



# Three-cluster tomato production in three stages I: Effects of population densities in the intermediate and final stages on growth and yield

## Producción de jitomate a tres racimos en tres etapas I: Efectos de densidades de población en las etapas intermedia y final sobre el crecimiento y rendimiento

Alan Cabañas-Díaz; Felipe Sánchez-del Castillo\*;  
Esau del Carmen Moreno-Pérez; María Teresa Beryl Colinas-y León

Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, México, C. P. 56230, MÉXICO.

\*Corresponding author: fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx, tel. +595957 0021.

### Abstract

Given the growing demand for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and the need to optimize the use of space and resources in intensive production systems, new hydroponic cultivation schemes have been implemented that seek to maximize annual production through short cycles of 50 days. The strategy is based on limiting the number of clusters per plant to three and dividing the process into three stages: seedbed, an intermediate phase with high population density, and a final production phase. The objective of this study was to evaluate the effect of different population densities in the intermediate and final stages on agronomic variables. Four densities were compared in each phase (intermediate: 30, 25, 20, and 17 plants·m<sup>-2</sup>; final: 8, 7, 6, and 5 plants·m<sup>-2</sup>) under a randomized complete block experimental design with four replications and 12 plants per experimental unit. Between 70 and 90 days after sowing, the treatment with 25 and 7 plants·m<sup>-2</sup> in intermediate and final stages, respectively, showed an increase in leaf area per plant of 853 cm<sup>2</sup> and a leaf area index of 2.1 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>, while with 17 and 5 plants·m<sup>-2</sup>, the respective increases were 518 cm<sup>2</sup> and 0.9 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>, indicating that the former experienced greater stress due to light competition. With 25 plants·m<sup>-2</sup> in intermediate phase and 7 plants·m<sup>-2</sup> in final phase, a yield of 8.9 kg·m<sup>-2</sup> per crop cycle was obtained, which would allow obtaining up to seven cycles per year.

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

### Resumen

Ante la creciente demanda de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) y la necesidad de optimizar el uso del espacio y los recursos en sistemas de producción intensiva, se han implementado nuevos esquemas de cultivo hidropónico que buscan maximizar la producción anual mediante ciclos cortos de 50 días. La estrategia se basa en limitar el número de racimos por planta a tres y en dividir el proceso en tres etapas: semillero, una fase intermedia con alta densidad de población y una fase final de producción. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes densidades de población en las etapas intermedia y final sobre variables agronómicas. Se compararon cuatro densidades en cada fase (intermedia: 30, 25, 20 y 17 plantas·m<sup>-2</sup>; final: 8, 7, 6 y 5 plantas·m<sup>-2</sup>) bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y 12 plantas por unidad experimental. Entre los 70 y 90 días después de la siembra, el tratamiento con 25 y 7 plantas·m<sup>-2</sup> en fase intermedia y final, respectivamente, presentó un incremento del área foliar por planta de 853 cm<sup>2</sup> y un índice de área foliar de 2.1 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>, mientras que con 17 y 5 plantas·m<sup>-2</sup>, los incrementos respectivos fueron de 518 cm<sup>2</sup> y 0.9 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>, lo cual indica que las primeras experimentaron mayor estrés por competencia de luz. Con 25 plantas·m<sup>-2</sup> en fase intermedia y 7 plantas·m<sup>-2</sup> en fase final, se tuvo un rendimiento de 8.9 kg·m<sup>-2</sup> por ciclo de cultivo, lo que permitiría obtener hasta siete ciclos por año.

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

Please cite this article as follows (APA 7): 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>



Revista Chapingo  
Serie Horticultura

## Introduction

Protected agriculture, based on the use of greenhouses and hydroponic systems, represents an effective strategy for reducing risks in agricultural production and improving economic profitability, especially for small producers (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). The implementation of these technologies in crops of high yield and economic value ensures sufficient income for a dignified life and generates a positive impact on local employment, by creating 10 full-time workdays per hectare, which contributes to regional economic development (Pratt & Ortega, 2019).

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the most widely cultivated vegetable in greenhouse and hydroponic systems in Mexico and several countries around the world (Costa & Heuvelink, 2018; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). In 2018, Mexico exported 1.68 million tons, equivalent to 48.7 % of the national production estimated at just over 3 million tons. Of this volume, 99.7 % was exported to the United States (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2019).

Researchers at the Chapingo Autonomous University (UACH, by its acronym in Spanish) developed and commercially validated an alternative system for hydroponic tomato production. This system allows for a 50 % increase in annual yield compared to the conventional greenhouse system, without increasing the cost per ton produced. This has resulted in greater economic benefits for producers who sell primarily in local markets (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2010).

The developed alternative system (Figure 1) is characterized by two cultivation stages: 1) the seedling stage in the seedbeds (from sowing to transplanting), and 2) the final production phase (from transplanting to the end of the harvest). Unlike the conventional system, which contemplates a single annual cycle, this model allows three cultivation cycles per year. To this end, cultural practices have been implemented, such as delaying transplanting until 45-50 days after sowing (das) and topping plants (removing the terminal bud) above the third inflorescence. Although this strategy reduces individual yield per plant, the smaller leaf area generated allows for an increase in population density to up to 8 plants·m<sup>-2</sup>, which partially offsets this reduction. Furthermore, shortening the transplant-to-harvest period to less than 110 days allows for three crop cycles per year (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017a), with potential annual yields close to 450 t·ha<sup>-1</sup> (Moreno-Pérez et al., 2022; Sánchez-del Castillo et al., 2021).

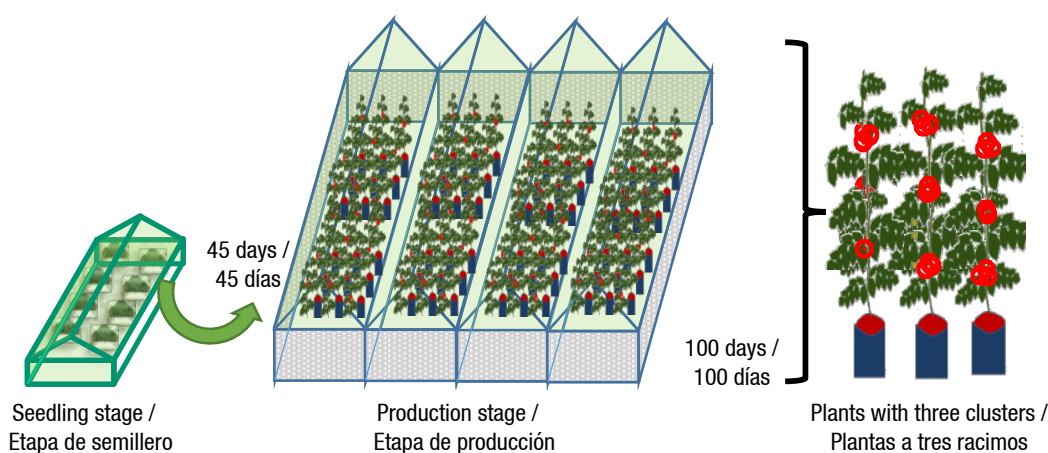
## Introducción

La agricultura protegida, basada en el uso de invernaderos y sistemas hidropónicos, representa una estrategia eficaz para reducir riesgos en la producción agrícola y mejorar la rentabilidad económica, especialmente para pequeños productores (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). La implementación de estas tecnologías en cultivos de alto rendimiento y valor económico permite asegurar ingresos suficientes para una vida digna y genera un impacto positivo en el empleo local, al crear 10 jornales de trabajo de tiempo completo por hectárea, lo cual contribuye al desarrollo económico regional (Pratt & Ortega, 2019).

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada en condiciones de invernadero y sistemas hidropónicos en México y en varios países del mundo (Costa & Heuvelink, 2018; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). En 2018, México exportó 1.68 millones de toneladas, equivalentes a 48.7 % de la producción nacional estimada en poco más de 3 millones de toneladas. De este volumen, el 99.7 % se destinó a Estados Unidos (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2019).

Investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) desarrollaron y validaron comercialmente un sistema alternativo para la producción hidropónica de jitomate. Este sistema permite aumentar el rendimiento anual en un 50 % respecto al sistema convencional bajo invernadero, sin incrementar el costo por tonelada producida, lo cual ha resultado en mayores beneficios económicos para los productores que comercializan principalmente en mercados locales (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2010).

El sistema alternativo desarrollado (Figura 1) se caracteriza por presentar dos etapas de cultivo: 1) la etapa de plántula en semillero (de la siembra al trasplante) y 2) la fase final de producción (del trasplante al final de la cosecha). A diferencia del sistema convencional, que contempla un solo ciclo anual, este modelo permite realizar tres ciclos de cultivo por año. Para ello, se han implementado prácticas culturales, como el retraso del trasplante hasta los 45-50 días después de la siembra (dds) y el despunte de las plantas (eliminación de la yema terminal) por encima de la tercera inflorescencia. Aunque esta estrategia reduce el rendimiento individual por planta, la menor área foliar generada permite aumentar la densidad de población hasta 8 plantas·m<sup>-2</sup>, lo que compensa parcialmente dicha reducción. Además, el acortamiento del periodo de trasplante a cosecha a menos de 110 días permite tener tres ciclos de cultivo por año (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017a), con rendimientos potenciales anuales cercanos a 450 t·ha<sup>-1</sup> (Moreno-Pérez et al., 2022; Sánchez-del Castillo et al., 2021).



**Figure 1. Diagram of a tomato production system with three clusters per plant in two cultivation stages.**

**Figura 1. Esquema de un sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en dos etapas de cultivo.**

For the development and validation of the high population density system, several factors were evaluated, such as obtaining older seedlings at transplant to shorten the productive cycle (López-Valencia et al., 2002; Sánchez-del Castillo et al., 2012), the selection of economical and durable substrates and containers (Caraveo-López et al., 1996; Pineda-Pineda et al., 2019), productivity and precocity depending on different tipping levels (one, two or three clusters per plant), the optimal density within each tipping level (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017a; Sánchez-del Castillo & Ponce-Ocampo, 1998), the evaluation of varieties (considering yield, quality and market preferences) (Sánchez-del Castillo et al., 2017a; Sánchez-del Castillo et al., 1999), vegetative propagation by cuttings to reduce costs due to the high demand for hybrid seed (Juárez-López et al., 2000; Mejía-Betancourt et al., 2023; Moreno-Pérez et al., 2016), and the spatial and temporal arrangement of plants to optimize the interception of solar radiation (Méndez-Galicia et al., 2005; Sánchez-del Castillo et al., 2017b; Vázquez-Rodríguez et al., 2007).

Despite the increased use of seeds, trays, and germination substrate, production costs per cycle remain, on average, lower than those generated with the conventional single-cycle system. In this sense, the cost per kilogram produced is similar, but there is a greater annual profit with three crop cycles (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017b; Sánchez-del Castillo et al., 2021).

In the pursuit of greater annual productivity, early pruning has been evaluated to obtain only one or two clusters per plant, with proportional increases in population density. However, these adjustments have proven impractical due to the decrease in yield per

Para el desarrollo y validación del sistema de alta densidad poblacional, se evaluaron diversos factores como la obtención de plántulas de mayor edad al trasplante para acortar el ciclo productivo (López-Valencia et al., 2002; Sánchez-del Castillo et al., 2012), la selección de sustratos y contenedores económicos y durables (Caraveo-López et al., 1996; Pineda-Pineda et al., 2019), la productividad y precocidad en función de distintos niveles de despunte (uno, dos o tres racimos planta), la densidad óptima dentro de cada nivel de despunte (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017a; Sánchez-del Castillo & Ponce-Ocampo, 1998), la evaluación de variedades (considerando el rendimiento, la calidad y las preferencias del mercado) (Sánchez-del Castillo et al., 2017a; Sánchez-del Castillo et al., 1999), la propagación vegetativa mediante esquejes para reducir costos ante la alta demanda de semilla híbrida (Juárez-López et al., 2000; Mejía-Betancourt et al., 2023; Moreno-Pérez et al., 2016), y la disposición espacial y temporal de las plantas para optimizar la interceptación de la radiación solar (Méndez-Galicia et al., 2005; Sánchez-del Castillo et al., 2017b; Vázquez-Rodríguez et al., 2007).

A pesar del aumento en el uso de semillas, charolas y sustrato para la germinación, los costos de producción por ciclo se mantienen, en promedio, por debajo de los generados con el sistema convencional de un solo ciclo anual. En este sentido, el costo por kilogramo producido es similar, pero se tiene una mayor ganancia anual al tener tres ciclos de cultivo (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017b; Sánchez-del Castillo et al., 2021).

En la búsqueda de una mayor productividad anual, se han evaluado despuntes tempranos para obtener solo uno o dos racimos por planta, con incrementos proporcionales en la densidad de población. No obstante,

plant, the increase in cultivation tasks, and the higher cost per cycle due to the intensive use of hybrid seeds (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017a).

Recently, at the UACH a new proposal has been developed based on three cultivation stages: 1) seedlings in seedbeds, 2) high-density intermediate phase, and 3) final production phase. By topping to three clusters per plant and including the intermediate phase, which lasts 35 to 45 days, the final production phase has been reduced from 100-110 days to 50-60 days, allowing for up to seven cultivation cycles per year (data publication pending).

The seedbed stage maintains its approximate duration of 45 days. Subsequently, the seedlings are transplanted into bags or pots with hydroponic substrate and carried with wire rod staking in an additional smaller greenhouse, where the plants are managed at high population density (18 to 25 plants·m<sup>-2</sup>) for 35 to 45 days. To ensure economic viability, this intermediate phase should not occupy more than 30 % of the greenhouse surface area designated for the final phase. Between 80 and 90 das (i.e., 35 to 45 days after transplanting) the plants are moved to the final production greenhouse (7 to 8 plants·m<sup>-2</sup>), thus beginning the final production phase, which lasts 50 to 60 days (Figure 2).

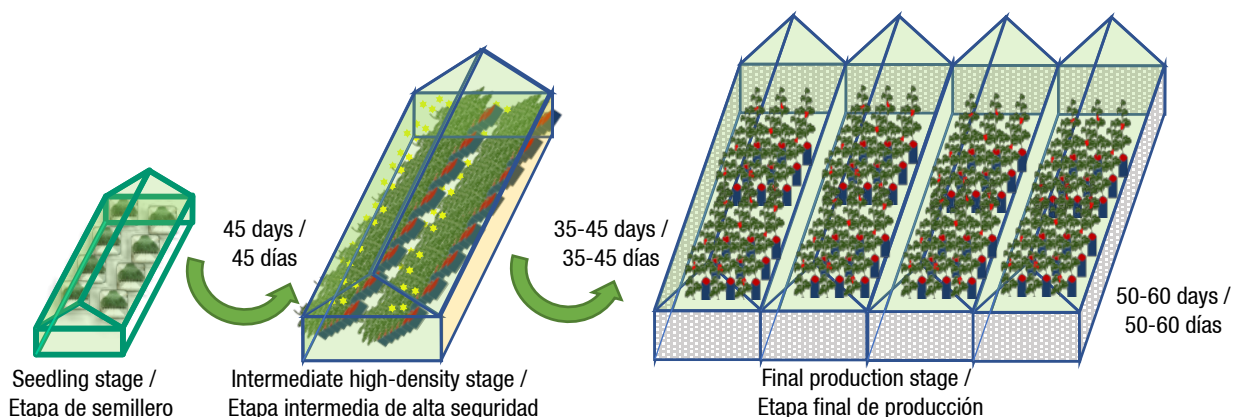
The viability of the three-phase system with three clusters is based on the fact that, at 45 days, the plants have a reduced leaf area, which allows their temporary management at high density without the leaf area index (LAI) generating problems of competition for light. The combination of the seedbed and intermediate stages allows the crops to be staggered over time and reach up to seven annual cycles in the final production greenhouse. This represents the potential to double the

estos ajustes han resultado poco prácticos debido al descenso en el rendimiento por planta, el incremento en las labores culturales y el mayor costo por ciclo debido al uso intensivo de semilla híbrida (Sánchez-del Castillo et al., 2012; Sánchez-del Castillo et al., 2017a).

Recientemente, en la UACH se ha trabajado en una nueva propuesta basada en tres etapas de cultivo: 1) plántulas en semillero, 2) fase intermedia de alta densidad y 3) fase final de producción. Mediante el despunte a tres racimos por planta y la inclusión de la fase intermedia que dura de 35 a 45 días, se ha logrado reducir la fase final de producción de 100-110 días a 50-60 días, lo cual permite alcanzar hasta siete ciclos de cultivo por año (datos pendientes de publicarse).

La etapa de semillero conserva su duración aproximada de 45 días. Posteriormente, las plántulas se trasplantan a bolsas o macetas con sustrato hidropónico y se conducen con tutorado de alambroón en un invernadero adicional más pequeño, en donde las plantas se manejan en alta densidad de población (18 a 25 plantas·m<sup>-2</sup>) por 35 a 45 días. Para garantizar la viabilidad económica, esta fase, denominada intermedia, no debe ocupar más de 30 % de la superficie del invernadero destinada a la fase final. Entre los 80 y 90 dds (es decir, 35 a 45 días después del trasplante), las plantas se trasladan al invernadero de producción final (7 a 8 plantas·m<sup>-2</sup>), con lo que inicia la fase final de producción, que dura de 50 a 60 días (Figura 2).

La viabilidad del sistema de tres etapas con tres racimos se basa en que las plantas tienen un área foliar reducida a los 45 dds, lo cual permite su manejo temporal en alta densidad sin que el índice de área foliar (IAF) genere problemas de competencia por luz. La combinación de las etapas de semillero e intermedia permite escalonar los cultivos en el tiempo y alcanzar hasta siete ciclos anuales en el invernadero de producción definitivo. Esto representa un potencial para duplicar el rendimiento



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

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

annual yield compared to the previous three-cycle, two-phase system. However, overextending the duration of the intermediate phase can induce light competition due to increased leaf area and LAI (Jishi, 2018), which could negatively affect plant growth and yield (Taiz et al., 2018). Heuvelink et al. (2018) and Heuvelink et al. (2020) suggest that the optimal LAI to maximize tomato production is between 3 and 4.

An aspect that remains to be resolved, to successfully implement this three-phase production system, is to define the optimal population densities for the intermediate and final phase, which allow maintaining the LAI within adequate ranges to avoid excessive competition and, at the same time, ensure maximum yield per unit area in each cycle.

Based on the above, this study aimed to evaluate the impact of plant population density during the intermediate and final stages of cultivation on the agronomic behavior and yield per unit area in tomato plants topped at the third cluster. The evaluation considered that the area occupied by plants during the intermediate stage should not exceed 30 % of the area required for the final production phase.

## Materials and methods

The experiment was established at the facilities of the Horticulture Institute of the Chapingo Autonomous University, Mexico (19° 29' 35" N and 98° 52' 19" W, at 2250 m a. s. l.), under greenhouse and hydroponic conditions during a 143-day crop cycle (from sowing to the end of harvest), between March and July 2023.

A chapel-type greenhouse with a metal structure and a high-light-dispersion thermal polyethylene roof was used, oriented north-south. The climatization system included LP gas heating, a wet wall cooling system, and ventilation with exhaust fans located on the opposite wall. The floor 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.

A tomato hybrid Pai-Pai® (Enza Zaden), saladette type and indeterminate growth habit, was used. Seeds were sown in 60-well polystyrene trays, with a volume of 200 cm<sup>3</sup> per well and a 5 cm separation between wells. A 1:1 (v/v) peat moss and perlite mixture was used as the seedbed substrat. The seeds were covered with a 0.5 cm layer of vermiculite.

Seedlings were irrigated with a 50 % nutrient solution for the first 30 das. Subsequently, a 100 % nutrient solution was applied, containing the following nutrient concentrations (mg·L<sup>-1</sup>): N = 200, P = 60, K = 250, Ca = 250, Mg = 50, S = 150, Fe = 3, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.2,

anual respecto al sistema anterior de tres ciclos y dos etapas. Sin embargo, extender en exceso la duración de la fase intermedia puede inducir competencia por luz debido al aumento del área foliar y del IAF (Jishi, 2018), lo cual podría afectar negativamente el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Taiz et al., 2018). Heuvelink et al. (2018) y Heuvelink et al. (2020) sugieren que el IAF óptimo para maximizar la producción de jitomate se encuentra entre 3 y 4.

Un aspecto que queda por resolver, para implementar con éxito este sistema de producción de tres etapas, es definir las densidades de población óptimas para la fase intermedia y la final, que permitan mantener el IAF dentro de rangos adecuados para evitar una competencia excesiva y, al mismo tiempo, asegurar el máximo rendimiento por unidad de superficie en cada ciclo.

Con base en lo anterior, este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de la densidad de población de plantas durante la fase intermedia y la fase final de cultivo, sobre el comportamiento agronómico y el rendimiento por unidad de superficie en plantas de jitomate despuntadas al tercer racimo. En la evaluación se consideró que la superficie ocupada por las plantas en la fase intermedia no excediera el 30 % de la superficie requerida en la fase final de producción.

## Materiales y métodos

El experimento se estableció en las instalaciones del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, México (19° 29' 35" N y 98° 52' 19" O, a 2250 m s. n. m.), bajo condiciones de invernadero e hidroponía durante un ciclo de cultivo de 143 días (desde la siembra hasta el fin de la cosecha), entre marzo y 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. El suelo se cubrió con tela blanca de polipropileno (ground cover). Las tres etapas del cultivo (semillero, intermedia de alta densidad y final de producción) se desarrollaron en diferentes espacios dentro del mismo invernadero.

Se utilizó el híbrido de jitomate Pai-Pai® (Enza Zaden), de tipo saladette y hábito de crecimiento indeterminado. Las semillas se sembraron en charolas de poliestireno de 60 cavidades, con un volumen de 200 cm<sup>3</sup> por cavidad y una separación de 5 cm entre cavidades. Como sustrato para el semillero se utilizó una mezcla de turba vegetal (peat moss) con perlita en proporción 1:1 (v/v). Las semillas se cubrieron con una capa de vermiculita de 0.5 cm.

and Zn = 0.2. Calcium nitrate, potassium sulfate, 85 % phosphoric acid, magnesium sulfate, ferrous sulfate, manganese sulfate, boric acid, copper sulfate, and zinc sulfate were used as nutrient sources.

The nutrient solution was prepared in a reservoir and distributed using drip lines, with drippers spaced 20 cm apart for the intermediate stage and 30 cm apart for the final stage of production. Irrigation frequency and the amount of nutrient solution applied were adjusted daily to ensure 20 % drainage relative to the volume of solution applied per irrigation in each container. Between four and eight daily irrigations were provided depending on weather conditions and the phenological stage of the cultivation.

The seedlings were transplanted at 45 das in 17-cm-diameter, 30-cm-deep pots with a capacity of 6.8 L of substrate. The substrate consisted of red tezontle sand, with particles between 1 and 3 mm in diameter. A 1.2 m long piece of wire rod was placed in each container to serve as a support for the plant; the plants were secured with plastic rings.

Plants in all treatments were topped (removal of the terminal bud) between 75 and 80 das, leaving two leaves above the third inflorescence. Side shoots were removed as they appeared, leading the plants to a single stem and three clusters each. Plants remained in the intermediate phase for 45 days at the density defined for each treatment. At the end of this phase (90 das), the plants were relocated (with a pot and support) to the location assigned for the final production phase and at the density corresponding to the treatment; this phase lasted 53 days. Harvesting began at 120 das, and successive cuts were made over 23 days.

A randomized complete block experimental design was established with four treatments, four replicates, and 12 plants per experimental unit. Treatments were defined by population density in the intermediate and final stages (Table 1). In all cases, six rows of plants with 50 cm wide corridors were established:

To estimate the effect of high density in the intermediate stage on yield and its components, four treatments were included as controls based on two cultivation stages, also managed at three clusters per plant. These treatments consisted of transplanting at 45 days after transplanting and a final phase of 98 days with densities of 8, 7, 6, and 5 plants·m<sup>-2</sup>. The controls were compared only with their equivalent three-phase treatments; that is, with those that shared the same density in the final production phase.

To evaluate the effect of light competition on plant development, growth variables were measured at

Las plántulas se irrigaron con una solución nutritiva al 50 % de concentración durante los primeros 30 dds. Posteriormente, se aplicó la solución nutritiva al 100 %, la cual contenía las siguientes concentraciones de nutrimentos (mg·L<sup>-1</sup>): 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.

La solución nutritiva se preparó en una cisterna y se distribuyó mediante cintillas de goteo, con goteros espaciados a 20 cm para la fase intermedia y 30 cm para la fase final de producción. La frecuencia de los riegos y la cantidad de solución nutritiva a aplicar se ajustaron diariamente para garantizar un 20 % de drenaje respecto al volumen de solución aplicado por riego en cada contenedor. Se proporcionaron entre cuatro y ocho riegos diarios dependiendo de las condiciones climáticas y de la etapa fenológica del cultivo.

Las plántulas se trasplantaron a los 45 dds a macetas de 17 cm de diámetro y 30 cm de profundidad, con capacidad para 6.8 L de sustrato. El sustrato fue arena de tezontle rojo, con partículas entre 1 y 3 mm de diámetro. En cada contenedor se colocó un pedazo de alambón de 1.2 m de largo para utilizarlo como tutor de la planta; las plantas se sujetaron con anillos plásticos.

Las plantas de todos los tratamientos se despuntaron (remoción de la yema terminal) entre los 75 y 80 dds, dejando dos hojas por arriba de la tercera inflorescencia. Los brotes laterales se eliminaron conforme aparecieron, lo cual condujo a las plantas a un solo tallo y tres racimos cada una. Las plantas permanecieron en la fase intermedia durante 45 días, a la densidad definida para cada tratamiento. Al finalizar esta fase (90 dds), las plantas se reubicaron (con maceta y tutor) al lugar asignado para la fase de producción final y a la densidad correspondiente según el tratamiento; esta fase duró 53 días. La cosecha inició a los 120 dds y se hicieron cortes sucesivos durante 23 días.

Se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro tratamientos, cuatro repeticiones y 12 plantas por unidad experimental. Los tratamientos se definieron por la densidad de población en las etapas intermedia y final (Cuadro 1). En todos los casos, se establecieron seis hileras de plantas con pasillos de 50 cm de ancho:

Para estimar el efecto de la alta densidad en la etapa intermedia sobre el rendimiento y sus componentes, se incluyeron cuatro tratamientos como testigos basados en dos etapas de cultivo, también manejados a tres racimos por planta. Estos tratamientos consistieron en

**Table 1. Population density of tomato cultivation in two stages of the three-phase system.****Cuadro 1. Densidad de población del cultivo de jitomate en dos etapas del sistema de tres etapas.**

Treatment/Tratamiento	Density (plants·m <sup>-2</sup> )/Densidad (plantas·m <sup>-2</sup> )	
	Intermediate stage/Etapa intermedia	Final stage/Etapa final
T1	30	8
T2	25	7
T3	20	6
T4	17	5

70 and 90 das (coinciding with the middle and end of the intermediate phase), and yield variables at the end of the crop cycle. The growth variables evaluated were:

1. Leaf area per plant (cm<sup>2</sup>): determined with a leaf area meter (LI-3000A, LI-COR®, USA).
2. Leaf area index (m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>): was obtained from the total leaf area (m<sup>2</sup>) per m<sup>2</sup> of covered surface.
3. Stem diameter (mm): measured with an electronic vernier caliper (model 14388, Truper®, China) between the fourth and fifth node.
4. Plant height (cm): measured with a flexometer from the base of the stem to the apex.

The yield variables measured or calculated were:

1. Number of fruits harvested per plant (fruits·plant<sup>-1</sup>): the fruits harvested in each cut for each experimental unit were counted and divided by the number of plants present per experimental unit.
2. Number of fruits per unit of surface (fruits·m<sup>-2</sup> of greenhouse): it was calculated by multiplying the number of fruits per plant by the final population density of each treatment.
3. Average fruit weight (g): obtained by dividing the total fruit weight per unit area (g·m<sup>-2</sup> of greenhouse) by the number of fruits harvested from that area (fruits·m<sup>-2</sup>). The fruits were weighed on an analytical balance (MC-173467, Ohaus®, USA).
4. Yield per plant (g·plant<sup>-1</sup>): was determined from the sum of the weight of the fruits of all the cuts in each experimental unit divided by the number of plants in the mentioned unit.
5. Yield per unit of surface (kg·m<sup>-2</sup> of greenhouse): calculated from the yield per plant multiplied by the population density of each treatment at the end of production.

The data obtained were subjected to analysis of variance and comparison of means tests (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). To estimate the effect of density in the intermediate stage on yield and its components, orthogonal contrasts were performed on pairs of treatments with the same density in the final phase; that is, with and without an intermediate phase. All analyses were performed using the SAS Institute statistical software (2002).

el trasplante a los 45 dds y una fase final de 98 días con densidades de 8, 7, 6 y 5 plantas·m<sup>-2</sup>. Los testigos se compararon únicamente con sus tratamientos equivalentes de tres etapas; es decir, con los que compartían la misma densidad en la fase final de producción.

Con el propósito de evaluar el efecto de la competencia por luz durante el desarrollo de las plantas, se midieron variables de crecimiento a los 70 y 90 dds (coincidentes con la mitad y el final de la fase intermedia, respectivamente), y variables de rendimiento al final del ciclo de cultivo. Las variables de crecimiento evaluadas fueron:

1. Área foliar por planta (cm<sup>2</sup>): se determinó con un medidor de área foliar (LI-3000A, LI-COR®, EUA).
2. Índice de área foliar (m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>): se obtuvo a partir del área foliar total (m<sup>2</sup>) por m<sup>2</sup> de superficie cubierta.
3. Diámetro de tallo (mm): se midió con un vernier electrónico (modelo 14388, Truper®, China) entre el cuarto y quinto nudo.
4. Altura de planta (cm): se midió con un flexómetro desde la base del tallo hasta el ápice.

Por su parte, las variables de rendimiento medidas o calculadas fueron:

1. Número de frutos cosechados por planta (frutos·planta<sup>-1</sup>): se contabilizaron los frutos cosechados en cada corte por cada unidad experimental y se dividió entre el número de plantas presentes por unidad experimental.
2. Número de frutos por unidad de superficie (frutos·m<sup>-2</sup> de invernadero): se calculó mediante el número de frutos por planta multiplicando por la densidad de población final de cada tratamiento.
3. Peso medio de fruto (g): se obtuvo al dividir el peso total de los frutos por unidad de superficie (g·m<sup>-2</sup> de invernadero) entre el número de frutos cosechados en esa superficie (frutos·m<sup>-2</sup>). Los frutos se pesaron en una balanza analítica (MC-173467, Ohaus®, EUA).
4. Rendimiento por planta (g·planta<sup>-1</sup>): se determinó a partir de la suma del peso de los frutos de todos los cortes en cada unidad experimental entre el número de plantas en dicha unidad.

## Results and discussion

According to the means comparison test, the treatment with a density of 25 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate phase presented an average plant height of 87 cm at 70 das, a value significantly higher than that recorded with the lowest density (17 plants·m<sup>-2</sup>), whose plants reached an average height of 76 cm (Table 2).

Although LAI values were not as high at 70 das, an elongation effect was already observed, probably due to mutual shading between plants generated by the increase in leaf area at high densities (Jishi, 2018; Taiz et al., 2018). Although the differences were not statistically significant, the treatment with 25 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate phase showed a trend towards a higher LAI (5.51 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>), approximately 20 % higher than the treatment with 17 plants·m<sup>-2</sup> (4.01 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>).

At 90 das, following the pruning procedure performed at 80 das, the plants no longer experienced an increase in height, so no significant differences were observed between treatments in this variable. No differences were also found in stem diameter and leaf area per plant. However, the LAI was statistically higher (greater than 7 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>) in the two highest-density treatments (30 and 25 plants·m<sup>-2</sup>), compared to the lowest-density treatment (17 plants·m<sup>-2</sup>), with a value of 4.94 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>.

5. Rendimiento por unidad de superficie (kg·m<sup>-2</sup> de invernadero); se calculó a partir del rendimiento por planta multiplicado por la densidad de población de cada tratamiento al final de la producción.

Los datos obtenidos se sometieron a pruebas de análisis de varianza y comparación de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Para estimar el efecto de la densidad en la etapa intermedia sobre el rendimiento y sus componentes, se efectuaron contrastes ortogonales por pares de tratamientos de la misma densidad en la fase final; es decir, con y sin fase intermedia. Todos los análisis se realizaron en el programa estadístico SAS Institute (2002).

## Resultados y discusión

De acuerdo con la prueba de comparación de medias, el tratamiento con densidad de 25 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase intermedia presentó una altura promedio de planta de 87 cm a los 70 dds, valor significativamente mayor al registrado con la menor densidad (17 plantas·m<sup>-2</sup>), cuyas plantas alcanzaron una altura promedio de 76 cm (Cuadro 2).

Aunque los valores de IAF no eran tan altos a los 70 dds, ya se observaba un efecto de elongación, probablemente debido al sombreado mutuo entre plantas generado por el incremento del área foliar

**Table 2. Comparison of means of growth variables of tomato plants at 70 and 90 days after planting managed with different population densities in their intermediate cultivation phase.**

**Cuadro 2. Comparación de medias de las variables de crecimiento de plantas de jitomate a los 70 y 90 días después de la siembra manejadas con distintas densidades de población en su fase intermedia de cultivo.**

Treatment (plant·m <sup>-2</sup> )/ Tratamiento (plantas·m <sup>-2</sup> )	Plant height (cm)/ Altura de planta (cm)	Stem diameter (mm)/ Diámetro de tallo (mm)	Leaf area per plant (cm <sup>2</sup> )/ Área foliar por planta (cm <sup>2</sup> )	LAI (m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )/ IAF (m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )
70 days after sowing / 70 días después de la siembra				
IP = 30 and FP = 8 / FI = 30 y FF = 8	80 ab	7.8 a	1777 a	5.33 a
IP = 25 and FP = 7 / FI = 25 y FF = 7	87 a	8.4 a	2204 a	5.51 a
IP = 20 and FP = 6 / FI = 20 y FF = 6	78 ab	8.5 a	2057 a	4.11 a
IP = 17 and FP = 5 / FI = 17 y FF = 5	76 b	8.5 a	2228 a	4.01 a
HSD/DMSH	9.64	1.17	700	1.59
90 days after sowing / 90 días después de la siembra				
IP = 30 and FP = 8 / FI = 30 y FF = 8	85 a	9.9 a	2563 a	7.68 a
IP = 25 and FP = 7 / FI = 25 y FF = 7	80 a	9.6 a	3057 a	7.64 a
IP = 20 and FP = 6 / FI = 20 y FF = 6	77 a	8.7 a	2791 a	5.58 ab
IP = 17 and FP = 5 / FI = 17 y FF = 5	77 a	9.7 a	2746 a	4.94 b
HSD/DMSH	10.09	1.22	1010	2.62

IP: intermediate phase; FP: final phase; LAI: leaf area index; HSD = honest significant difference. Means with the same letters in each column within each period do not differ statistically (Tukey,  $P \geq 0.05$ ).

FI: fase intermedia; FF: fase final; IAF: índice de área foliar; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales en cada columna dentro de cada periodo no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \geq 0.05$ ).

A more detailed analysis of the data in Table 2 reveals that, during the last 20 days of the intermediate phase, plants in the higher density treatments showed an increase of almost 40 % in their leaf area per plant and in their LAI, while this increase was only 25 % in the lower density treatments. Specifically, the treatment with 25 plants·m<sup>-2</sup> increased its leaf area per plant by 853 cm<sup>2</sup> (an average of 42.65 cm<sup>2</sup> per day) and its LAI by 2.1 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>. In contrast, the treatment with 17 plants·m<sup>-2</sup> only increased its leaf area by 518 cm<sup>2</sup> (an average of 25.9 cm<sup>2</sup> per day) and its LAI by 0.93 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>. These results suggest that plants at high densities experienced light competition stress at early stages, as noted by Jishi (2018) and Taiz et al. (2018), which can have negative effects on plant yield (Heuvelink et al., 2020; Papadopoulos & Pararajasingham, 1997; Taiz et al., 2018).

Comparison of the means of the yield variables and their components shows that the number of fruits per plant was similar among the treatments evaluated (Table 3). However, the treatment with densities of 30 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate phase and 8 plants·m<sup>-2</sup> in the final phase had the highest number of fruits per unit area. The highest average fruit weight was obtained in the treatment with 17 and 5 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate and final stages, respectively, which differed statistically from the treatment with the highest density (30 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate phase and 8 plants·m<sup>-2</sup> in the final phase). Regarding yield per plant, the treatment with 17 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate phase and 5 plants·m<sup>-2</sup> in the final phase showed the highest statistical value (1.51 kg·plant<sup>-1</sup>). However, the four treatments evaluated showed similar yields per unit area.

en altas densidades (Jishi, 2018; Taiz et al., 2018). Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas, el tratamiento con 25 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase intermedia presentó una tendencia hacia un IAF más alto (5.51 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>), aproximadamente 20 % mayor al tratamiento con 17 plantas·m<sup>-2</sup> (4.01 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>).

A los 90 dds, tras el despunte realizado a los 80 dds, las plantas ya no experimentaron un aumento en altura, por lo que no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en esta variable. Tampoco se encontraron diferencias en diámetro de tallo y área foliar por planta. Sin embargo, el IAF fue estadísticamente superior (mayor a 7 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>) en los dos tratamientos con mayor densidad (30 y 25 plantas·m<sup>-2</sup>), en comparación con el tratamiento de menor densidad (17 plantas·m<sup>-2</sup>), con un valor de 4.94 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>.

Un análisis más detallado de los datos del Cuadro 2 revela que, durante los últimos 20 días de la fase intermedia, las plantas de los tratamientos con mayor densidad mostraron un aumento de casi 40 % en su área foliar por planta y en su IAF, mientras que este incremento fue de solo 25 % en los tratamientos con menor densidad. Específicamente, el tratamiento con 25 plantas·m<sup>-2</sup> incrementó su área foliar por planta en 853 cm<sup>2</sup> (un promedio de 42.65 cm<sup>2</sup> por día) y su IAF en 2.1 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>. En contraste, el tratamiento con 17 plantas·m<sup>-2</sup> solo aumentó su área foliar en 518 cm<sup>2</sup> (un promedio de 25.9 cm<sup>2</sup> por día) y su IAF en 0.93 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>. Estos resultados sugieren que las plantas en alta densidad experimentaron estrés por competencia de luz en etapas tempranas, como lo señalan Jishi (2018) y Taiz et al. (2018), lo cual puede tener efectos negativos en el rendimiento por planta (Heuvelink et al., 2020; Papadopoulos & Pararajasingham, 1997; Taiz et al., 2018).

**Table 3. Comparison of means of the yield variables and their components in tomato plants managed with different population densities under the three-phase system.**

**Cuadro 3. Comparación de medias de las variables de rendimiento y sus componentes en plantas de jitomate manejadas con distintas densidades de población bajo el sistema de tres etapas.**

Treatment (plants·m <sup>-2</sup> )/ Tratamiento (plantas·m <sup>-2</sup> )	Fruits per plant/ Frutos por planta	Fruis per m <sup>2</sup> / Frutos por m <sup>2</sup>	Average fruit weight (g)/ Peso medio de frutos (g)	Yield (kg·plant <sup>-1</sup> )/ Rendimiento (kg·planta <sup>-1</sup> )	Yield (kg·m <sup>-2</sup> )/ Rendimiento (kg·m <sup>-2</sup> )
IP = 30 and FP = 8 / FI = 30 y FF = 8	11.7 a	94 a	94 b	1.10 b	8.80 a
IP = 25 and FP = 7 / FI = 25 y FF = 7	11.4 a	80 b	112 ab	1.27 b	8.89 a
IP = 20 and FP = 6 / FI = 20 y FF = 6	11.5 a	69 bc	108 ab	1.24 b	7.44 a
IP = 17 and FP = 5 / FI = 17 y FF = 5	13.3 a	66 c	116 a	1.51 a	7.58 a
HSD/DMSH	2.14	12.7	21.4	0.24	1.66

IP: intermediate phase; FP: final phase; HSD = honest significant difference. Means with the same letters in each column within each period do not differ statistically (Tukey,  $P \geq 0.05$ ).

FI: fase intermedia; FF: fase final; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \geq 0.05$ ).

The results confirmed that the increase in plant density during the intermediate phase has a negative effect on the components of plant yield. Both the number of fruits per plant and the average fruit weight decreased as plant density increased during this phase, resulting in a reduction in individual plant yield. However, the number of fruits per unit area was higher in treatments with higher densities, which partially offset the lower individual fruit weight and resulted in similar yield per unit area across treatments.

Considering that with the three-phase system, up to seven crop cycles per year can be obtained by reducing the final production phase to between 50 and 60 days, any of the evaluated treatments could achieve an annual yield greater than 50 kg·m<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup> (500 t·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>).

When comparing the pairs of treatments of the three-phase system with the two-phase system, at the same population density in the final phase (Table 4), it was observed that the high densities in the intermediate phase (30 and 25 plants·m<sup>-2</sup>) of the three-phase system significantly reduced the number of fruits per plant and per m<sup>2</sup> compared to the two-phase system under the same final density. However, this was not the case at low densities in the intermediate phase (20 and 17 plants·m<sup>-2</sup>). A similar trend was detected for yield per plant and per unit area, although in this case the density of 20 plants·m<sup>-2</sup> also showed significant differences in favor of the two-phase system. Furthermore, the average fruit weight was negatively affected under the higher density treatment.

The observed performance when comparing both systems can be explained by the fact that the greater increase in LAI caused by high densities during

La comparación de medias de las variables de rendimiento y sus componentes muestra que el número de frutos por planta fue similar entre los tratamientos evaluados (Cuadro 3). Sin embargo, el tratamiento con densidades de 30 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase intermedia y 8 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase final presentó el mayor número de frutos por unidad de superficie. El mayor peso medio de fruto se obtuvo en el tratamiento con 17 y 5 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase intermedia y final, respectivamente, lo cual difirió estadísticamente del tratamiento con mayor densidad (30 plantas·m<sup>-2</sup> en fase intermedia y 8 plantas·m<sup>-2</sup> en fase final). En cuanto al rendimiento por planta, el tratamiento con 17 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase intermedia y 5 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase final presentó estadísticamente el mayor valor (1.51 kg·planta<sup>-1</sup>). No obstante, los cuatro tratamientos evaluados presentaron un rendimiento por unidad de superficie similar.

Los resultados obtenidos confirman que el aumento en la densidad de plantas durante la fase intermedia tiene un efecto negativo sobre los componentes del rendimiento por planta. Tanto el número de frutos por planta como el peso medio de los frutos disminuyeron a medida que incrementó la densidad de población en esta fase, lo cual ocasionó una reducción en el rendimiento individual de las plantas. Sin embargo, el número de frutos por unidad de superficie fue mayor en los tratamientos con densidades más altas, lo cual compensó parcialmente el menor peso individual de los frutos y resultó en un rendimiento por unidad de superficie similar entre los tratamientos.

Si se considera que con el sistema de tres etapas se pueden obtener hasta siete ciclos de cultivo por año al reducir la fase final de producción a entre 50 y 60 días, cualquiera de los tratamientos evaluados

**Table 4. Orthogonal contrast tests of the means of the yield variables and their components between the three- and two-phase tomato cultivation treatments with the same population density in the final stage.**

**Cuadro 4. Pruebas de contrastes ortogonales de las medias de las variables de rendimiento y sus componentes entre los tratamientos de tres y dos etapas de cultivo de jitomate con la misma densidad de población en la etapa final.**

Contrast (plantas·m <sup>-2</sup> )/ Contraste (plantas·m <sup>-2</sup> )	Fruits per plant/ Frutos por planta	Fruits per m <sup>2</sup> / Frutos por m <sup>2</sup>	Average fruit weight (g)/ Peso medio de frutos (g)	Yield (kg·plant <sup>-1</sup> )/ Rendimiento (kg·planta <sup>-1</sup> )	Yield (kg·m <sup>-2</sup> )/ Rendimiento (kg·m <sup>-2</sup> )
IP = 30 and FP = 8 vs. 8 in two stages/ FI = 30 y FF = 8 vs. 8 en dos etapas	11.7 vs. 14.7**	94 vs. 118**	94 vs. 108*	1.1 vs. 1.6**	8.8 vs. 12.7**
IP = 25 and FP = 7 vs. 7 in two stages/ FI = 25 y FF = 7 vs. 7 en dos etapas	11.3 vs. 13.6*	80 vs. 96*	112 vs. 110 <sup>ns</sup>	1.3 vs. 1.5*	8.9 vs. 10.5**
IP = 20 and FP = 6 vs. 6 in two stages/ FI = 20 y FF = 6 vs. 6 en dos etapas	11.5 vs. 12.6 <sup>ns</sup>	69 vs. 75 <sup>ns</sup>	108 vs. 115 <sup>ns</sup>	1.2 vs. 1.5*	7.4 vs. 8.7*
IP = 17 and FP = 5 vs. 5 in two stages/ FI = 17 y FF = 5 vs. 5 en dos etapas	13.3 vs. 13.4 <sup>ns</sup>	66 vs. 69 <sup>ns</sup>	116 vs. 116 <sup>ns</sup>	1.5 vs. 1.5 <sup>ns</sup>	7.6 vs. 7.7 <sup>ns</sup>

\*\* : highly significant ( $P \leq 0.001$ ); \* : significant ( $P \leq 0.05$ ); ns : not significant; IP: intermediate phase; FP: final phase.

\*\* : altamente significativo ( $P \leq 0.001$ ); \* : significativo ( $P \leq 0.05$ ); ns : no significativo; FI: fase intermedia; FF: fase final.

the intermediate phase intensified competition for solar radiation among plants, which negatively affected the absorption of photoassimilates per plant and, consequently, reduced daily dry weight gain (Heuvelink et al., 2020). These factors affected the final yield compared to plants that did not have an intermediate phase.

Although yield per cycle was lower in plants managed with three stages, the possibility of achieving more than double the number of crop cycles per year with this scheme considerably increases the potential annual yield, which could translate into a more profitable system for the producer. However, a detailed cost-benefit analysis is needed to support this hypothesis. For example, the two-phase system with a final density of 8 plants·m<sup>-2</sup> generated a yield of 12.7 kg·m<sup>-2</sup> per cycle, and allows for up to three cycles per year (Sánchez-del Castillo et al., 2012), which is equivalent to a potential annual productivity of 38.1 kg·m<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup>. In contrast, the three-phase system, with an intermediate phase of 30 plants·m<sup>-2</sup> and a final phase of 8 plants·m<sup>-2</sup>, yielded 8.8 kg·m<sup>-2</sup> per cycle, but with the possibility of carrying out up to seven cycles per year, representing a potential annual productivity of 61.6 kg·m<sup>-2</sup>·year<sup>-1</sup>; that is, 62 % more production than the two-phase system. Although this system involves higher production costs, these are likely to be offset by the increase in annual yield.

It should be noted that the yield per unit area per cycle was lower than that reported in other studies that used the three-cluster system in two cultivation stages with similar densities in the final phase. In this regard, Sánchez-del Castillo et al. (2017a) obtained yields of 15 to 18 kg·m<sup>-2</sup> per cycle with the cultivar 'Moctezuma' at a density of 7 plants·m<sup>-2</sup>, while Moreno-Pérez et al. (2022) reported 13 to 14 kg·m<sup>-2</sup> with the cultivar 'El Cid' at a density of 8 plants·m<sup>-2</sup>. In both studies, they used beds filled with tezontle sand with a depth of 30 cm as containers, which provided a volume of 25 to 30 L of substrate per plant, in contrast to the 6.8 L used in the present study.

According to Heuvelink et al. (2018) and Heuvelink et al. (2020), the highest yield can be achieved with an LAI close to 4, which is consistent with the results obtained. Therefore, it is recommended to use population densities of 7 to 8 plants·m<sup>-2</sup> in the final production phase. Furthermore, it is suggested to explore the use of bags or pots with a greater volume of substrate per plant, since this could improve yield by providing better conditions for root development, as well as improving oxygenation and the retention capacity of the nutrient solution, with fewer fluctuations in pH and electrical conductivity between irrigations (Suazo-López et al., 2014).

podría alcanzar un rendimiento anual superior a los 50 kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> (500 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>).

Al comparar los pares de tratamientos del sistema de tres etapas con el sistema de dos etapas, a la misma densidad de población en la fase final (Cuadro 4), se observó que las altas densidades en fase intermedia (30 y 25 plantas·m<sup>-2</sup>) del sistema de tres etapas redujeron significativamente el número de frutos por planta y por m<sup>2</sup> en comparación con el sistema de dos etapas bajo la misma densidad final. Sin embargo, esto no ocurre con las densidades bajas en la fase intermedia (20 y 17 plantas·m<sup>-2</sup>). Una tendencia similar se detectó en el rendimiento por planta y por unidad de superficie, aunque en este caso la densidad de 20 plantas·m<sup>-2</sup> también mostró diferencias significativas a favor del sistema de dos etapas. Además, el peso medio de los frutos se vio negativamente afectado bajo el tratamiento de mayor densidad.

El comportamiento observado al comprar los dos sistemas se puede explicar porque el mayor incremento del IAF provocado por las altas densidades durante la fase intermedia intensificó la competencia por radiación solar entre las plantas, lo cual afectó negativamente la absorción de fotoasimilados por planta y, en consecuencia, redujo la ganancia diaria de peso seco (Heuvelink et al., 2020). Estos aspectos afectaron el rendimiento final respecto a las plantas que no tuvieron fase intermedia.

Aunque el rendimiento por ciclo fue menor en las plantas manejadas con tres etapas, la posibilidad de realizar más del doble de ciclos de cultivo por año con este esquema incrementa considerablemente el rendimiento potencial anual, lo cual se podría traducir en un sistema más rentable para el productor. Sin embargo, es necesario realizar un análisis detallado de costo-beneficio que sustente esta hipótesis. Por ejemplo, el sistema de dos etapas con una densidad final de 8 plantas·m<sup>-2</sup> generó un rendimiento de 12.7 kg·m<sup>-2</sup> por ciclo y permite obtener hasta tres ciclos por año (Sánchez-del Castillo et al., 2012), lo cual equivale a una productividad potencial anual de 38.1 kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>. En contraste, el manejo en tres etapas con fase intermedia de 30 plantas·m<sup>-2</sup> y fase final de 8 plantas·m<sup>-2</sup> presentó un rendimiento de 8.8 kg·m<sup>-2</sup> por ciclo, pero con la posibilidad de realizar hasta siete ciclos por año, lo cual representa una productividad potencial anual de 61.6 kg·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>; es decir, 62 % más producción que el sistema de dos etapas. Aunque este sistema implica mayores costos de producción, es probable que estos se vean compensados por el aumento en el rendimiento anual.

Cabe señalar que el rendimiento por unidad de superficie por ciclo fue inferior al reportado en otros estudios que emplearon el sistema a tres racimos en dos etapas de cultivo con densidades similares en la

## Conclusions

In the three-phase tomato production system, higher population densities during the intermediate phase (25 and 30 plants·m<sup>-2</sup>) caused internode elongation at 70 days after planting and increased leaf area index at 90 days, compared to plants established at lower densities in the same phase.

Although the three-phase system presented a lower fruit yield per cycle compared to the two-phase system when the same density was used in the final phase, its greater number of possible cycles per year (up to seven) provides a significantly higher potential annual yield per unit area.

The tomato plants established at a density of 25 plants·m<sup>-2</sup> in the intermediate phase and 7 plants·m<sup>-2</sup> in the final phase reached a yield of 8.9 kg·m<sup>-2</sup> per crop cycle, with the possibility of obtaining seven cycles per year, which represents an annual potential of 62.3 kg·m<sup>-2</sup> (623 t·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>). Therefore, it is proposed to use this combination of densities in the production protocol of the three-cluster tomato cultivation system in three stages that is being developed.

*End of English version*

## References / Referencias

- Caraveo-López, F. J., Baca-Castillo, G. A., Tirado-Torres, J. L., & Sánchez-del Castillo, F. (1996). El cultivo hidropónico de jitomate empleando polvo de bonote de coco como sustrato y su respuesta al amonio y potasio. *Agrociencia*, 30(4), 495-500. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1401>
- 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*. FIRA. <https://es.scribd.com/document/502336019>
- 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. Stutzel (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](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_14)

fase final. Al respecto, Sánchez-del Castillo et al. (2017a) obtuvieron rendimientos de 15 a 18 kg·m<sup>-2</sup> por ciclo con el cultivar 'Moctezuma' a una densidad de 7 plantas·m<sup>-2</sup>, mientras que Moreno-Pérez et al. (2022) reportaron de 13 a 14 kg·m<sup>-2</sup> con el cultivar 'El Cid' a una densidad de 8 plantas·m<sup>-2</sup>. En ambos estudios utilizaron como contenedores camas rellenas con arena de tezontle con 30 cm de profundidad, lo que proporcionó un volumen de 25 a 30 L de sustrato por planta, en contraste con los 6.8 L usados en el presente estudio.

De acuerdo con Heuvelink et al. (2018) y Heuvelink et al. (2020), el mayor rendimiento se puede alcanzar con un IAF cercano a 4, lo cual concuerda con los resultados obtenidos. Por ello, se recomienda usar densidades de población de 7 a 8 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase final de producción. Además, se sugiere explorar el uso de bolsas o macetas con mayor volumen de sustrato por planta, ya que esto podría mejorar el rendimiento al proporcionar mejores condiciones para el desarrollo de la raíz, así como mejorar la oxigenación y la capacidad de retención de la solución nutritiva, con menos oscilaciones del pH y conductividad eléctrica entre riegos (Suazo-López et al., 2014).

## Conclusiones

En el sistema de producción de jitomate basado en tres etapas de cultivo, las mayores densidades de población durante la fase intermedia (25 y 30 plantas·m<sup>-2</sup>) causaron elongación de entrenudos a los 70 días después de la siembra e incrementaron el índice de área foliar a los 90 días, en comparación con las plantas establecidas a densidades menores en la misma fase.

Aunque el sistema de tres etapas presentó un menor rendimiento de frutos por ciclo en comparación con el sistema de dos etapas cuando se empleó la misma densidad en la fase final, su mayor número de ciclos posibles por año (hasta siete) confiere un rendimiento potencial anual por unidad de superficie considerablemente superior.

Las plantas de jitomate establecidas a una densidad de 25 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase intermedia y 7 plantas·m<sup>-2</sup> en la fase final alcanzaron un rendimiento de 8.9 kg·m<sup>-2</sup> por ciclo de cultivo, con la posibilidad de obtener siete ciclos por año, lo cual representa un potencial anual de 62.3 kg·m<sup>-2</sup> (623 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>). Por lo tanto, se propone utilizar esta combinación de densidades en el protocolo de producción del sistema de cultivo de jitomate a tres racimos en tres etapas que se está desarrollando.

*Fin de la versión en español*

- Juárez-López, G., Sánchez-del Castillo, F., & Contreras-Magaña, E. (2000). Efectos del manejo de esquejes sobre el rendimiento de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 6(1), 19-23.
- López-Valencia, M., Sánchez-del Castillo, F., & Contreras-Magaña, E. (2002). Efecto del cycocel y B-nueve sobre plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) manejadas a dos racimos y altas densidades. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 8(2), 161-170. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.03.025>
- 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>
- Méndez-Galicia, T., Sánchez-del Castillo, F., Sahagún-Castellanos, J., & Contreras-Magaña, E. (2005). Doseles escaleriformes con hileras de plantas de jitomate orientadas en dirección Este-Oeste. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(1), 185-192. <https://www.redalyc.org/pdf/609/60912502026.pdf>
- Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-del Castillo, F., González-Molina, L., Contreras-Magaña, E., & Messina-Fernández, R. U. (2016). Métodos de enraizamiento de esquejes para la producción de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico. *Agro Productividad*, 9(10), 50-55. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/831>
- 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>
- Papadopoulos, A. P., & Pararajasingham, S. (1997). The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A review. *Scientia Horticulturae*, 69(1-2), 1-29. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(96\)00983-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00983-1)
- Pratt, L., & Ortega, J. M. (2019). *Agricultura protegida en México. Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado*. Banco Interamericano de Desarrollo. [https://www.greenfinancelac.org/wp-content/uploads/2019/11/Agricultura\\_protegida\\_en\\_M%C3%A9xico\\_Elaboraci%C3%B3n\\_de\\_la\\_metodolog%C3%ADa\\_para\\_el\\_primer\\_bono\\_verde\\_agr%C3%ADcola\\_certificado\\_es.pdf](https://www.greenfinancelac.org/wp-content/uploads/2019/11/Agricultura_protegida_en_M%C3%A9xico_Elaboraci%C3%B3n_de_la_metodolog%C3%ADa_para_el_primer_bono_verde_agr%C3%ADcola_certificado_es.pdf)
- Pineda-Pineda, J., Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Valdez-Aguilar, L. A., Castillo-González, A. M., Ramírez-Árias, A., & Vargas-Canales, M. (2019). Inmovilización y retención nutrimental en aserrín de pino como sustrato agrícola. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 261-271. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.448>
- 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., & 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., Coatzín-Ramírez, R., Colinas-León, M. T., & Peña-Lomelí, 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://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60919865008>
- Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Vázquez-Rodríguez, J. C., & González-Núñez, M. A. (2017a). 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., Moreno-Pérez, E. C., Pastor-Zarandona, O. A., & Contreras-Magaña, E. (2017b). Disposición de plantas de tomate en doseles en forma de escalera bajo dos densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(3), 333-340. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.3.333-340>
- Sánchez-del Castillo, F., Ortiz-Cereceres, J., Mendoza-Castillo, C., González-Hernández, V.A., & Colinas-León, M.T. (1999). Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate apto para un ambiente no restrictivo. *Agrociencia*, 33(1), 21-29. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1576/1576>
- Sánchez-del Castillo, F., & Ponce-Ocampo, J. (1998). Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 4(2), 89-94.
- 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>
- SAS Institute (2002). *SAS/STAT® 9.1 user's guide*. SAS Institute Inc.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). *Panorama Agroalimentario 2020*. <https://sursureste.org.mx/wp-content/uploads/2022/08/Sandia-Panorama-Agroalimentario-2022.pdf>
- 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>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Fundamentals of Plant Physiology*. Oxford University Press.
- Vázquez-Rodríguez, J. C., Sánchez-del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. C. (2007). Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 55-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60913108>