



Three-cluster tomato production in three stages II: Effects of the duration of the intermediate stage on growth and performance

Producción de jitomate a tres racimos en tres etapas II: Efectos de la duración de la etapa intermedia sobre el crecimiento y rendimiento

✉ [Felipe Sánchez-del Castillo](#); ✉ [Alan Cabañas-Díaz](#);
✉ [Esaú del Carmen Moreno-Pérez*](#); ✉ [J. Jesús Magdaleno-Villar](#)

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia.
Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, C. P. 56230, México.

*Corresponding author: esaump10@yahoo.com.mx, tel. 55 849891 67

Abstract

Keywords: hydroponics,
production systems,
population density,
productivity.

Due to the high costs of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production, strategies are required to optimize the use of space and time, in order to achieve an annual productivity that ensures the profitability of the crop. Therefore, the objective of this work was to study the effect of the duration of the intermediate stage on the potential performance per cycle and per year. Five treatments were established (25, 30, 35, 40, and 45 days duration of the intermediate stage) and a control (without an intermediate stage). The intermediate stage, lasting 30 days, presented the highest yield (9.5 kg·m⁻²), in a 70 day cycle in a greenhouse, demonstrating the potential of this system to carry out multiple production cycles per year (between five and seven). In this study, an intensive management system was evaluated in which production cycles are shortened to 50-60 days by topping to three clusters and implementing three cultivation stages: seedbed, intermediate stage at high density (18 plants·m⁻²), and production. High density during the intermediate stage is necessary for this system, although it can induce competition for light, which can affect performance.

Resumen

Palabras clave:
hidroponía, sistemas
de producción, densidad de
población, productividad.

Debido a los altos costos de producción de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero se requieren estrategias que optimicen el uso del espacio y el tiempo, con el fin de alcanzar una productividad anual que asegure la rentabilidad del cultivo. Por ello, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la duración de la etapa intermedia sobre el rendimiento potencial por ciclo y por año. Se establecieron cinco tratamientos (25, 30, 35, 40 y 45 días de duración de la etapa intermedia) y un testigo (sin etapa intermedia). La etapa intermedia con duración de 30 días presentó el mayor rendimiento (9.5 kg·m⁻²), en un ciclo de 70 días en invernadero, lo cual demuestra el potencial de este sistema para realizar múltiples ciclos productivos al año (entre cinco y siete). En este estudio se evaluó un sistema de manejo intensivo en el que los ciclos de producción se acortan a 50-60 días mediante el despunte a tres racimos y la implementación de tres etapas de cultivo: semillero, etapa intermedia en alta densidad (18 plantas·m⁻²) y producción. La alta densidad durante la etapa intermedia es necesaria para este sistema, aunque puede inducir competencia por luz, lo cual puede afectar el rendimiento.

Please cite this article as follows (APA 7): Sánchez-del Castillo, F., Cabañas-Díaz, A., Moreno-Pérez, E. C., & Magdaleno-Villar, J. J. (2025). Three-cluster tomato production in three stages II: Effects of the duration of the intermediate stage on growth and performance. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 31, e25012. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2024.09.012>



Revista Chapingo
Serie Horticultura

Introduction

Agriculture in Mexico faces constant challenges that limit its productivity and generate economic uncertainty, including rugged topography, scarcity and random rainfall, low temperatures, and frosts. These factors have driven the adoption of technologies such as the use of greenhouses and hydroponic systems, which offer greater security and profitability to horticultural producers (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). The implementation of these technologies in high-value crops allows for considerable yields and profits, in addition to generating 10 full-time jobs per hectare, which contributes to regional economic development (Pratt & Ortega, 2019).

Among the vegetables grown under protected agriculture, the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) stands out for its high demand in national and international markets, as well as for its high yield and quality under intensive production systems. In Mexico, it is the most important vegetable in terms of surface area, economic value, and volume managed in greenhouses and hydroponic systems (Costa & Heuvelink, 2018; Agri-Food and Fisheries Information Service [SIAP], 2020). In 2018, 1.68 million tons of tomatoes were exported, representing 48.7 % of national production (estimated at just over 3 million tons), of which 99.7 % was destined for the United States market (Trusts Instituted in Relation to Agriculture [FIRA], 2019).

In response to the need to improve profitability for small and medium-sized producers with limited market access, an alternative greenhouse hydroponic tomato production system has been commercially validated. This system, without increasing production costs per ton, allows the annual yield to increase by 50 % compared to the conventional system, which translates into greater economic benefits (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Sánchez-del Castillo et al., 2010, 2012).

The proposed alternative system (Figure 1) is characterized by two cultivation stages: the initial seedling stage in the nursery and the production stage (from transplant to harvest). This scheme allows for up to three cultivation cycles per year, in contrast to the single cycle of the conventional system. To achieve this, cultural practices have been implemented that delay transplanting until 45-50 days after sowing (das) and reduce the transplant-to-harvest period to 100-110 days by topping (removing the terminal bud) above the third inflorescence and pruning lateral shoots to leave a single stem. This practice limits each plant to producing only three clusters. Although this reduces the yield per plant, the smaller leaf area facilitates the

Introducción

La agricultura en México enfrenta constantes desafíos que limitan su productividad y generan incertidumbre económica, entre ellos destacan la topografía accidentada, la escasez y aleatoriedad de las precipitaciones, las bajas temperaturas y las heladas. Estos factores han impulsado la adopción de tecnologías como el uso de invernaderos y sistemas hidropónicos, los cuales ofrecen mayor seguridad y rentabilidad a los productores hortícolas (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). La implementación de estas tecnologías en cultivos de alto valor económico permite obtener rendimientos y ganancias considerables, además de que generan 10 empleos de tiempo completo por hectárea, lo que contribuye al desarrollo económico regional (Pratt & Ortega, 2019).

Entre las hortalizas cultivadas bajo agricultura protegida, el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) destaca por su alta demanda en los mercados nacional e internacional, así como por su elevado rendimiento y calidad bajo sistemas intensivos de producción. En México, es la hortaliza más importante en términos de superficie, valor económico y volumen manejado en invernaderos y sistemas hidropónicos (Costa & Heuvelink, 2018; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). En 2018, se exportaron 1.68 millones de toneladas de jitomate, lo que representó el 48.7 % de la producción nacional (estimada en poco más de 3 millones de toneladas), de las cuales el 99.7 % se destinó al mercado de Estados Unidos (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2019).

Ante la necesidad de mejorar la rentabilidad para pequeños y medianos productores con acceso limitado a mercados, se ha validado comercialmente un sistema alternativo de producción de jitomate hidropónico en invernadero. Este sistema, sin aumentar los costos de producción por tonelada, permite incrementar el rendimiento anual en un 50 % respecto al sistema convencional, lo que se traduce en mayores beneficios económicos (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Sánchez-del Castillo et al., 2010, 2012).

El sistema alternativo propuesto (Figura 1) se caracteriza por tener dos etapas de cultivo: etapa inicial de plántula en semillero y etapa de producción (del trasplante hasta la cosecha). Este esquema permite realizar hasta tres ciclos de cultivo por año, en contraste con el ciclo único del sistema convencional. Para lograrlo, se han implementado prácticas culturales que retrasan el trasplante hasta los 45-50 días después de la siembra (dds) y reducen el periodo de trasplante a cosecha a 100-110 días mediante el despunte (eliminación de la

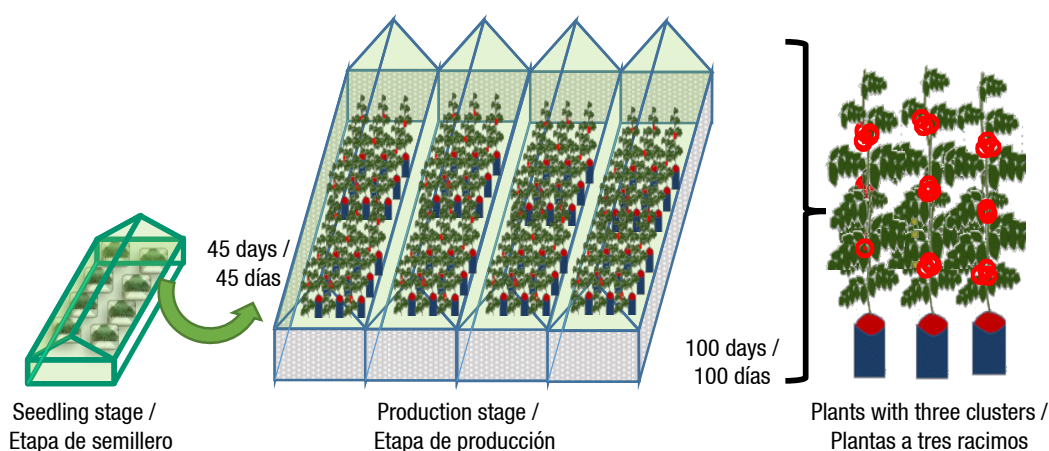


Figure 1. Diagram of a tomato production system with three clusters per plant in two cultivation stages (seedling and production).
Figura 1. Esquema de un sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en dos etapas de cultivo (semillero y producción).

increase in population density up to 8 plants·m⁻², which partially compensates for this reduction. Furthermore, shortening the production stage to less than 110 days allows for three crop cycles per year (Sánchez-del Castillo et al., 2012, 2017) with a potential annual yield close to 450 t·ha⁻¹ (Moreno-Pérez et al., 2022; Sánchez-del Castillo et al., 2021).

Due to the high population density required by this system, the demand for seeds, germination trays, and substrate for germination and seedling development increases with each cycle. However, production costs per cycle have been, on average, lower than those of the traditional system of one cycle per year, such that costs per kilogram produced remain similar, which allows for greater economic profit per year (Sánchez-del Castillo et al., 2012, 2021).

Although the system of three clusters per plant and three cycles per year has proven to be highly productive, there is still room for improvement in crop efficiency. Reducing the length of the production stage would allow for more cycles per year, which would increase annual productivity. In this regard, the early topping of plants to limit them to one or two clusters and proportionally increase population density has been evaluated. However, this strategy has not proven practical, as it increases production costs per cycle (mainly due to the high cost of improved hybrid seed) and reduces yield per plant (Sánchez-del Castillo et al., 2017; Sánchez-del Castillo & Ponce-Ocampo, 1998).

In this sense, as mentioned in the article by Cabañas-Díaz et al. (2025), a tomato production system has been proposed that incorporates three cultivation stages: seedbed, high-density intermediate, and production (Figure 2), which allows increasing the number of production cycles per year. However, by prolonging the duration of the intermediate stage under high-density

yema terminal) por encima de la tercera inflorescencia y la poda de brotes laterales para dejar un solo tallo. Esta práctica limita a cada planta a producir solo tres racimos. Aunque esto reduce el rendimiento por planta, la menor área foliar facilita el aumento de la densidad de población hasta 8 plantas·m⁻², lo cual compensa parcialmente dicha reducción. Además, el acortamiento de la etapa de producción a menos de 110 días permite obtener tres ciclos de cultivo por año (Sánchez-del Castillo et al., 2012, 2017) con un rendimiento potencial anual cercano a 450 t·ha⁻¹ (Moreno-Pérez et al., 2022; Sánchez-del Castillo et al., 2021).

Debido a la alta densidad de población que requiere dicho sistema, se incrementa la demanda de semillas, charolas de germinación y sustrato para la germinación y el desarrollo de plántulas en cada ciclo. No obstante, los costos de producción por ciclo han resultado, en promedio, menores que los del sistema tradicional de un ciclo por año, de tal manera que los costos por kilogramo producido se mantienen similares, lo cual permite una mayor ganancia económica por año (Sánchez-del Castillo et al., 2012, 2021).

Aunque el sistema de tres racimos por planta y tres ciclos por año ha demostrado ser altamente productivo, aún existe la posibilidad de mejorar la eficiencia del cultivo. Si se lograra reducir la duración de la etapa de producción, se podrían obtener más ciclos por año, lo cual aumentaría la productividad anual. En este sentido, se ha evaluado el efecto del despunte temprano de las plantas para limitarlas a uno o dos racimos y aumentar proporcionalmente la densidad de población. Sin embargo, esta estrategia no ha resultado práctica, ya que incrementa los costos de producción por ciclo (principalmente por el elevado costo de la semilla híbrida mejorada) y reduce el rendimiento por planta (Sánchez-del Castillo et al., 2017; Sánchez-del Castillo & Ponce-Ocampo, 1998).

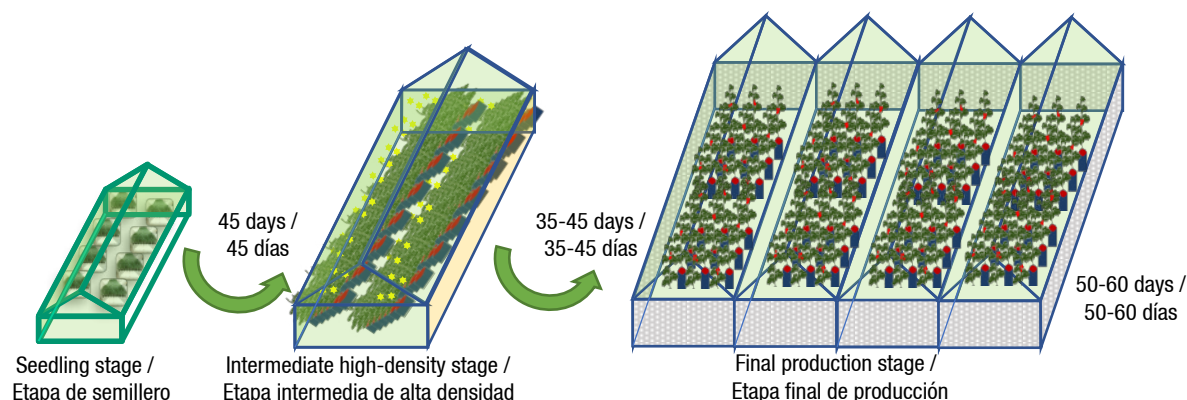


Figure 2. Diagram of a production system with three clusters per plant in three stages of cultivation.

Figura 2. Esquema de un sistema de producción a tres racimos por planta en tres etapas de cultivo.

conditions ($18 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}$), the leaf area per plant and, consequently, the leaf area index (LAI) can reach such high values that they would cause competition stress, thereby decreasing growth and yield. According to Heuvelink et al. (2018), Mendoza-Pérez et al. (2022), and Won and Jong (2020), the optimal LAI to maximize tomato production is in the range of 3 to 4.

Considering the aforementioned, the objective of this study was to determine the optimal duration of the intermediate stage at high population density without negatively affecting growth and yield, as well as to estimate the potential number of crop cycles per year based on the duration of the production stage, under a hypothetical scenario of optimal climate or high-tech climate-controlled greenhouses.

Materials and methods

The experiment was set up at the facilities of the Horticulture Institute of the Autonomous University of Chapingo, Mexico ($19^{\circ} 29' 35'' \text{ N}$ and $98^{\circ} 52' 19'' \text{ W}$, at 2250 m a. s. l.), under greenhouse and hydroponic conditions for 140 days from sowing to harvest (March to July 2023). A chapel-type greenhouse with a metal structure and a high-light-scattering thermal polyethylene cover, oriented north to south, was used. The climate control system included LP gas heating, a wet-wall cooling system, and ventilation with exhaust fans located on the opposite wall, maintaining a temperature between 20 and 30 °C during the day and between 10 and 20 °C at night. Relative humidity ranged from 50-80 %. The soil was covered with white polypropylene ground cover. The three growing stages (seedbed, high-density intermediate, and final production) took place in different spaces within the same greenhouse.

The commercial tomato hybrid 'Condor' was used, with a saladette-type fruit and an indeterminate growth

En este sentido, como se menciona en el artículo de Cabañas-Díaz et al. (2025), se ha propuesto un sistema de producción de jitomate que incorpora tres etapas de cultivo: semillero, intermedia de alta densidad y producción (Figura 2), el cual permite incrementar el número de ciclos de producción por año. No obstante, al prolongar la duración de la etapa intermedia en condiciones de densidades altas ($18 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$), el área foliar por planta y, en consecuencia, el índice de área foliar (IAF) pueden alcanzar valores tan elevados que ocasionarían estrés por competencia, con lo cual disminuiría el crecimiento y rendimiento. De acuerdo con Heuvelink et al. (2018), Mendoza-Pérez et al. (2022) y Won y Jong (2020), el IAF óptimo para maximizar la producción de jitomate se encuentra en un rango de 3 a 4.

Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la duración óptima de la etapa intermedia en alta densidad de población sin afectar negativamente el crecimiento y el rendimiento, así como estimar el número potencial de ciclos de cultivo por año en función de la duración de la etapa de producción, bajo un escenario hipotético de clima óptimo o de invernaderos climatizados de alta tecnología.

Materiales y métodos

El experimento se estableció en las instalaciones del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, México ($19^{\circ} 29' 35'' \text{ N}$ y $98^{\circ} 52' 19'' \text{ O}$, a 2250 m s. n. m.), en condiciones de invernadero e hidroponía durante 140 días de siembra a fin de cosecha (marzo a julio de 2023). Se utilizó un invernadero tipo capilla con estructura metálica y cubierta de polietileno térmico de alta dispersión de luz, orientado de norte a sur. El sistema de climatización incluía calefacción a base de gas LP, un sistema de enfriamiento mediante pared húmeda y ventilación con extractores de aire ubicados en la pared opuesta, lo cual permitiría mantener la temperatura entre 20 y 30 °C durante el

habit, suitable for greenhouse cultivation. The seeds were sown in 60-well polystyrene trays, with a volume of 200 mL per well and spaced 5 cm apart. Before sowing, the trays were washed and disinfected.

The germination substrate consisted of a 1:1 (v/v) mixture of peat moss (Cosmopeat®, pH = 5.0–6.5 and electrical conductivity [EC] = 0.2–0.8 dS·m⁻¹) and perlite (Multiperl). The seeds were covered with a layer of vermiculite approximately 0.5 cm thick. The trays were placed on metal frames raised 50 cm above the ground.

The seedlings were irrigated, one to two times a day, with a 50 % concentration nutrient solution for the first 40 das. Subsequently, the 100 % nutrient solution was applied, which contained the following nutrient concentrations (mg·L⁻¹): N = 200, P = 60, K = 250, Ca = 250, Mg = 50, S = 150, Fe = 3, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.2, and Zn = 0.2. The nutrient sources used were calcium nitrate, potassium sulfate, 85 % phosphoric acid, magnesium sulfate, ferrous sulfate, manganese sulfate, boric acid, copper sulfate, and zinc sulfate. The pH of the solution was adjusted between 5.5 and 6.5 with 10 % dilute sulfuric acid, and the water for the solution had an EC of 0.3 dS·m⁻¹. The resulting EC of the nutrient solution ranged between 2.2 and 2.5 dS·m⁻¹.

At 40 das, seedlings were transplanted into 20 cm diameter and 21 cm high pots (6.8 L) to begin the intermediate stage of high-density cultivation (18 plants·m⁻²). Volcanic sand (red *tezontle*) with particles between 1 and 3 mm in diameter was used as a substrate. Each plant was supported by a 1.2 m long wire rod stake with plastic rings. The nutrient solution was prepared in a cistern and distributed using drip tapes (Toro® cal. 8000) with a flow rate of 3800 mL·h⁻¹ per dripper. The spacing between drippers was 20 cm during the intermediate stage and 30 cm during the production stage. Irrigation was adjusted daily to ensure 20 % drainage relative to the volume of solution applied at each irrigation. Between four and eight daily irrigations were provided according to the weather conditions and the phenological stage of the crop.

The plants were topped (removed from the terminal bud) at 75 days of age, leaving two leaves above the third inflorescence. The crop was grown on a single stem per plant. Harvesting began at 120 days of age, when the fruits turned pink, and successive cuts were made over a period of 20 days.

Six treatments were evaluated, all with a 40-day seedling stage in the seedbed; the seedlings were subsequently transplanted to begin the intermediate stage at high density (18 plants·m⁻²), except for the control (T1), which was transplanted directly to the production

día y entre 10 y 20 °C durante la noche. La humedad relativa osciló entre 50 y 80 %. El suelo se cubrió con tela blanca de polipropileno (ground cover). Las tres fases del cultivo (semillero, intermedia de alta densidad y final de producción) se desarrollaron en diferentes espacios dentro del mismo invernadero.

Se utilizó el híbrido comercial de jitomate ‘Condor’, con fruto tipo saladette y hábito de crecimiento indeterminado, propio para cultivo en invernadero. Las semillas se sembraron en charolas de poliestireno de 60 cavidades, con un volumen de 200 mL por cavidad y separación de 5 cm. Previo a la siembra, las charolas se lavaron y desinfectaron.

El sustrato para la germinación consistió en una mezcla 1:1 (v/v) de turba vegetal (Cosmopeat®, pH = 5.0–6.5 y conductividad eléctrica [CE] = 0.2–0.8 dS·m⁻¹) y perlita (Multiperl). Las semillas se cubrieron con una capa de vermiculita de aproximadamente 0.5 cm. Las charolas se colocaron sobre estructuras metálicas elevadas a 50 cm del suelo.

Las plántulas se irrigaron, de una a dos veces al día, con una solución nutritiva al 50 % de concentración durante los primeros 40 dds. Posteriormente, se aplicó la solución nutritiva al 100 %, la cual contenía las siguientes concentraciones de nutrimentos (mg·L⁻¹): N = 200, P = 60, K = 250, Ca = 250, Mg = 50, S = 150, Fe = 3, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.2 y Zn = 0.2. Como fuentes de nutrimentos se utilizaron el nitrato de calcio, sulfato de potasio, ácido fosfórico al 85 %, sulfato de magnesio, sulfato ferroso, sulfato de manganeso, ácido bórico, sulfato de cobre y sulfato de zinc. El pH de la solución se ajustó entre 5.5 y 6.5 con ácido sulfúrico diluido al 10 %, y el agua para la solución tenía una CE de 0.3 dS·m⁻¹. La CE resultante de la solución nutritiva osciló entre 2.2 y 2.5 dS·m⁻¹.

A los 40 dds, las plántulas se trasplantaron a macetas de 20 cm de diámetro y 21 cm de altura (6.8 L) para iniciar la etapa intermedia de cultivo en alta densidad (18 plantas·m⁻²). Como sustrato se utilizó arena volcánica (*tezontle* rojo) con partículas de entre 1 y 3 mm de diámetro. Cada planta se sostuvo con un tutor de alambón de 1.2 m con anillos plásticos. La solución nutritiva se preparó en una cisterna y se distribuyó mediante cintillas de goteo (Toro® cal. 8000) con gasto de 3800 mL·h⁻¹ por gotero. El espaciamiento entre goteros fue de 20 cm en la etapa intermedia y de 30 cm en la etapa de producción. El riego se ajustó diariamente para asegurar un 20 % de drenaje con respecto al volumen de solución aplicada en cada riego. Se proporcionaron entre cuatro y ocho riegos diarios de acuerdo con las condiciones climáticas y la etapa fenológica del cultivo.

stage at a density of 6 plants·m⁻². The remaining treatments consisted of different durations (days) of the intermediate and production stages: 25 and 75 (T2), 30 and 70 (T3), 35 and 65 (T4), 40 and 60 (T5), and 45 and 55 (T6), respectively. To initiate the production stage, the intermediate-stage plants (T2-T6) were relocated with their pot and tutored to establish a density of 6 plants·m⁻². They remained in this area until the end of the crop cycle. The experimental design was randomized complete blocks with four replications and 18 plants per experimental unit.

At 85 das, when plants in all treatments were in production, growth variables were recorded, and at the end of the production cycle, yield and its main components were quantified. The growth variables analyzed were:

1. Plant height (cm): measured with a tape measure from the base of the stem to the apex.
2. Stem diameter (mm): measured with an electronic vernier caliper (model 14388, Truper®, China) between the fourth and fifth node of the main stem.
3. Leaf area per plant (cm²): This was determined at 40 days (beginning of the intermediate stage) and every five days from 65 to 85 days using indirect estimation. Initially, destructive sampling of two plants per treatment was carried out, measuring the length and width of each leaf and examining them with a leaf area integrator (LI-3000A, LI-COR®, USA). A linear regression analysis was performed with the data obtained, resulting in the following equation:

$$\text{Estimated leaf area} = 0.2889x + 10.813 \quad R^2 = 0.9477$$

where x corresponds to the product of leaf length $\times$ width. The leaf area per plant corresponded to the sum of the estimated areas of all leaves.

4. Leaf area index (LAI, m²·m⁻²): obtained by dividing the total leaf area of the plants (m² of leaves) by the surface area of the experimental unit.

The yield variables analyzed were:

1. Number of fruits per unit area (fruits·m⁻²): calculated from the number of fruits per plant $\times$ the population density at the production stage (6 plants·m⁻²).
2. Average fruit weight (g): obtained by dividing the total weight of the fruit per unit of surface (g·m⁻² of greenhouse) by the number of fruits harvested on that surface (fruits·m⁻² of greenhouse).
3. Yield per cycle (kg·m⁻²): calculated by multiplying the yield per plant $\times$ the population density of each treatment at the production stage.

Las plantas se despuntaron (remoción de la yema terminal) a los 75 dds y se dejaron dos hojas por arriba de la tercera inflorescencia. El cultivo se condujo a un solo tallo por planta. La cosecha inició a los 120 dds, cuando los frutos alcanzaron coloración rosa, y se realizaron cortes sucesivos durante 20 días.

Se evaluaron seis tratamientos, todos con una etapa de plántula en semillero de 40 días; posteriormente, las plántulas se trasplantaron para iniciar la etapa intermedia en alta densidad (18 plantas·m⁻²), con excepción del testigo (T1), el cual se trasplantó directamente a la etapa de producción con densidad de 6 plantas·m⁻². Los tratamientos restantes consistieron en diferentes tiempos de duración (días) de la etapa intermedia y de producción: 25 y 75 (T2), 30 y 70 (T3), 35 y 65 (T4), 40 y 60 (T5), 45 y 55 (T6), respectivamente. Para iniciar la etapa de producción, las plantas en etapa intermedia (T2-T6) se reubicaron con su maceta y tutor para establecer una densidad de 6 plantas·m⁻². En esta área permanecieron hasta el final del ciclo de cultivo. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones y 18 plantas por unidad experimental.

A los 85 dds, momento en que las plantas de todos los tratamientos estaban en etapa de producción, se registraron variables de crecimiento, y al final del ciclo de producción se cuantificó el rendimiento y sus componentes principales. Las variables de crecimiento analizadas fueron:

1. Altura de planta (cm): se midió con un flexómetro desde la base del tallo hasta el ápice.
2. Diámetro de tallo (mm): se midió con un vernier electrónico (modelo 14388, Truper®, China) entre el cuarto y quinto nudo del tallo principal.
3. Área foliar por planta (cm²): se determinó a los 40 dds (inicio de la etapa intermedia) y cada cinco días desde los 65 hasta los 85 dds mediante estimación indirecta. Inicialmente, se realizó un muestreo destructivo de dos plantas por tratamiento, donde se midió el largo y ancho de cada hoja, y se examinaron con un integrador de área foliar (LI-3000A, LI-COR®, EUA). Con los datos obtenidos, se realizó una regresión lineal y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\text{Área foliar estimada} = 0.2889x + 10.813 \quad R^2 = 0.9477$$

donde x corresponde al producto largo $\times$ ancho de la hoja. El área foliar por planta correspondió a la suma de las áreas estimadas de todas las hojas.

4. Índice de área foliar (IAF, m²·m⁻²): se obtuvo al dividir el área foliar total de las plantas (m² de hojas) entre la superficie de la unidad experimental.

The data obtained were subjected to analysis of variance and comparison of means tests (Tukey, $\alpha = 0.05$). The analyses were performed using the SAS Institute statistical program (2002).

Results and discussion

At 85 das, plants in the control treatment showed lower height and greater stem diameter compared to the treatments that included three stages, except for the treatment with 25 days in the intermediate stage, which showed a stem diameter similar to the control (Table 1). This is explained by the temporal effect of competition for light among plants caused by the high population density in the intermediate stage. According to Jishi (2018) and Martínez-García et al. (2014), competition for light can lead to “shade avoidance syndrome,” characterized by an increase in stem height and a reduction in stem thickness. This occurs because the production of photoassimilates decreases, and a greater proportion of them is used for stem elongation. Furthermore, the synthesis of auxins and gibberellins is stimulated, which induces cell elongation (Bhatla, 2018; Kalra & Bhatla, 2018).

Leaf area per plant, and therefore LAI, were similar in all treatments at the beginning of the production stage. This was due to the topping of the plants at 75 das, which prevented the formation of new leaves. The remaining leaves reached their maximum size before 85 days of age, the date on which the measurements were taken. At the time of transplanting to initiate the intermediate stage at 40 days of growth, plants had a relatively small leaf area, with a population

Las variables de rendimiento analizadas fueron:

1. Número de frutos por unidad de superficie (frutos·m⁻²): se calcularon a partir del número de frutos por planta × la densidad de población en la etapa de producción (6 plantas·m⁻²).
2. Peso medio de fruto (g): se obtuvo al dividir el peso total de los frutos por unidad de superficie (g·m⁻² de invernadero) entre el número de frutos cosechados en esa superficie (frutos·m⁻² de invernadero).
3. Rendimiento por ciclo (kg·m⁻²): se calculó al multiplicar el rendimiento por planta × la densidad de población de cada tratamiento en la etapa de producción.

Los datos obtenidos se sometieron a pruebas de análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$). Los análisis se realizaron en el programa estadístico SAS Institute (2002).

Resultados y discusión

A los 85 dds, las plantas del tratamiento testigo presentaron menor altura y mayor diámetro de tallo en comparación con los tratamientos que incluyeron tres etapas, a excepción del tratamiento con 25 días en la etapa intermedia, el cual mostró un diámetro de tallo similar al testigo (Cuadro 1). Esto se explica por el efecto temporal de competencia por luz entre plantas ocasionado por la alta densidad de población en la etapa intermedia. De acuerdo con Jishi (2018) y Martínez-García et al. (2014), la competencia por luz puede provocar “síndrome de evitación de sombra” (*shade avoidance syndrome*), caracterizado por un incremento en la altura

Table 1. Comparison of means of the effect of the duration of the intermediate stage on the growth of tomato plants at 85 days after sowing.

Cuadro 1. Comparación de medias del efecto de la duración de la etapa intermedia sobre el crecimiento de plantas de jitomate a los 85 días después de la siembra.

Treatments / Tratamientos	Plant height (cm) / Altura de planta (cm)	Stem diameter (mm) / Diámetro de tallo (mm)	Leaf area per plant (cm ²) / Área foliar por planta (cm ²)	LAI in the production stage (m ² ·m ⁻²) / IAF en la etapa de producción (m ² ·m ⁻²)
Control (without IS) / Testigo (sin EI)	74 b	13.8 a	5521	3.31
25 days in IS / 25 días en EI	88 a	13.1 ab	5718	3.43
30 days in IS / 30 días en EI	89 a	12.4 b	5482	3.29
35 days in IS / 35 días en EI	88 a	12.6 b	5695	3.41
40 days in IS / 40 días en EI	88 a	12.1 b	5435	3.26
45 days in IS / 45 días en EI	93 a	12.0 b	5457	3.27
HSD / DMSH	7.45	1.14	965	0.57

IS: intermediate stage; LAI: leaf area index; HSD = honest significant difference. Means with the same letters in each column within each period do not differ statistically (Tukey, $p > 0.05$).

EI: etapa intermedia; IAF: índice de área foliar; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias seguidas de letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p > 0.05$).

density of 18 plants·m⁻² and a LAI of 0.5 m²·m⁻², so competition for light had not yet begun. However, as the intermediate stage prolonged, the LAI increased rapidly, reaching values above 9 m²·m⁻² in the 40-day intermediate stage treatment (Figure 3). This increase intensified competition for light and, consequently, reduced yield in treatments with a longer duration of the intermediate stage.

When a crop's LAI exceeds a certain threshold, plants do not receive sufficient incident solar radiation (Mendoza-Pérez et al., 2022). Under these conditions, the lower leaves of the canopy receive less light, so they consume more photoassimilates than they can produce. This results in a reduction in the absolute growth rate (daily biomass accumulation per plant) (Heuvelink et al., 2018, 2020). When a crop's LAI exceeds a certain threshold, plants do not receive sufficient incident solar radiation (Mendoza-Pérez et al., 2022). Under these conditions, the lower leaves of the canopy receive less light, so they consume more photoassimilates than they can produce. This results in a reduction in the absolute growth rate (daily biomass accumulation per plant) (Heuvelink et al., 2018, 2020).

The highest yield in a complete production cycle was obtained with the control (without intermediate stage), as well as in the treatments with 25 and 75 days, and with 30 and 70 days in the intermediate and production stages, respectively (Table 2), even with the competition for light produced by the high population density during the intermediate stage. In contrast, treatments with longer durations of the intermediate stage significantly and progressively reduced fruit yield. The 45-day treatment at the intermediate stage reduced fruit yield by 33 % compared to the 25- and 30-day treatments (Table 2).

y una reducción en el grosor de los tallos. Esto ocurre porque disminuye la producción de fotoasimilados, los cuales se destinan en mayor proporción a la elongación de tallos. Además, se estimula la síntesis de auxinas y giberelinas, las cuales inducen elongación celular (Bhatla, 2018; Kalra & Bhatla, 2018).

El área foliar por planta y, por lo tanto, el IAF fueron similares en todos los tratamientos al inicio de la etapa de producción. Esto debido al despunte de las plantas realizado a los 75 dds, lo cual impidió la formación de nuevas hojas. Las hojas presentes alcanzaron su tamaño máximo antes de los 85 dds, fecha en que se realizaron las mediciones. Al momento del trasplante para iniciar la etapa intermedia a los 40 dds, las plantas tenían un área foliar relativamente pequeña, con una densidad de población de 18 plantas·m⁻² e IAF de 0.5 m²·m⁻², por lo que aún no iniciaba la competencia por luz. Sin embargo, a medida que se prolongó la etapa intermedia, el IAF aumentó rápidamente hasta alcanzar valores superiores a 9 m²·m⁻² en el tratamiento de 40 días de etapa intermedia (Figura 3). Este incremento intensificó la competencia por luz y, en consecuencia, redujo el rendimiento en los tratamientos con mayor duración de la etapa intermedia.

Cuando el IAF de un cultivo supera cierto umbral, las plantas no reciben suficiente radiación solar incidente (Mendoza-Pérez et al., 2022). En estas condiciones, las hojas inferiores del dosel reciben menor cantidad de luz, por lo que consumen más fotoasimilados de los que son capaces de producir. Esto provoca una reducción en la tasa absoluta de crecimiento (acumulación diaria de biomasa por planta) (Heuvelink et al., 2018, 2020). Asimismo, debido al cambio en la calidad de la luz que penetra al interior del dosel, los fitocromos activan o inhiben genes relacionados con el balance hormonal

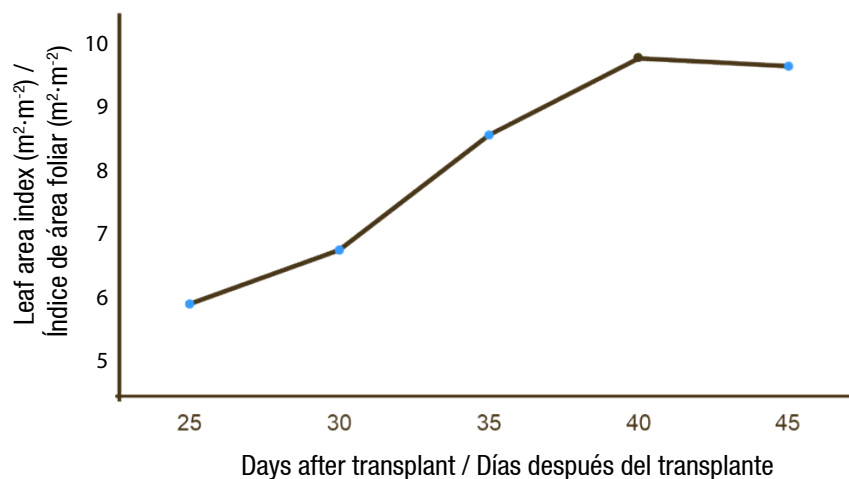


Figure 3. Leaf area index behavior at the end of the intermediate stage of each treatment under the three-stage cultivation system.
Figura 3. Comportamiento del índice de área foliar al final de la etapa intermedia de cada tratamiento bajo el sistema de tres etapas de cultivo.

Table 2. Comparison of means of the effect of the duration of the intermediate stage on yield and its components in tomato plants.**Cuadro 2. Comparación de medias del efecto de la duración de la etapa intermedia sobre el rendimiento y sus componentes en plantas de jitomate.**

Treatment/Tratamiento	Number of fruits (fruits·m ⁻²)/ Número de frutos (frutos·m ⁻²)	Average fruit weight (g)/ Peso promedio de fruto (g)	Fruit yield (kg·m ⁻² ·cycle ⁻¹)/ Rendimiento de fruto (kg·m ⁻² ·ciclo ⁻¹)
Control (without IS)/Testigo (sin EI)	114 a	87 ab	9.8 a
25 days in IS/25 días en EI	109 a	90 a	9.7 a
30 days in IS/30 días en EI	108 a	88 a	9.5 a
35 days in IS/35 días en EI	98 ab	84 abc	8.1 b
40 days in IS/40 días en EI	99 ab	72 c	7.1 bc
45 days in IS/45 días en EI	88 b	75 bc	6.5 c
HSD/DMSH	16	12	0.21

IS: intermediate stage; LAI: leaf area index; HSD = honest significant difference. Means with the same letters in each column within each period do not differ statistically (Tukey, $p > 0.05$).

EI: etapa intermedia; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias seguidas de letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p > 0.05$).

The three-cluster, two-stage system, considered the control, had a yield duration of 105 days from transplant to final harvest. Meanwhile, the 25 and 30-day intermediate-stage treatments (75 and 70 days in production, respectively) showed similar yield and duration. This suggests the possibility of achieving more crop cycles per year with higher yields and, possibly, greater profitability. Therefore, it is necessary to evaluate the economic potential of these production systems.

The short-cycle system proposed in this research could be economically viable in locations with extreme climates like Sinaloa, where tomatoes can only be grown in greenhouses for seven months of the year. During this period, the conventional system produces an average of 140 t·ha⁻¹ (FIRA, 2019). With proper planning, the three-stage system would allow for up to three crop cycles in seven months, with similar yields per cycle.

Regarding fruit number, a tendency toward higher values was observed in plants without an intermediate stage (control) or with an intermediate stage limited to 25 or 30 days. Likewise, average fruit weight increased significantly in these three treatments (Table 2). According to these results, the most appropriate tomato crop management would be a 40-day initial seedling stage, a 30-day intermediate stage, and a 70-day production stage. This scheme achieves a yield similar to the control (9.8 versus 9.5 kg·m⁻² per cycle), although with the possibility of conducting up to five cycles per year.

y, en consecuencia, se altera la distribución de fotoasimilados y se reduce el rendimiento (Jishi, 2018; Martínez-García et al., 2014).

El mayor rendimiento en un ciclo completo de producción se obtuvo con el testigo (sin etapa intermedia), así como en los tratamientos con 25 y 75 días, y con 30 y 70 días en las etapas intermedia y de producción, respectivamente (Cuadro 2), aun con la competencia por luz producida por la alta densidad de población durante la etapa intermedia. En contraste, los tratamientos con mayor duración de la etapa intermedia redujeron de manera significativa y progresiva el rendimiento de fruto. El tratamiento de 45 días en la etapa intermedia redujo el rendimiento de fruto en 33 % en comparación con los tratamientos de 25 y 30 días (Cuadro 2).

El sistema de tres racimos con dos etapas, considerado como testigo, presentó una duración de 105 días desde el trasplante hasta el último corte. Por su parte, los tratamientos con 25 y 30 días en etapa intermedia (75 y 70 días en producción, respectivamente) mostraron rendimiento y duración similares. Esto sugiere la posibilidad de obtener más ciclos de cultivo por año con mayor rendimiento y, posiblemente, mayor rentabilidad. Por ello, resulta necesario evaluar el potencial económico de estos sistemas de producción.

El sistema de ciclos cortos propuesto en esta investigación podría resultar económicamente viable en localidades con climas extremos como el de Sinaloa, donde solo es posible cultivar jitomate en invernadero durante

Several authors have reported higher tomato fruit yields than those obtained in this study. Sánchez-del Castillo et al. (2017) reported yields of 15 to 18 kg·m⁻² per cycle with the cultivar 'Moctezuma' trained to three clusters in two stages (seedbed and production) and a density of 7 plants·m⁻². Moreno-Pérez et al. (2022) obtained 13 kg·m⁻² with the cultivar 'El Cid' managed with 8 plants·m⁻². In both cases, beds with tezontle sand with a capacity of 25 to 30 L of substrate per plant were used as containers. In contrast, in the present study, the population density during the production stage was limited to 6 plants·m⁻² and the substrate volume to 6.8 L per plant, conditions that probably limited yield.

According to Heuvelink et al. (2018, 2020) and Won and Jong (2020), the highest yield can be achieved with an LAI close to 4, so it would be convenient to explore the agronomic behavior with population densities higher than 6 plants·m⁻², without exceeding 18 plants·m⁻² in the intermediate stage. Likewise, it is advisable to explore the use of bags or pots with a greater volume of substrate per plant, since this favors radical development and the availability of oxygen, in addition to improving the retention of the nutrient solution and reducing oscillations in pH and electrical conductivity (Suazo-López et al., 2014).

To optimize this production system, it is recommended to evaluate different population densities at the production stage along with larger container volumes.

Conclusions

The prolongation of the intermediate stage at high plant density was accompanied by a higher leaf area index, taller plants, and thinner stems, resulting in a reduction in yield per unit area due to a lower number of fruits per plant. Among the treatments evaluated, the 30-day intermediate stage and 70-day production treatment showed the best agronomic performance, with a yield of 9.5 kg·m⁻².

End of English version

Referencias / References

- Bhatla, C. S. (2018). Auxins. In C. S. Bhatla & A. M. Lal (Eds.), *Plant physiology, development and metabolism* (pp. 569-602). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_15
- Cabañas-Díaz, A., Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., & Colinas-y León, M. T. B. (2025). Three-cluster tomato production in three stages I: Effects of population densities in the intermediate and final stages on growth and yield. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 31, e24011. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2024.09.011>

siete meses del año. En ese periodo, con el sistema convencional se producen en promedio 140 t·ha⁻¹ (FIRA, 2019). Con una planeación adecuada, el sistema de tres etapas permitiría establecer hasta tres ciclos de cultivo en siete meses, con rendimientos similares por ciclo.

En cuanto al número de frutos, se observó una tendencia a valores más altos en las plantas sin etapa intermedia (testigo) o con una etapa intermedia limitada a 25 o 30 días. Asimismo, el peso medio del fruto aumentó de forma significativa en estos tres tratamientos (Cuadro 2). De acuerdo con estos resultados, el manejo del cultivo de jitomate más adecuado sería una etapa inicial de plántula de 40 días, una etapa intermedia de 30 días y una etapa de producción de 70 días. Este esquema permite alcanzar un rendimiento similar al testigo (9.8 contra 9.5 kg·m⁻² por ciclo), aunque con la posibilidad de realizar hasta cinco ciclos por año.

Diversos autores reportaron rendimientos de fruto de jitomate superiores a los obtenidos en este estudio. Sánchez-del Castillo et al. (2017) registraron rendimientos de 15 a 18 kg·m⁻² por ciclo con el cultivar 'Moctezuma' conducido a tres racimos en dos etapas (semillero y producción) y densidad de 7 plantas·m⁻². Moreno-Pérez et al. (2022) obtuvieron 13 kg·m⁻² con el cultivar 'El Cid' manejado con 8 plantas·m⁻². En ambos casos se utilizaron como contenedores camas con arena de tezontle con capacidad de 25 a 30 L de sustrato por planta. En contraste, en el presente estudio la densidad de población en la etapa de producción se limitó a 6 plantas·m⁻² y el volumen de sustrato a 6.8 L por planta, condiciones que probablemente limitaron el rendimiento.

De acuerdo con Heuvelink et al. (2018, 2020) y Won y Jong (2020), el mayor rendimiento se puede alcanzar con un IAF cercano a 4, por lo que sería conveniente explorar el comportamiento agronómico con densidades de población superiores a 6 plantas·m⁻², sin exceder de 18 plantas·m⁻² en la etapa intermedia. Asimismo, conviene explorar el uso de bolsas o macetas con mayor volumen de sustrato por planta, ya que esto favorece el desarrollo radical y la disponibilidad de oxígeno, además de mejorar la retención de la solución nutritiva y reducir las oscilaciones de pH y conductividad eléctrica (Suazo-López et al., 2014).

Para optimizar este sistema de producción, se recomienda evaluar diferentes densidades de población en la etapa de producción junto con volúmenes de contenedor mayores.

Conclusiones

La prolongación de la etapa intermedia en alta densidad de población se acompañó de un mayor índice de área foliar, plantas más altas y tallos más delgados, lo que

- Costa, J. M., & Heuvelink, E. (2018). The global tomato industry. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (pp. 1-26). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0001>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2019). *Panorama Agroalimentario Tomate Rojo 2019*. <https://es.scribd.com/document/502336019/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019>
- Heuvelink, E., Li, T., & Dorais, M. (2018). Crop growth and yield. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (pp. 89-136). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0089>
- Heuvelink, E., Okello, R. C. O., Peet, M., Giovannoni, J. J., & Dorais, M. (2020). Tomato. In H. C. Wien & H. Stützel (Eds.), *The physiology of vegetable crops* (pp. 138-178). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786393777.0138>
- Jishi, T. (2018). Led lighting technique to control plant growth and morphology. In T. Kosai (Ed.), *Smart plant factory* (pp. 211-222). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_14
- Kalra, G., & Bhatla, S. C. (2018). Gibberellins. In C. S. Bhatla & A. M. Lal (Eds.), *Plant physiology, development and metabolism* (pp. 617-628). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_17
- Martínez-García, J. F., Gallemí, M., Molina-Contreras, M. J., Llorente, B., Bevilacqua, M. R. R., & Quail, P. H. (2014). The shade avoidance syndrome in Arabidopsis: the antagonistic role of phytochrome A and B differentiates vegetation proximity and canopy shade. *PLoS One*, 9(10), e109275. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109275>
- Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Martínez-Ruiz, A., Ojeda-Bustamante, W., Ruelas-Islas, J. R., Ascencio-Hernández, R., López-Ordaz, A. & Núñez-Ramírez, F. (2022). Leaf area and its impact in yield and quality of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 54(1), 57-69. <https://doi.org/10.48162/rev.39.065>
- Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-del Castillo, F., Portillo-Márquez, L., & Vázquez-Rodríguez, J. C. (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>
- Pratt, L., & Ortega, J. M. (2019). *Agricultura protegida en México. Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado*. <http://dx.doi.org/10.18235/0001705>
- Sánchez-del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Coatzín-Ramírez, R., Colinas-León, M. T., & Peña-Lomelí, A. (2010). Evaluación agronómica y fisiotécnica de cuatro sistemas resultó en la reducción del rendimiento por unidad de superficie debido a un menor número de frutos por planta. Entre los tratamientos evaluados, el de 30 días en la etapa intermedia y 70 días en producción mostró el mejor desempeño agronómico, con un rendimiento de 9.5 kg·m⁻².

Fin de la versión en español

de producción en dos híbridos de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(3), 207-214. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2010000300009

Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., & Contreras-Magaña, E. (2012). Development of alternative crop systems for commercial production of vegetables in hydroponics – I: Tomato. *Acta Horticulturae*, 947, 179-187. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.22>

Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Vázquez-Rodríguez, J. C., & González-Núñez, M. A. (2017). Densidades de población y niveles de despunte para variedades contrastantes de jitomate en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 23(3), 163-174. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2017.01.003>

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>

Sánchez-del Castillo, F., & Ponce-Ocampo, J. (1998). Densidad de plantación y nivel de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 4(2), 69-93.

SAS Institute (2002). *SAS/STAT® 9.1 user's guide*. SAS Institute Inc.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). *Panorama Agroalimentario*. <https://es.scribd.com/document/511195869/Atlas-Agroalimentario-2020>

Suazo-López, F., Zepeda-Bautista, R., Sánchez-del Castillo, F., Martínez-Hernández, J. J., Virgen-Vargas, J., & Tijerina-Chávez, L. (2014). Growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as affected by hydroponics, greenhouse and irrigation regimes. *Annual Research & Review in Biology*, 4(24), 4246-4258. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2014/11936>

Won, J. J., & Jong, H. S. (2020). Effect of leaf area management on tomato plant growth in greenhouses. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 61, 981-988. <https://doi.org/10.1007/s13580-020-00283-1>