 to 17:00 h. A digital thermometer (Tylor® digital, model 9840) was placed 10 cm deep in the tray cavities to monitor temperature values and corroborate the temperature of each treatment.

The nutritive solution applied during the first 15 days after emergence contained the following nutrients and concentrations (mg L<sup>-1</sup>): N = 100, P = 25, K = 125, Ca = 125, S = 75, Mg = 25, Fe = 1, Mn = 0.1, Cu = 0.1, Mn = 1, B = 0.5 and Zn = 0.1. As fertilizer sources we used: calcium nitrate, 75% phosphoric acid, potassium sulfate, magnesium sulfate, iron sulfate, manganese sulfate, copper sulfate, boric acid and zinc sulfate. After this period and up to the end of the crop cycle, the nutrient solution was applied at double the above concentrations.

### 3.3.4. Evaluated variables

We measured the following in seedlings 34 days after sowing:

- 1) Height, measured in cm from the stem base to the apical meristem with a tape measure.
- 2) Stem diameter, measured in mm between the second and third leaf with an electronic vernier.
- 3) Root volume, measured in cm<sup>3</sup>, using the method of water displacement, consisting of submerging all the roots, previously washed, in a known volume of water contained in a test tube.
- 4) Root length, measured in cm with a tape measure from the root collar to the apical zone.
- 5) Leaf area of each seedling, measured in cm<sup>2</sup> with a leaf area integrator (LI-COR®, LI-3000A, USA).
- 6) Dry weight, measured in grams, after drying in an oven at 70 °C to constant weight, with an electro-analytical balance (Ohaus® MC-173467, New Jersey, USA).

### 3.3.5. Agronomic management after transplanting

At the beginning of harvest (105 das), we recorded plant height, stem diameter (measured between the second and third cluster), and leaf area per plant by destructive sampling using a leaf area integrator (LI-3000a). Leaf area index was calculated by multiplying the leaf area per plant by the number of plants m<sup>-2</sup>. Later, we quantified the number of flowers and fruits per plant, mean fruit weight (g) and yield (kg/plant).

Thirty-four days after sowing, seedlings were transplanted to grow beds filled with red volcanic sand (tezontle) using particles from 1 to 3 mm in diameter. The plants were established in two rows per bed at a density of 6 plants m<sup>-2</sup> of greenhouse area. To prevent plants from falling, a raffia string was tied to each plant with support clips on the same day they were transplanted.

From the time of transplant, the plants were drip irrigated using a flexible polyethylene tape with integrated emitters every 20 cm and the nutrient solution mentioned above.

When the first flowers appeared and anthesis began, the wires that supported the string tutors were shaken daily from 9:00 to 11:30 h to promote vibrations and favor pollination.

Once the plants had formed the first three inflorescences (80 to 90 das), the terminal bud was eliminated two leaves above the third inflorescence formed. This was done with scissors previously disinfected with quaternary ammonium salts (45% Anibac® Plus).

When the fruits of the first cluster were completely formed and developed, the lower leaves were pruned to improve aeration between the plants, leaving a single leaf below the first cluster.

### 3.3.6. Statistical analysis

The data obtained for each variety were analyzed with an analysis of variance (ANOVA) and a Tukey comparison of means test ( $P \leq 0.05$ ). These were performed using the statistical program Statistical Analysis System for Windows 9.0 (SAS, 2002).

## 3.4. Results and discussion

In the measurement 34 days after sowing, it was found that in the two varieties, the highest temperatures tested (15-18 °C and 18-21 °C) promoted greater seedling growth than the lower temperatures (9-12 °C and 12-15 °C), expressed in a significant increase in height, stem diameter, leaf area and root volume (Table 1).

It has been reported that, with low temperatures in the above ground environment, plants reduce their respiratory activity, resulting in slower growth (Venema *et al.*, 2008; He *et al.*, 2014; Heuvelink and Okello, 2018). Surely, the root ambient temperature had this effect, causing less growth of plants watered with nutritive solution at temperatures below 15 °C.

Root length was not modified by temperature, but root volume increased gradually as temperatures increased, due mainly to growth of more secondary roots. Similarity in root length among the treatments could be due to the limited dimensions of the cavities of the trays where the seedling grew, while a warmer ambient encouraged greater growth of secondary roots (Pereira *et al.*, 2021).

**Table 1.** Comparison of means of growth variables in 34 days old tomato seedlings of the varieties 'Condor' and 'Cedral', cultivated with different temperatures in the root zone

Treatment (Rhizosphere temperature)	Height (cm)	Stem diameter (mm)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Root length (cm)	Root volume (cm <sup>3</sup> )
<b>Variety 'Condor' (Roma type)</b>					
T1 (9-12 °C)	9.61 b	3.69 b	111.39 c	21.46 a	1.15 c
T2 (12-15 °C)	11.39 b	3.89 b	181.26 b	21.38 a	1.83 bc
T3 (15-18 °C)	16.05 a	4.68 a	234.43 a	22.80 a	2.43 ab
T4 (18-21 °C)	17.54 a	4.46 a	235.99 a	22.11 a	2.85 a
LSD	2.29	0.54	43.76	2.46	0.78
<b>Variety 'Cedral' (globe type)</b>					
T1 (9-12 °C)	11.60 c	4.0 c	127.72 b	21.04 a	0.75 c
T2 (12-15 °C)	13.39 c	4.40 bc	178.97 b	20.66 a	1.53 b
T3 (15-18 °C)	16.68 b	4.84 ab	293.86 a	21.70 a	2.05 a
T4 (18-21 °C)	19.91 a	5.19 a	270.25 a	21.68 a	2.28 a
LSD	1.79	0.55	72.31	1.70	0.42

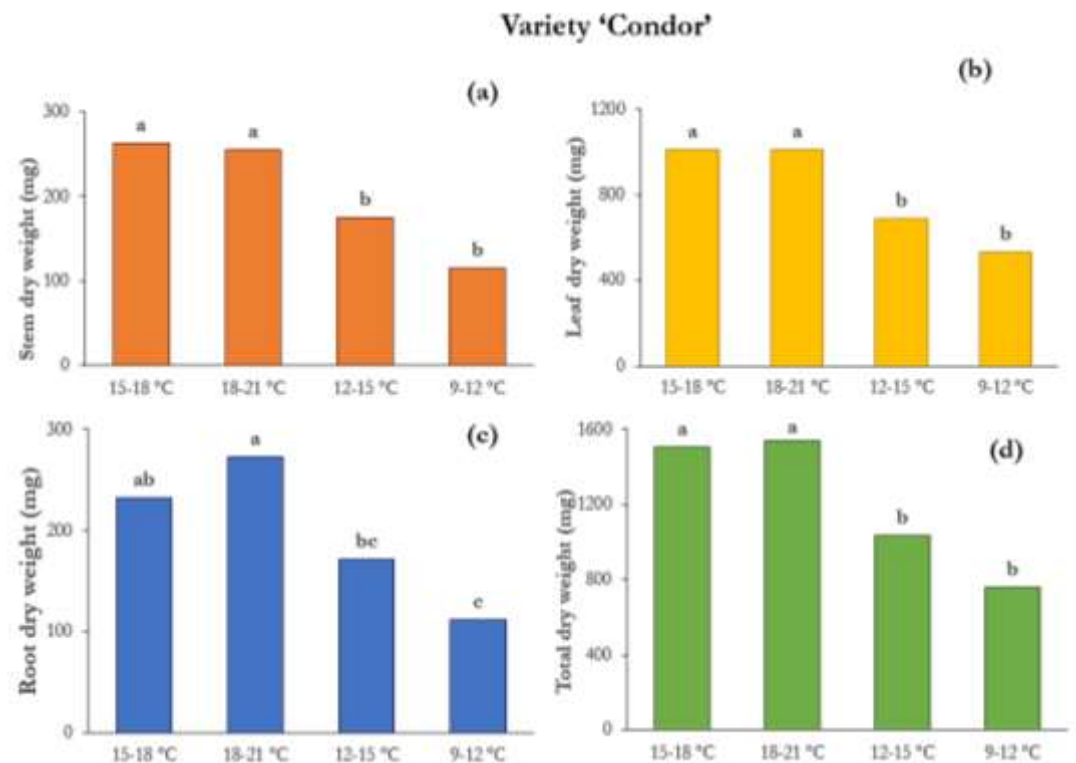
Values in a column with the same letter are equal, according to Tukey ( $P \leq 0.05$ ), LSD = least significant difference

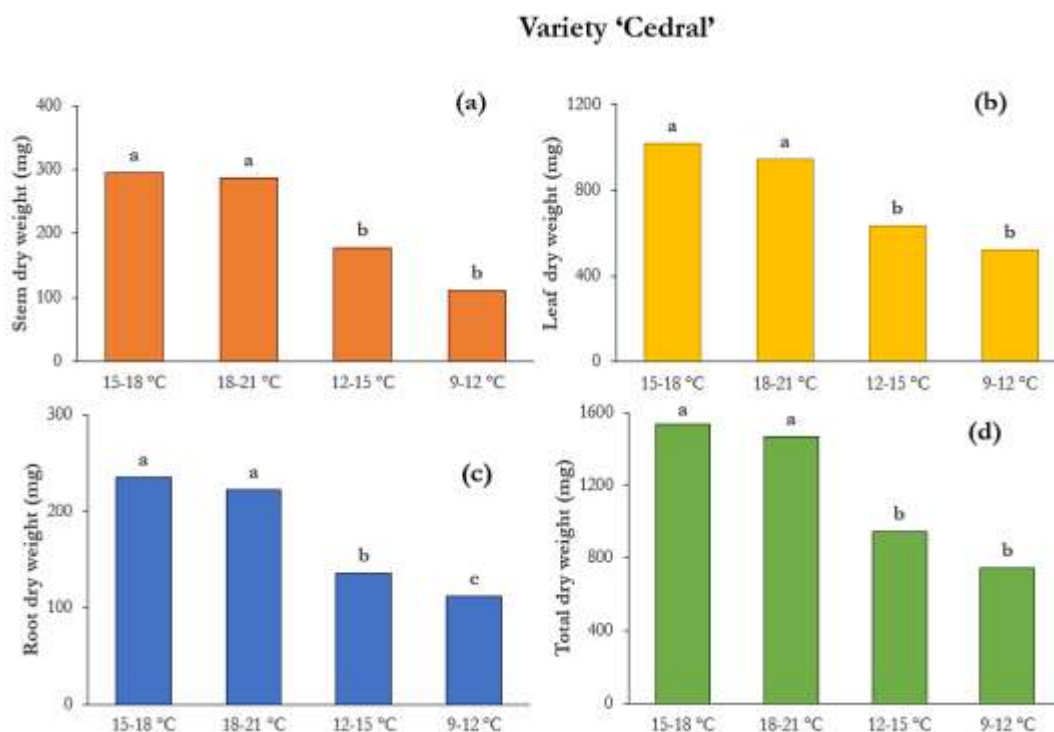
Figure 1 shows that plants grown in the two higher temperature conditions in the rhizosphere (treatments 15-18 °C and 18-21 °C) had heavier dry leaf, stem and root weight, resulting in a higher total dry weight ('Condor', 1505.5 and 1537.5 mg, respectively, and 'Cedral' 1535 and 1465 mg, respectively) that was statistically different relative to the values of the cooler temperature treatments (9-12 °C and 12-15 °C), in which growth of each organ was limited, leading to a reduction in total accumulated biomass. In this respect, Van-der-Ploeg *et al.* (2007) and Pereira *et al.* (2023) mention that when plants are exposed to

low temperatures, either above ground or in the root zone, growth of all plant organs is suppressed; this undoubtedly occurred with the plants in our study.

For both varieties, the effect of the root temperature treatments applied during the seedling stage on morphological variables persisted until the beginning of harvest (115 das) for the measurements of plant height and leaf area, which was expressed as leaf area index. However, there was statistically significant difference only between the lowest temperature treatment and the highest temperature treatment (Table 2). In stem diameter, plant width, and total dry weight, there was no difference, except for dry weight of the ‘Cedral’ variety, which was higher in the treatment with the highest temperature, relative to that found with the lowest temperature.

All the plants were pruned at the height of the third raceme, resulting in compact plants, particularly those of the Roma-type variety (‘Condor’), which at 115 das with the low root temperature treatments (9-12 °C and 12-15 °C) grew to only 77.2 and 80.0 cm high, respectively. This characteristic is favorable for plant management at high population densities. The leaf area index (LAI) between 4.6 and 5.0 in the ‘Condor’ variety is appropriate for the crop at the established plant density of 6 plants m<sup>-2</sup> of greenhouse area. According to Heuvelink *et al.* (2018) and Heuvelink *et al.* (2020), with an LAI of 4, a more uniform distribution of photosynthetically active radiation over the plants is achieved, leading to a high photosynthetic rate (Sánchez *et al.*, 2021). This aspect is improved with the use of high light diffusion polyethylene covering like that used in our experiments (Sánchez & Moreno, 2017). The higher LAI in the variety ‘Cedral’ is due to genetic traits of the variety, which is normally of high vigor (Alvarado and Legaria, 2022).





**Figure 1.** Effect of seedling rhizosphere temperature on stem dry weight (a), leaf dry weight (b), root dry weight(c) and total dry weight (d) of two tomato varieties 34 days after sowing. Vertical bars with the same letter(s) for each variety are not significantly different (Tukey,  $P \leq 0.05$ )

**Table 2.** Comparison of treatment means of growth variables evaluated at the beginning of harvest in the tomato varieties 'Condor' and 'Cedral'.

Treatment (Rhizosphere Temperature)	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Leaf area index ( $m^2/m^2$ )	Plant width (cm)	Plant dry weight (g)
<b>Variety 'Condor' (Roma type)</b>					
T1 (9-12 °C)	77.23 b	13.16 a	4.60 b	37.14 a	96.90 a
T2 (12-15 °C)	80.02 ab	13.18 a	4.97 ab	35.94 a	86.09 a
T3 (15-18 °C)	82.28 ab	12.87 a	5.01 ab	37.24 a	82.49 a
T4 (18-21 °C)	94.08 a	13.84 a	6.06 a	35.72 a	87.75 a
LSD	14.76	1.85	1.40	8.09	38.04
<b>Variety 'Cedral' (globe type)</b>					
T1 (9-12 °C)	123.30 b	16.41 a	5.0 b	33.52 a	65.09 c
T2 (12-15 °C)	131.10 a	16.91 a	6.21 ab	36.67 a	76.25 ab
T3 (15-18 °C)	131.77 a	16.65 a	5.91 ab	36.42 a	73.59 b
T4 (18-21 °C)	136.21 a	16.40 a	6.64 a	37.21 a	81.76 a
LSD	7.77	3.36	1.46	5.12	7.21

Values in a column with the same letter are equal, according to Tukey ( $P \leq 0.05$ ), LSD = least significant difference

On the other hand, we found that the largest number of flowers per plant (Table 3) was achieved at seedling rhizosphere temperatures between 12 and 15 °C (with 28 and 33 flowers in 'Condor' and 'Cedral', respectively) and between 15 and 18 °C (27 and 33 flowers in 'Condor' and 'Cedral', respectively). In contrast, with temperatures below 12 °C, there was a significant reduction in the number of flowers per plant in both varieties. This result can be explained by the reduction in respiration rate of seedlings at

rhizosphere temperatures below 12 °C (Heuvelink *et al.*, 2020), negatively affecting the formed leaf area and, in turn, limiting photosynthetic capacity (Yang *et al.*, 2020). As a result, the production of photo-assimilates is reduced, directly affecting the set of developing floral primordia. In contrast, when temperatures are between 12 and 15 °C, although the respiration rate is relatively low, the formed leaf area did not decrease (181 cm<sup>2</sup> in the variety ‘Cónдор’ and 179 cm<sup>2</sup> in the variety ‘Cedral’), and so photosynthesis was sufficient for the synthesis of the sugars necessary for setting a larger number of floral primordia, preventing their abortion, and probably led to the formation of more flowers per plant (Heuvelink and Okello, 2018). With temperatures between 15 and 18 °C, this effect was not observed since the leaf area (234 and 294 cm<sup>2</sup> in the varieties ‘Condor’ and ‘Cedral’, respectively) was statistically equal in the treatment with high temperature.

He *et al.* (2014) and Guo *et al.* (2023) point out that, when tomato seedlings are exposed to low temperatures, they tend to produce larger cells, which allow them to store a larger quantity of sugars in the form of starch, and they have a relatively lower vegetative growth rate that permits greater floral primordia. Likewise, Heuvelink and Okello (2018) mentions that, although tomatoes are considered a tropical species, sensitive to cold, when their root is exposed to moderately low temperatures in the presence of high solar radiation, the demand for carbohydrates can decrease for vegetative growth and a larger proportion of carbohydrates can be directed to the process of floral initiation.

The larger number of flowers per plant in the treatment of 12 to 15 °C also resulted in a larger number of fruits per plant (26 in the variety ‘Condor’ and 27 in the variety ‘Cedral’), with statistical differences relative to the treatment with the lowest temperatures (9-12 °C). Unfortunately, the increased number of fruits per plant caused a decrease in mean fruit weight, because of an effect of competition for sugars among the fruits that are growing simultaneously on the same cluster, as pointed out by Alvarado and Legaria (2021). For this reason, the final yield was statistically equal in all the treatments. The challenge remains to find appropriate crop management that would allow maintaining a high number of fruits per plant without affecting mean weight and, in this way, achieve a significant increase in final yield.

In any case, it is to be highlighted that the yield achieved in all the treatments was very high, more than 3 kg/plant (18 kg m<sup>-2</sup>) in the variety ‘Condor’ in a crop cycle that lasted 100 days from transplant to the end of harvest, and more than 7 kg/plant (42 kg m<sup>-2</sup>) in the variety ‘Cedral’, in a crop cycle of 120-days. By establishing three short crop cycles a year, yearly yields of more than 500 t ha<sup>-1</sup> of the Roma variety ‘Condor’ and more than 1200 t ha<sup>-1</sup> of the globe variety ‘Cedral’ can be achieved. These yields are even higher than those reported by Heuvelink *et al.* (2018) in high-technology greenhouses with highly sophisticated hydroponic systems.

**Table 3.** Comparison of treatment means of the variables of yield and its components evaluated in tomato plants of the varieties ‘Condor’ and ‘Cedral’.

Treatment (Rhizosphere Temperature)	Number of flowers/plant	Number of fruits/plant	Mean fruit weight (g)	Yield (kg/planta)
<b>Variety ‘Condor’ (Roma type)</b>				
T1 (9-12 °C)	22.9 c	22.5 b	155 a	3.49 a
T2 (12-15 °C)	28.4 a	25.9 a	140 b	3.63 a
T3 (15-18 °C)	26.5 ab	24.3 ab	139 b	3.39 a
T4 (18-21 °C)	23.4 bc	23.3 ab	154 a	3.60 a
LSD	3.4	3.1	12.9	0.48
<b>Variety ‘Cedral’ (globe type)</b>				
T1 (9-12 °C)	26.7 b	22.1 b	326 a	7.20 a
T2 (12-15 °C)	32.6 a	26.6 a	291 a	7.73 a
T3 (15-18 °C)	33.0 a	24.5 ab	294 a	7.17 a
T4 (18-21 °C)	28.9 ab	23.3 ab	311 a	7.24 a
LSD	5.8	4.0	69.0	1.72

Values in a column with the same letter are equal, according to Tukey ( $P \leq 0.05$ ), LSD = least significant difference

### 3.5. Conclusions

Under the conditions that this experiment was conducted, we can conclude that, with temperatures of 9-12 °C in the rhizosphere of Roma and globe type tomato seedlings in the nursery stage, vegetative growth and, later, the number of flowers and fruits per plant decreases. At tomato seedling root ambient temperatures between 12 and 18 °C, a larger number of flowers and fruits per plant with the first three clusters can be achieved, with both varieties 'Condor' (Roma type) and 'Cedral' (globe type).

### 3.6. Authors' Contributions

E.C.M.P. wrote the research project, participated in designing the experiments and in supervising their execution, and was responsible for writing the article. F.M.B. conducted the experiments, collected, organized and analyzed the data, and participated in writing the article. F.S.C. participated in writing the research project and designing the experiments, supervised the organization and analysis of data, and contributed to writing the article. J.M.V. supervised the experimental part of the project. All the authors read and approved the final manuscript.

### 3.7. Ethical approval (for researches involving animals or humans)

Not applicable.

### 3.8. Acknowledgements

The authors are grateful to Dirección General de Investigación y posgrado (DGIP) of the Universidad Autónoma de for the funding granted to carry out this study.

### 3.9. Conflict of Interests

The authors declare that there are no conflicts of interest.

### 3.10. References

- Alvarado RRI, Legaria SJP (2022) Phenotypic diversity in 15 wild populations of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agro Productividad* 13(3):41-53. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i5.2173>
- Contreras ME, Arroyo PH, Ayala AJ, Sánchez DCF, Moreno PEC (2013) Caracterización morfológica de la diferenciación floral en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Morphological characterization of floral differentiation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19(4):59-70. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.010>
- Cooper AJ (1973) Root temperature and plant growth: a review. Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Fernández G, Johnston M (2006) Crecimiento y Temperatura: In: Squeo FA, Cardemil L (Eds). *Fisiología Vegetal*. Universidad de La Serena, Chile, pp 1-28.

- Fujishige N, Sugiyama T, Ogata R (1991) Effect of root temperature on the flower formation and fruit yield of tomatoes. *Engei Gakkai Zasshi* 60(1):97-103. <https://doi.org/10.2503/jjshs.60.97>
- Guo SX, Dai ZM, Yang R, Ji C, Shi Y, Zhang Y (2023). Effects of nano-Si on tomato plant growth and carbohydrates accumulation at low temperature. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 31(5): 742-749. <https://doi.org/10.12357/cjea.20220773>
- He Y, Yang J, Zhu B, Zhu ZJ (2014) Low root zone temperature exacerbates the ion imbalance and photosynthesis inhibition and induces antioxidant responses in tomato plants under salinity. *Journal of Integrative Agriculture* 13(1): 89-99. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60586-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60586-9)
- Heuvelink E, Li T, Dorais M (2018) Crop growth and yield. In: Heuvelink E (Ed). *Tomatoes*, CABI International, Boston, USA, pp 89-136.
- Heuvelink E, Okello RCO, Peet M, Giovanoni JJ, Dorais M (2020) Tomato. In: Wien HC, Stützel H (Eds). *The physiology of vegetable crops*, CABI International, 2nd ed, Boston, USA, pp. 138-178.
- Heuvelink E, Okello, RCO (2018) Developmental processes. In: Heuvelink E (Ed). *Tomatoes*, CABI International, Boston, USA, pp. 59-88.
- Lanoue J, Leonardos ED, Grodzinski B (2018) Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science* 9: 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00756>
- Mamatha H, Srinivasa-Rao NK, Laxman RH, Shivashankara KS, Bhatt RM, Pavithra KC (2014) Impact of elevated CO<sub>2</sub> on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica* 52: 519-528. <https://doi.org/10.1007/s11099-014-0059-0>
- Mejía BFA, DCF, Moreno PEC, González ML (2023) Esquejes enraizados, una alternativa para la producción de jitomate bajo invernadero en ciclos cortos (Rooted cuttings, an alternative for tomato production under greenhouse in short cycles). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14:389-399. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3038>
- Moreno PEC, Sánchez DCF, Ruiz DM, Contreras ME (2021) Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27(1):5-17. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>
- Pereira CS, Oliveira D, Fiorini IVA, Silva AdaS (2021) Diferentes temperaturas de água de irrigação na cultura do feijoeiro (Different irrigation water temperatures in common bean cultivation). *Tecno-Lógica* 25(2):279-284. <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v25i2.15924>
- Pereira CS, Sampaio PdoC (2023) Diferentes temperaturas da água de irrigação na cultura da soja (Different irrigation water temperatures in soybean cultivation). *Scientific Electronic Archives* 17(1): 22-27. <https://doi.org/10.36560/17120241840>
- Quintana BRA, Balaguera LHE, Álvarez HJG, Cárdenas HJF (2010) Efecto del número de racimos por planta sobre el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 4(2): 199-208.
- Ramos FJ, Ayala GOJ, Pérez GM, Sánchez DCF, Magdaleno VJJ (2020). Efecto del paclobutrazol sobre el crecimiento de la planta, rendimiento y calidad del fruto en tomate. *Bioagro* 33(1):59-64. <https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/3024>
- Rangaswamy T C, Sridhara S, Ramesh N, Gopakkali P, El-Ansary DO, Mahmoud EA, Abdel-Hamid AME (2021) Assessing the impact of higher levels of CO<sub>2</sub> and temperature and their interactions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants* 10:1-14. <https://doi.org/10.3390/plants10020256>
- Sánchez DCF, Moreno PEC (2017) Diseño agronómico y manejo de invernaderos (Agronomic Design and Greenhouse Management). Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México.
- Sánchez DCF, Moreno PEC, Contreras ME (2012) Development of alternative commercial production of vegetables in hydroponics systems I: Tomato. *Acta Horticulturae* 947:179-187. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.22>
- Sánchez DCF, Moreno PEC, Pastor ZOA, Contreras ME (2017) Disposición de plantas de tomate en doseles en forma de escalera bajo dos densidades de población (Arrangement of tomato plants in ladder-shaped canopies under two population densities). *Revista Fitotecnia Mexicana* 40(3): 333-340, <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.3.333-340>
- Sánchez DCF, Portillo ML, Moreno PEC, Magdaleno VJJ, Vázquez RJC (2021) Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate (Effects of container volume and seedling density on late transplanting and number of flowers in tomato). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27(2):71-84. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- SAS Institute Inc (2002). SAS/STAT® 9.1. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.

- USDA (2024) United States Department of Agriculture. Tomatoes and products annual: Mexico 2024 report. Retrieved 2024 mayo 15 from [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Tomatoes%20and%20Products%20Annual\\_Guadalajara\\_Mexico\\_MX2024-0028.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Tomatoes%20and%20Products%20Annual_Guadalajara_Mexico_MX2024-0028.pdf)
- Van-der-Ploeg AEE, Heuvelink E, Henk JV (2007) Wild relatives as a source for sub-optimal temperature tolerance in tomato. *Acta Horticulturae* 761:127-134. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.15>
- Venema JH, Dijk BE, Bax JM, Van Hasselt PR, Elzenga JTM (2008) Grafting tomato (*Solanum lycopersicum* L.) onto the rootstock of a high-altitude accession of *Solanum habrochaites* improves suboptimal-temperature tolerance. *Environmental and Experimental Botany* 63(1-3):359-367. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.12.015>
- Wigge PA, Jaeger KE (2020). Regulation of Flowering in Crop Plants. In: Wien HC, Stützel H (Eds). *The physiology of vegetable crops*, CABI International (2.<sup>a</sup> ed.), Boston, USA, pp. 61-70.
- Yang Y, Dong L, Shi L, Guo J, Jiao Y, Xiong H, Dickson R, Shi A (2020) Effects of low temperature and low light on the physiology of tomato seedlings. *American Journal of Plant Sciences* 11(2):162-179. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.112013>
- Bernier G, Périlleux C. (2005). A physiological overview of the genetics of flowering time control. *Plant biotechnology journal* 3(1): 3-16. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2004.00114.x>

- Como se envió a la Revista Fitotecnia Mexicana -

**CAPITULO IV. LUZ SUPLEMENTARIA Y TEMPERATURA NOCTURNAS  
MODIFICAN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS Y LA PRODUCCIÓN DE  
FLORES Y FRUTOS DE JITOMATE**

## 4.1. RESUMEN

### LUZ SUPLEMENTARIA Y TEMPERATURA NOCTURNAS MODIFICAN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS Y LA PRODUCCIÓN DE FLORES Y FRUTOS DE JITOMATE

El objetivo de este trabajo fue estudiar los efectos de aplicar luz suplementaria y temperaturas nocturnas definidas en plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) durante el periodo de iniciación de las tres primeras inflorescencias sobre el número de flores y frutos formados por racimo. Se probaron seis tratamientos que resultaron de combinar dos condiciones de luz suplementaria (sin luz y con luz a una densidad de flujo fotónico de  $175 \mu\text{mol de fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y tres niveles de temperatura nocturna ( $18^\circ \text{C} \pm 2$ ,  $15^\circ \text{C} \pm 1$  y  $11^\circ \text{C} \pm 1$  dentro de cámaras frigoríficas automatizadas), aplicados en plántulas en la fase sensible de iniciación de las primeras tres inflorescencias floral (17 a 34 días después de la siembra). El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El trasplante se efectuó a los 35 días después de la siembra en camas de cultivo a una densidad de 6 plantas  $\text{m}^{-2}$ . Las plantas se condujeron a tres racimos por lo que se les eliminó el ápice de crecimiento dos hojas arriba del tercer racimo. La luz suplementaria no influyó en el número de flores o frutos, pero la exposición a  $15^\circ \text{C}$  de temperatura nocturna durante la diferenciación floral mejoró los indicadores de calidad de plántulas al trasplante respecto al testigo manejado con temperaturas de  $18^\circ \text{C}$  (menor altura de planta, mayor área foliar y peso seco, mayor concentración de clorofila en las hojas) e incrementó la producción de flores y frutos por planta, aunque no a un grado tal que aumentara el rendimiento total.

**Palabras clave:** Iniciación floral, luz suplementaria, temperatura nocturna, manejo de plántulas.

## 4.2. SUMMARY

### NIGHTTIME SUPPLEMENTAL LIGHT AND TEMPERATURE MODIFY SEEDLING GROWTH AND FLOWER AND FRUIT PRODUCTION IN TOMATO

The objective of this work was to study the effects of applying supplementary light and defined night temperatures in tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) during the initiation period of the first three inflorescences on the number of flowers and fruits formed per cluster. Six treatments were compared, resulting from combining two light conditions (no supplemental light and light at a photon flux density of 175  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) and three levels of night temperature (18° C  $\pm$ 2, 15° C  $\pm$ 1 and 11° C  $\pm$ 1 inside automated cold chambers), applied to seedlings in the sensitive phase of initiation of the first three inflorescences (17 to 34 days after sowing). The experimental design was a randomized complete block with four replications. Transplanting was 35 days after sowing into cultivation beds at a density of 6 plants  $\text{m}^{-2}$ . The plants were conducted to three clusters by the removal of the growth apex two leaves above the third cluster. Supplemental light did not influence the number of flowers and fruits, but exposure to 15 °C night temperature during floral differentiation improved transplant seedlings quality indicators compared to the control with mean night temperatures of 18 °C (lower plant height, greater leaf area and dry weight, higher chlorophyll concentration in the leaves) and increased flower and fruit number per plant, although not to such an extent that it increased total yield.

**Keywords:** Flower initiation, supplemental light, night temperature, seedling management.

## 4.3. INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada bajo condiciones de invernadero en México (SIAP, 2023 y USDA, 2024).

En la Universidad Autónoma Chapingo, se ha desarrollado un sistema hidropónico de producción de jitomate bajo invernadero (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2021), en el cual se optimiza el uso del espacio y tiempo para incrementar la productividad anual. Se despuntan las plantas apenas por encima de la tercera

inflorescencia para cosecharles solamente tres racimos a cada una y se manejan densidades de población de 6 hasta 10 plantas m<sup>-2</sup>. El ciclo de cultivo se acorta a menos de 120 días desde el trasplante hasta el fin de la cosecha, lo que hace posible obtener hasta tres ciclos anuales, cada uno con rendimientos de 160 t ha<sup>-1</sup> (casi 500 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) utilizando sistemas hidropónicos con sustratos de relativamente bajo costo como la arena de tezontle rojo, métodos de riego por goteo sencillos de implementar y manejar e invernaderos sólo con equipamiento básico de control de temperatura y humedad relativa (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2012; Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Mejía-Betancourt *et al.*, 2023; Sánchez y Moreno, 2017).

Se logra un rendimiento anual que supera a los sistemas convencionales de producción de jitomate en invernadero a niveles de mediana tecnología (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2012 y Moreno *et al.*, 2021); sin embargo, aún se puede incrementar si en cada racimo cuajaran más flores y frutos de los que produce cada racimo sin afectar el peso medio de fruto, ya que, con sólo un fruto más que se lograra desarrollar en cada racimo, con una densidad de seis plantas m<sup>-2</sup> y tres racimos por planta se podrían obtener 18 frutos más por m<sup>2</sup> por cada ciclo de cultivo (54 frutos m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>); suponiendo un peso medio de 120 g por fruto eso equivaldría a 64.8 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> adicionales.

Se sabe que la producción de una planta está influenciada por su genética (Heuvelink y Okello, 2018), pero factores ambientales como la radiación solar, la fertilización carbónica, la nutrición mineral y la regulación de las temperaturas diurnas y nocturnas tiene un impacto directo en el desarrollo de los primordios florales y en el porcentaje de los que llegan a flor (Heuvelink y Okello, 2018; Yang *et al.*, 2020; Mejía *et al.*, 2024). Estos factores afectan las relaciones fuente-demanda, la producción de fotoasimilados y el equilibrio entre crecimiento vegetativo y reproductivo (Lanoue *et al.*, 2018; Mamatha *et al.*, 2014; Rangaswamy *et al.*, 2021). Por ello, autores como Heuvelink *et al.* (2020) y Wien (2020), sugieren que, para incrementar el número de flores por planta, es crucial estudiar los factores que

aumentan la cantidad total de asimilados y aquéllos que disminuyen la demanda diaria en otros órganos favoreciendo un mayor porcentaje de distribución hacia las inflorescencias en formación (Wien, 2020).

Por lo tanto, mejorar la velocidad y eficiencia de la fotosíntesis es una estrategia clave para aumentar la producción de biomasa y el rendimiento de los cultivos agrícolas (Ort *et al.*, 2015), en donde la luz es uno de los factores ambientales más influyentes en este proceso (Li *et al.*, 2020). La extensión del periodo de iluminación con luz suplementaria en plántulas de jitomate, a una densidad de flujo fotónico fotosintético de por lo menos  $150 \mu\text{mol}$  de fotones  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  durante la noche y por periodos cortos de tiempo (15-18 días) permite un incremento de la integral diaria de radiación fotosintéticamente activa incidente (Moreno-Pérez *et al.*, 2022). Con esta práctica no solamente mejora la fotosíntesis, sino que también permite un mejor equilibrio entre el crecimiento vegetativo y reproductivo, contribuyendo así a un aumento en el número de flores y frutos por planta (Lanoue *et al.*, 2019 y Wigge y Jaeger, 2020).

La temperatura diurna y nocturna es otro factor ambiental clave en el crecimiento y floración de las plantas de jitomate, pues influye en procesos fisiológicos esenciales como la fotosíntesis, la respiración y la translocación de fotoasimilados (Taiz *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020; Sánchez y Moreno, 2017). Se ha observado que temperaturas más bajas en las raíces de plántulas promueven un mayor número de flores en las primeras inflorescencias, lo que subraya la importancia de regular tanto la temperatura del aire como la del ambiente de la raíz (Heuvelink y Okello, 2018). El periodo en que la temperatura influye sobre la floración en jitomate, es durante la iniciación floral que para la primera inflorescencia ocurre aproximadamente ocho días después de la expansión de los cotiledones (entre 15-20 días después de la siembra) y se extiende por una o dos semanas más para influir sobre la expresión de la segunda y tercera inflorescencia (Contreras-Magaña *et al.*, 2013; Heuvelink y Okello, 2018).

También se ha reportado que, la baja temperatura nocturna aumenta la acumulación de carbohidratos no estructurales que activan enzimas como la sacarosa sintasa que favorece la formación de más flores

por inflorescencia (Qi *et al.*, 2011), así como una mayor ramificación floral (Heuvelink y Okello, 2018). Esto posiblemente por una reducción en la tasa de respiración celular (Frantz *et al.*, 2004), que ralentiza el crecimiento vegetativo y hace que más azúcares se destinen hacia los primordios florales en desarrollo, lo que reduce la tasa de aborto de éstos (Heuvelink *et al.*, 2018; He *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020).

La temperatura nocturna óptima para jitomate es entre 18-20 °C (Sánchez y Moreno, 2017); sin embargo, es posible bajarla aún más de manera temporal sin que se afecte su crecimiento y rendimiento, ya que esta especie puede tolerar desviaciones de 3 a 6 °C durante periodos cortos (Papadopoulos *et al.*, 2000; Kubota *et al.*, 2018), lo que permite manejar una temperatura media para el cultivo en lugar de mantener rangos estrictos para los periodos diurnos y nocturnos, permitiendo un manejo flexible de la temperatura sin efectos adversos a la planta (Frantz *et al.*, 2004; Kubota *et al.*, 2018).

A pesar de la investigación reciente sobre la aplicación de luz suplementaria para favorecer la tasa fotosintética o inducir efectos morfogénicos en plántula la información sobre su efecto y de la acción conjunta con la temperatura nocturna incidente durante la diferenciación floral en las primeras inflorescencias, es limitada. Por ello, se llevó a cabo este estudio con el objetivo de conocer si aplicar luz suplementaria durante la noche y manejar temperaturas nocturnas bajas durante la diferenciación floral de las primeras tres inflorescencias favorecen el proceso de fotosíntesis en las plántulas y modifican el número de flores y frutos de plantas de jitomate despuntadas por encima del tercer racimo.

## **4.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.4.1. Localización y condiciones del experimento**

Durante la fase de semillero, que duró 34 días después de la siembra (dds), las plántulas fueron manejadas bajo un invernadero de 300 m<sup>2</sup>, ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo. El invernadero estaba cubierto, en la parte superior, con polietileno térmico de alta

dispersión lumínica, y en los frentes y costados por cortinas laterales móviles y mallas antiáfidos. Para controlar la temperatura y humedad relativa, se contaba con un sistema de enfriamiento evaporativo, a base de muro húmedo de fibra de celulosa y extractores de aire, así como con un sistema de calefacción a base de Gas LP. A los 35 dds, se hizo el trasplante usando un segundo invernadero de 1000 m<sup>2</sup>, con características similares al del semillero, donde las plantas permanecieron hasta finalizar su ciclo.

#### **4.4.2. Material vegetal**

Como material vegetal, se utilizó jitomate variedad Ramses, de la empresa Harris Moran, con frutos tipo saladette y hábito de crecimiento indeterminado.

#### **4.4.3. Siembra y manejo de las plántulas**

Para la siembra, se usaron charolas de poliestireno expandido con 128 cavidades, cada una con volumen de 46 cm<sup>3</sup>, previamente lavadas con agua y desinfectada con una solución de sales cuaternarias de amonio (Anibac® Plus al 45 %) a una concentración de 5 ml por L de agua, las cuales fueron rellenas con una mezcla de peat moss y perlita en proporción 1:1 (v:v), colocando una semilla por cavidad.

A partir de la emergencia (4 dds) se inició la aplicación de riegos con solución nutritiva. En los primeros 15 dds, la solución nutritiva contenía los siguientes elementos y concentración (mg L<sup>-1</sup>): N = 100, P = 20, K = 125, Ca = 125, S = 75, Mg = 25, Fe = 1, Mn = 0.5, Cu = 0.05, B = 0.25 y Zn = 0.05 (50 % de concentración), dando dos riegos al día y un gasto diario medio de 500 cm<sup>3</sup> por charola. De los 16 dds hasta finalizar la cosecha, las concentraciones de elementos de la solución nutritiva se duplicaron.

#### **4.4.4. Trasplante y manejo del cultivo**

El trasplante, se efectuó en camas de cultivo de 0.90 m de ancho por 20 m de largo, rellenas de tezontle rojo con partículas de 1 a 3 mm de diámetro. La densidad de población establecida fue 6 plantas m<sup>-2</sup> de

invernadero. Cada planta fue tutorada con hilo de rafia y anillos plásticos; los brotes laterales fueron eliminados conforme aparecían para dejar un solo tallo por planta. A los 65 dds, con la tercera inflorescencia ya formada, se eliminó la yema terminal, dejando dos hojas por encima del tercer racimo. Se implementó un sistema de riego por goteo, programado para dar nueve riegos diarios entre las 9:00 y 17:00 horas, con un gasto entre 0.9 y 1.0 L de solución nutritiva por planta al día.

#### **4.4.5. Diseño experimental y tratamientos**

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial, que incluyó dos condiciones de luz suplementaria y tres niveles de temperatura, dando lugar a un total de seis tratamientos con cuatro repeticiones; la unidad experimental constó de 12 plantas.

Los tratamientos fueron:

Tratamiento 1: plántulas de jitomate dentro del invernadero expuestas a temperatura nocturna de  $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  durante 18 días (del día 17 al 34 después de la siembra), sin luz suplementaria.

Tratamiento 2: plántulas de jitomate dentro del invernadero expuestas a temperatura nocturna de  $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ , y con luz suplementaria nocturna durante 18 días (del día 17 al 34 después de la siembra).

Tratamiento 3: plántulas de jitomate expuestas a temperatura nocturna de  $11\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$  durante 18 días (del día 17 al 34 después de la siembra), colocadas dentro de una cámara frigorífica, en un horario de 18:00 a 6:00 horas del siguiente día, sin luz suplementaria. Durante el periodo diurno las plántulas eran colocadas dentro del invernadero usado como semillero.

Tratamiento 4: plántulas de jitomate expuestas a temperatura nocturna de  $11\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$  y con luz suplementaria nocturna durante 18 días (del día 17 al 34 después de la siembra), colocadas dentro de una

cámara frigorífica, en un horario de 18:00 a 6:00 horas del siguiente día. Durante el periodo diurno las plántulas eran colocadas dentro del invernadero usado como semillero.

Tratamiento 5: plántulas de jitomate expuestas a temperatura nocturna de  $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$  durante 18 días (del día 17 al 34 después de la siembra), colocadas dentro de una cámara frigorífica, en un horario de 18:00 a 6:00 horas del siguiente día, sin luz suplementaria. Durante el periodo diurno las plántulas eran colocadas dentro del invernadero usado como semillero.

Tratamiento 6: plántulas de jitomate expuestas a temperatura nocturna de  $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$  y luz suplementaria nocturna durante 18 días (del día 17 al 34 después de la siembra), colocadas dentro de una cámara frigorífica, en un horario de 18:00 a 6:00 horas del siguiente día, con luz suplementaria nocturna.

La luz suplementaria fue proporcionada con lámparas led (IGOTO Swiss®, modelo LS01, China) de 120 cm de largo por 7 cm de ancho, que emitían luz blanca a una densidad de flujo fotónico fotosintético de  $175\text{ }\mu\text{mol de fotones m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ , por 8 horas colocadas 15 cm por arriba del ápice de las plántulas.

Para separar las plántulas bajo tratamiento con luz suplementaria de los tratamientos sin luz, tanto dentro de las cámaras, así como en el invernadero, se colocó entre ambos tratamientos de temperatura, una lámina de cartón prensado, revestidas con papel vinil adhesivo mate de color negro.

#### **4.4.5. Variables evaluadas**

El mismo día del trasplante, también se hicieron mediciones de: altura de plántula (cm), medido con un flexómetro; diámetro del tallo (mm), entre la segunda y tercera hoja utilizando un vernier electrónico; área foliar ( $\text{cm}^2$ ), determinado con un integrador de área foliar (LI-COR® LI-3000A, EUA); volumen de raíz ( $\text{cm}^3$ ), utilizando el método de desplazamiento de agua que consistió en sumergir el total de raíces previamente lavadas en un volumen conocido de agua contenida en una probeta; peso seco total por plántula (g), para lo cual se secaron las plantas en estufa a  $70^{\circ}\text{ C}$  por 72 horas y después se pesaron

utilizando una balanza analítica (Radwag® AS 220.R2 PLUS, Polonia); largo y ancho de las hojas en cm, utilizando un flexómetro; grosor de la lámina foliar en mm utilizando un vernier electrónico, Keatronic, modelo A150, y el contenido de clorofila total, expresado en  $\mu\text{g/g}$ , siguiendo la técnica descrita por Lichtenthaler (1987), esto en una muestra de 10 g de hoja por tratamiento y repetición.

Posteriormente se cuantificó el número de flores por racimo y por planta, el número de frutos cosechados por planta, el peso promedio de los frutos (g) y el rendimiento (kg/planta).

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y comparaciones de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ), utilizándose el programa estadístico Statistical Analysis System for Windows 9.0 (SAS, 2002)

#### **4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los análisis de varianza en plántulas (datos no mostrados), mostraron diferencias significativas entre las condiciones de luz suplementaria para área foliar y peso seco, y entre las diferentes temperaturas nocturnas para todas las variables evaluadas.

Las comparaciones de medias entre tratamientos de luz suplementaria, muestran que la luz adicional no modificó la altura de planta, diámetro de tallo, ni volumen de raíz, pero sí se incrementó el área foliar ( $212.8 \text{ cm}^2$ ) que condujo a plántulas con mayor peso seco total (1.11 g). Según Taiz *et al.* (2018), la luz adicional estimula la fotosíntesis, lo que favorece el desarrollo de plántulas, reflejado en un aumento en el peso seco como lo observado en el presente estudio. Aunque autores como Moreno *et al.* (2022), han reportado de manera consistente disminuciones en la altura de plántula por efecto de luz led suplementaria, en este estudio no se observó tal modificación.

En cuanto al efecto de la temperatura nocturna, se encontró que, las plántulas expuestas a temperaturas más altas ( $15 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mostraron el mayor desarrollo en términos de altura, área foliar, volumen de

raíz y peso seco, con diferencias respecto al tratamiento de menor temperatura (11 °C), el cual afectó negativamente el crecimiento. Al respecto, Van-der-Ploeg *et al.* (2007) y Pereira *et al.* (2023) indican que la exposición de las plántulas a bajas temperaturas provoca una inhibición del crecimiento debido a una reducción en la actividad enzimática y, en consecuencia, en la actividad respiratoria. Otro factor, sobre el cual posiblemente haya afectado la exposición a una baja temperatura nocturna, es la síntesis de giberelinas, las cuales promueven el alargamiento celular, como lo señala Wien (2020).

Frantz *et al.* (2004) señalan que la respiración de las plantas de jitomate aumenta de 2 a 7 % por cada grado centígrado que incrementa la temperatura nocturna, o disminuye en la misma proporción cuando la temperatura baja, y que las plantas responden a cambios de temperatura en periodos de menos de 20 días, ya que después se aclimatan. En consecuencia, por lo que el impacto en la actividad respiratoria, y en el crecimiento, deja de ser significativo debido a pérdidas de sensibilidad a esos cambios, fenómeno que quizá ocurrido en la respuesta diferenciada de las plántulas al ser expuestas a temperaturas bajas durante 17 días.

Aunque con la temperatura del interior del invernadero (18 °C), las plántulas presentaron mayor altura, tuvieron menor diámetro de tallo, lo que reduce calidad al trasplante. En este sentido, las plántulas que crecieron a 15 °C, presentaron mejores características para el trasplante. Estos resultados son consistentes con Wien (2020) quien menciona que, la tasa de elongación del tallo generalmente aumenta con la temperatura, pues hay mayor síntesis de giberelinas que estimulan el alargamiento celular. Además, cuando hay una diferencia importante entre la temperatura diurna y nocturna ocurre una reducción en el crecimiento en longitud del tallo (Heuvelink *et al.*, 2020; Taiz *et al.*, 2018), como ocurrió en el tratamiento de menor temperatura.

En volumen de raíz, Pereira *et al.* (2021) reportaron que las altas temperaturas promueven una mayor ramificación, lo que incrementa su volumen. En contraste, a temperaturas bajas como 14 °C, las raíces

tienden a ser más gruesas y menos ramificadas, aunque hay otros factores como la nutrición mineral y el tipo de sustrato que también influyen en el crecimiento radical.

**Cuadro 1. Comparación de medias de variables de crecimiento en plántulas de jitomate de 35 días de edad manejadas bajo dos condiciones de luz suplementaria y tres temperaturas nocturnas.**

Tratamiento	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Volumen de raíz (cm <sup>3</sup> )	Peso seco total (g)
Condición de la luz suplementaria					
Con Luz	19.2 a	3.80 a	212.8 a	1.28 a	1.11 a
Sin luz	19.5 a	3.74 a	153.3 b	1.13 a	0.78 b
DSH (0.05)	1.47	0.19	19.51	0.21	0.14
Temperatura nocturna					
11°C ± 1	15.5 c	3.84 a	158.9 b	1.35 a	0.84 b
15°C ± 1	18.9 b	3.94 a	186.5 ab	0.97 b	0.92 ab
18 °C ± 2	23.6 a	3.54 b	203.8 a	1.30 a	1.07 a
DSH (0.05)	2.18	0.28	29.03	0.31	0.20

Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una  $P \leq 0.05$ ; DSH = diferencia significativa honesta.

Las comparaciones de medias de variables medidas en la hoja (Cuadro 2), mostraron que, con luz suplementaria, las plántulas tuvieron mayor largo y ancho de hoja, y mayor grosor de la lámina foliar, comparadas con las plántulas sin luz adicional, lo cual indica que la luz led adicional, además de promover crecimiento foliar, indujo efectos morfogenéticos para formar hojas con mayor densidad como también lo señalan Taiz *et al.* (2018). Seguramente el mayor largo y ancho de la hoja con luz suplementaria contribuyó a formar plántulas de mayor área foliar (Cuadro 1). También se encontró que, con temperaturas de 11 °C ± 1, se redujo significativamente el largo y ancho de hoja y se incrementó su grosor; mientras que con 15 y 18 °C, las dimensiones en hoja fueron similares (Cuadro 2).

El mayor grosor de la lámina foliar con  $11\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$  (0.27 mm), puede ser atribuido a un estrés térmico por baja temperatura, pues bajo estas condiciones, se reducen las actividades enzimáticas relacionadas con la síntesis de hormonas de crecimiento como giberelinas y auxinas (Wien, 2020), que compactan el tejido foliar (células más pequeñas), dando lugar a la formación de hojas más pequeñas, pero más gruesas, esto como un mecanismo para conservar calor y resistir el estrés ocasionado por bajas temperaturas (Taiz *et al.*, 2018). Heuvelink *et al.* (2018) también mencionan que la tasa de crecimiento en plántulas de tomate se reduce con temperaturas nocturnas bajas, se disminuye el área foliar, y que, las temperaturas subóptimas producen hojas más gruesas debido a células más grandes que acumulan almidón.

En cuanto al contenido de clorofila total, no hubo cambio alguno por efecto de la luz suplementaria y tampoco fue modificado por la temperatura nocturna aplicada en las plántulas (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Comparación de medias de las variables en hojas de plántulas de jitomate de 35 días de edad manejadas bajo dos condiciones de luz suplementaria y tres temperaturas nocturnas.**

Tratamiento	Largo de hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)	Clorofila total ( $\mu\text{g/g}$ )	Grosor de lámina foliar (mm)
Condición de la luz suplementaria				
Con Luz	9.71 a	10.67 a	17.17 a	0.27 a
Sin luz	9.03 b	9.77 b	16.02 a	0.22 b
DSH (0.05)	0.46	0.54	1.17	0.04
Temperatura nocturna				
$11\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$	8.61 b	9.39 b	16.10 a	0.27 a
$15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$	9.4 a	10.31 a	17.27 a	0.24 ab
$18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$	10.08 a	10.95 a	16.42 a	0.22 b
DSH (0.05)	0.69	0.8	1.76	0.05

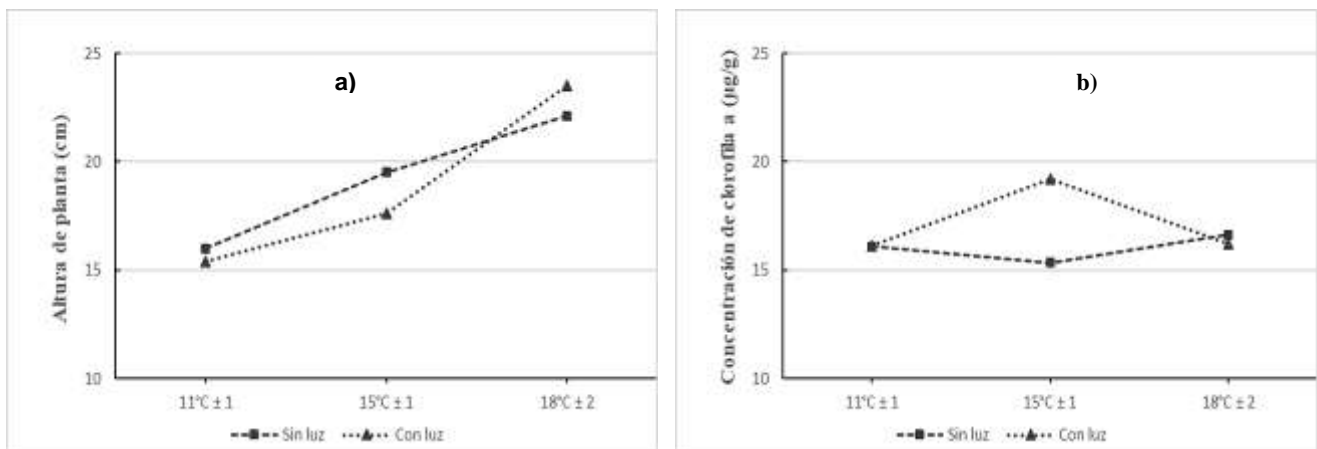
Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una  $P \leq 0.05$ ; DSH = diferencia significativa honesta.

En síntesis, la presencia de luz suplementaria nocturna y de temperaturas nocturnas de 15 a 18 °C, en el periodo de iniciación floral de las tres primeras inflorescencias (17 a 34 dds), influyeron en la producción temporal de más área foliar, mayor grosor de la lámina foliar y más peso seco obtenido por planta, indicando la producción de más fotoasimilados por plántula por día en ese periodo. Estas condiciones pueden hacer que más primordios de flor en cada inflorescencia dispongan de suficientes fotoasimilados para no abortar y desarrollarse hasta flores en antesis (Heuvelink *et al.*, 2018). El menor grosor de tallo, volumen de su raíz y área foliar en las plántulas con el tratamiento de 15 °C respecto a las plantas a 18 °C, sugiere que pudo haber menos gasto de fotoasimilados en crecimiento vegetativo.

El análisis de varianza, indicó efectos significativos para la interacción luz × temperatura nocturna respecto a altura de plántula y clorofila total (Figura 1). La interacción para altura de plántula se explica porque con luz suplementaria y mayor temperatura, las plántulas incrementan su altura en mayor proporción que las plántulas sin luz a la misma temperatura, probablemente por síntesis de más auxinas y/o giberelinas que intervienen en la elongación celular (Wien, 2020), o porque la combinación de luz suplementaria y temperatura nocturna más alta provocaron un metabolismo más acelerado reflejado en una tasa de producción y uso de asimilados más rápida que favoreció un mayor crecimiento (Taiz *et al.*, 2018). La interacción significativa para la concentración de clorofila total se debe a que cuando las plántulas fueron manejadas a 15 °C durante la noche, con luz suplementaria se incrementó la concentración de clorofila total respecto al tratamiento con luz a 11 °C; sin embargo, al aumentarse la temperatura a 18 °C con luz suplementaria, se redujo la concentración de clorofila, mientras que, sin luz suplementaria la concentración fue casi constante bajo cualquier nivel de temperatura evaluado.

Cuando se elevó la temperatura de 11 a 15 °C y se aportó luz suplementaria la concentración de clorofila aumentó (Figura 1b), esto probablemente fue debido a una mayor síntesis de clorofila provocada por un incremento en la integral diaria de luz respecto al tratamiento sin luz suplementaria (Taiz *et al.*, 2018)

combinado con el aporte de cuatro grados más de temperatura nocturna promedio en relación al tratamiento de 11 °C, lo que seguramente aceleró la actividad enzimática y el proceso de biosíntesis en general. Al elevar la temperatura de 18 a 20 °C se formó numéricamente más área foliar que a 15 °C (Cuadro 1) ocasionando un efecto de dilución que redujo la concentración de clorofila otra vez a niveles similares a los del tratamiento de 11 °C.



**Figura 1. Interacción entre condición de luz suplementaria y temperatura nocturna para altura de plántula (a) y concentración de clorofila total (b) en plántulas de jitomate, 35 días después de la siembra.**

Con respecto a las variables de rendimiento y sus componentes, el análisis de varianza (Datos no mostrados) y comparaciones de medias, indican que la luz nocturna suplementaria no afectó ninguna de las variables evaluadas; pero sí se presentaron efectos de temperaturas nocturna. Tampoco hubo efectos significativos de interacción entre condiciones de luz suplementaria y temperatura nocturna aplicadas de los 17 a los 34 dds.

Se encontró (Cuadro 3) que las plántulas expuestas a 15°C ± 1 dieron lugar a plantas con mayor número de flores en el primer y tercer racimo, en consecuencia, más flores por planta (3 flores más por planta). En número de frutos por planta, también hubo un incremento estadísticamente significativo a favor del

tratamiento de  $15^{\circ}\text{C} \pm 1$ , respecto al tratamiento de  $11^{\circ}\text{C}$ . Aunque el peso medio de fruto, fue igual en todos los tratamientos, la diferencia en el número de frutos formados por planta, no fue suficiente para que se tuvieran cambios significativos en el rendimiento. Estos resultados permiten deducir que el régimen de temperatura nocturna, durante el periodo de iniciación de las inflorescencias afecta el porcentaje de aborto de los primordios florales, lo cual concuerda con Heuvelink y Okello (2018) quienes mencionan que, el número de flores no solamente está determinado por el cultivar utilizado, sino también por las condiciones ambientales en que las plantas crecen. Por su parte Qi *et al.* (2011) reportaron que temperaturas nocturnas relativamente bajas favorecen la acumulación de carbohidratos no estructurales que ayudan a prevenir la aborción de primordios florales, aumentando así el número de flores y frutos en plantas de jitomate, como ocurrió en este estudio.

Finalmente, el rendimiento de 2.94 kg por planta alcanzado a una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  en etapa de plántula y con la densidad de 6 plantas  $\text{m}^{-2}$  de invernadero establecida ( $17.64 \text{ kg/m}^2$ ) es alto para un ciclo de cultivo de trasplante a cosecha de solamente 110 días.

**Cuadro 3. Comparación de medias entre tratamientos de variables del rendimiento y sus componentes evaluadas en planta de jitomate variedad Ramses.**

TRAT	NFLR1	NFLR2	NFLR3	NFLPP	NFRPP	PMFR	RENPP
						(g)	Kg/planta
Condición de la luz suplementaria							
Con Luz	9.3 a	10.0 a	10.8 a	30.1 a	25.3 a	111 a	2.81 a
Sin luz	9.1 a	9.5 a	10.4 a	28.9 a	24.9 a	119 a	2.95 a
DSH (0.05)	0.45	0.70	0.73	1.14	1.79	11.20	0.27
Temperatura nocturna							

11 °C ± 1	8.7 b	9.4 a	10.2 b	28.2 b	23.9 b	118 a	2.83 a
15 °C ± 1	9.7 a	10.2 a	11.3 a	31.3 a	26.6 a	110 a	2.94 a
18 °C ± 2	9.1 ab	9.7 a	10.2 b	29.0 b	24.6 ab	117 a	2.87 a
DSH (0.05)	0.68	1.04	1.08	1.69	2.66	16.67	0.40

Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una  $P \leq 0.05$ ; DSH = diferencia significativa honesta. NFLR1= número de flores en el racimo uno, NFLR2= número de flores en el racimo dos, NFLR3= número de flores en el racimo tres, NFLPP= número de flores por planta, NFRPP= número de frutos por planta, PMFR= peso medio de fruto, RENPP= rendimiento por planta.

#### 4.6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, permiten concluir que, la luz led suplementaria nocturna a una densidad de flujo fotónico fotosintético de  $175 \mu\text{mol}$  de fotones  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  aplicada en etapa de plántula en jitomate, incrementó el área foliar y el peso seco de las plántulas al momento del trasplante, pero no tuvo ningún efecto sobre el número de flores y frutos formados en las tres primeras inflorescencias de las plantas.

Cuando las plántulas de jitomate fueron expuestas a temperatura nocturnas de  $15 \text{ °C}$  durante el periodo sensitivo de la diferenciación floral en las tres primeras inflorescencias, además de obtenerse plántulas con calidad al trasplante, se promovió un mayor número de flores y frutos por planta respecto a cuando estuvieron expuestas a  $18 \text{ °C}$ . En ese mismo periodo, pero con temperatura nocturna de  $11 \text{ °C}$  el crecimiento de las plántulas se redujo y posteriormente expresaron menor número de flores y frutos por planta.

#### 4.7. LITERATURA CITADA

**Contreras-Magaña E., H. Arroyo-Pozos, J. Ayala-Arreola, F. Sánchez-Del-Castillo y E. C. Moreno-Pérez (2013)** Caracterización morfológica de la diferenciación floral en tomate (*Solanum*

*lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19:59-70,  
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.010>

**Frantz, J. M., N. N. Cometti and B. Bugbee (2004)** Night temperature has a minimal effect on respiration and growth in rapidly growing plants. *Annals of Botany* 94:155–166,  
<https://doi.org/10.1093/aob/mch122>

**He, Y., J. Yang, B. Zhu and Z. Zhu (2014)** Low root zone temperature exacerbates the ion imbalance and photosynthesis inhibition and induces antioxidant responses in tomato plants under salinity. *Journal of Integrative Agriculture* 13:89–99, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60586-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60586-9)

**Heuvelink E, R. C. O. Okello, M. Peet, J. J. Giovanoni and M. Dorais (2020)** Tomato. In *The physiology of vegetable crops*. H. C. Wien, H. Stützel (Eds). CABI International, Boston, USA. pp:138-178.

**Heuvelink E. and R. C. O. Okello (2018)** Developmental processes. In: *Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:59-88, <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>

**Heuvelink E., T. Li and M. Dorais (2018)** Crop growth and yield. In: *Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:89-136, <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0089>

**Kubota C., A. de Gelder and M. M. Peet (2018)** Greenhouse tomato production. In: *Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:276-313,  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1079/9781780641935.0276>

**Lanoue, J., E. D. Leonardos and B. Grodzinski (2018)** Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science* 9:1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00756>

**Li, Y., G. Xin, C. Liu, Q. Shi, F. Yang and M. Wei (2020)** Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO<sub>2</sub> assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings. *BMC Plant Biology* 20:318. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02523-z>

- Lichtenthaler, H. K. (1987)** Chlorophylls and carotenoids: Pigments of Biomembranes. *Methods in Enzymology* 148: 350-382, 148: 350, [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Mamatha H., N. K. S. Rao, R. H. Laxman, K. S. Shivashankara, R. M. Bhatt and K.C. Pavithra (2014)** Impact of elevated CO<sub>2</sub> on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica* 52:519-528, <https://doi.org/10.1007/s11099-014-0059-0>
- Mejía-Betancourt F. A., F. Sánchez-del Castillo, E. C. Moreno-Pérez y L. González-Molina (2023)** Esquejes enraizados, una alternativa para la producción de jitomate bajo invernadero en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14:389-399, <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3038>
- Mejía-Betancourt, F. A., F. Sánchez-Del Castillo, E. C. Moreno-Pérez y M. B. T. Colinas-León (2024)** Enriquecimiento carbónico en plántulas de tomate para incrementar el número de flores y frutos por planta. *Revista Fitotecnia Mexicana* 47:285-292, <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.3.285>
- Moreno-Pérez E. C., F. Sánchez-del Castillo, M. Ruiz-Díaz and E. Contreras- Magaña (2021)** Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27:5-17, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>
- Moreno-Pérez, E. C., F. Sánchez-Del Castillo, L. Portillo-Márquez y J. C. Vázquez-Rodríguez (2022)** Efectos de luz suplementaria aplicada en plántulas de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana* 45(3): 349-357. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.3.349>
- Ort, D.R., S. S. Merchant, J. Alric and X. G. Zhu et (2015)** Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112:8529-8536, <https://doi.org/10.1073/pnas.1424031112>
- Papadopoulos, A.P. and X. Hao (2000)** Effects of day and night air temperature on growth, productivity and energy use of long English cucumber. *Canadian Journal of Plant Science* 80: 143–150, <https://doi.org/10.4141/P99-02>

- Pereira, C. S. and P. do C. Sampaio (2023)** Diferentes temperaturas da água de irrigação na cultura da soja. *Scientific Electronic Archives* 17:22-27, <https://doi.org/10.36560/17120241840>
- Pereira, C. S., D. Oliveira, I. V. A. Fiorini and A. A. da Silva (2021)** Diferentes temperaturas de agua de irrigação na cultura do feijoeiro. *Tecno-Lógica* 25:279-284, <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v25i2.15924>
- Qi, H., L. Hua, L. Zhao y L. Zhou (2011)** Metabolismo de carbohidratos en plántulas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y rendimiento y calidad de frutos afectados por temperaturas nocturnas bajas y posterior recuperación. *African Journal of Biotechnology* 10:5743–5749, <https://doi.org/10.5897/AJB10.1475>
- Rangaswamy T. C., S. Sridhara, N. Ramesh, P. Gopakkali, D. O. El-Ansary, E. A. Mahmoud, ... and A. M. E. Abdel-Hamid (2021)** Assessing the impact of higher levels of CO<sub>2</sub> and temperature and their interactions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants* 10:256, <https://doi.org/10.3390/plants10020256>
- Rodrigues J., D. Inzé, H. Nelissen and N. J. M. Saibo (2019)** Source-sink regulation in crops under water deficit. *Trends in Plant Science* 24:652-663, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.04.005>
- Sánchez C. F. y E. C. Moreno P. (2017)** Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México. 432 p.
- Sánchez-Del Castillo F., E. C. Moreno-Pérez, A. Morales-Maza, A. Peña-Lomelí y M. T. Colinas-León (2012)** Densidad de población y volumen de sustrato en plántulas de jitomate (*Lycopersicum lycopersicon* Mill.). *Agrociencia* 46:255-266.
- Sánchez-Del Castillo F., L. Portillo-Márquez, E. C. Moreno-Pérez, J. J. Magdaleno-Villar y J. C. Vázquez-Rodríguez (2021)** Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27:71-84, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>

**SAS Institute (2002)** SAS/STAT® 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 5121

p.

**SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023)** Panorama Agroalimentario 2023, la edición estadística más importante del sector agroalimentario. Ciudad de México. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035> (abril 2024).

**Taiz L., E. Zeiger, I. M. Møller and A. Murphy (2018)** Fundamentals of Plant Physiology. Oxford University Press. New York, USA. 561 p.

**USDA, United States Department of Agriculture (2024)**. Tomatoes and products annual: Mexico 2024 report. <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName> (mayo 2024)

**Van der Ploeg, A., E. Heuvelink and H. J. Venema (2007)**. Wild relatives as a source for sub-optimal temperature tolerance in tomato. *Acta Horticulturae* 761: 127-133. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.15>

**Wien, H.C. (2020)** Correlative Growth in Vegetable Plants. *In: The physiology of vegetable crops*. H. C. Wien, H. Stützel (Eds). CABI International, Boston, USA. pp:117-137.

**Wigge, P. A and K. E. Jaeger (2020)** Regulation of Flowering in Crop Plants. *In: The physiology of vegetable crops*. H. C. Wien, H. Stützel (Eds). CABI International, Boston, USA. pp:61-70.

**Yang, Y., L. Dong, L. Shi, J. Guo, Y. Jiao, H. Xiong, R. Dickson y A. Shi (2020)** Effects of low temperature and low light on physiology of tomato seedlings. *American Journal of Plant Sciences* 11:162-179. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.112013>

## CONCLUSIONES GENERALES

Bajo las condiciones en que fueron conducidos los distintos experimentos, se puede concluir que:

Con el enriquecimiento carbónico a concentraciones entre 500 y 700 ppm durante la fase de iniciación floral, las plántulas de jitomate tuvieron mayor altura, área foliar y peso seco con respecto a las expuestas a la concentración ambiental de CO<sub>2</sub> (317-402 ppm), lo que permitió obtener plántulas con calidad al trasplante, así como más flores y frutos por planta.

Con temperaturas de 9 a 12 °C en la rizósfera de plántulas de jitomate tipo roma y bola en la etapa de semillero, el crecimiento vegetativo y, posteriormente, el número de flores y frutos por planta disminuyó. Sin embargo, la temperatura entre 12 y 18 °C en el ambiente de la raíz permitió un mayor número de flores y frutos por planta en ambas variedades.

La luz led suplementaria aplicada durante la noche, a una densidad de flujo fotónico de 175  $\mu\text{mol}$  de fotones  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , incrementó el área foliar y el peso seco de las plántulas al momento del trasplante, pero no tuvo ningún efecto sobre el número de flores y frutos formados en las tres primeras inflorescencias ni en el rendimiento de las plantas de jitomate.

La temperatura nocturna de 11° C, aplicada en plántulas de jitomate de los 17 a los 34 dds, disminuyó el crecimiento al momento del trasplante y el número de flores y frutos por planta en comparación con los tratamientos de 15 y 18 °C.

El tratamiento de 15 °C de temperatura nocturna y luz suplementaria aplicada durante la noche, generó plántulas de jitomate con mayor calidad al trasplante, al lograr mayor altura, área foliar y peso seco, así como un mayor número de flores y frutos por planta, respecto al tratamiento de 18 °C.