



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



**PRODUCCIÓN INTENSIVA DE JITOMATE A TRES
RACIMOS POR PLANTA EN TRES FASES DE
CULTIVO**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

ALAN CABAÑAS DÍAZ

Bajo la supervisión del

Dr. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

Chapingo, Estado de México, junio de 2025



PRODUCCIÓN INTENSIVA DE JITOMATE A TRES RACIMOS POR PLANTA EN TRES FASES DE CULTIVO

Tesis realizada por **ALAN CABAÑAS DÍAZ**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



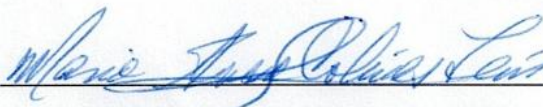
DR. ESAÚ DEL CARMEN MORENO PÉREZ

ASESOR:



DR. J. JESÚS MAGDALENO VILLAR

ASESOR:



DRA. MARÍA TERESA BERYL COLINAS Y LEÓN

LECTOR EXTERNO:



DRA. LUCILA GONZÁLEZ MOLINA

Chapingo, Estado de México, junio de 2025

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICATORIA	vii
DATOS BIOGRÁFICOS	viii
RESUMEN GENERAL	10
GENERAL ABSTRACT	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	12
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1 Invernaderos e hidroponía en México	19
2.2 Generalidades sobre la planta de jitomate	21
2.3 Importancia económica del jitomate	23
2.4 Requerimientos climáticos.....	24
2.5 Sistema convencional de producción de jitomate bajo invernadero en México	25
2.6 Sistema alternativo de producción de jitomate bajo invernadero e hidroponía	26
2.7 Sistema alternativo basado en tres fases de cultivo.....	27
2.8 Desafíos asociados a las altas densidades.....	29
2.9 Últimas Investigaciones.....	30

2.10 Literatura citada.....	30
CAPÍTULO 3. PRODUCCIÓN DE JITOMATE A TRES RACIMOS EN TRES FASES I: EFECTOS DE DENSIDADES DE POBLACIÓN EN LAS FASES INTERMEDIA Y FINAL SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO	36
Resumen	37
Introducción.....	38
Materiales y métodos	42
Resultados y discusión.....	46
Conclusiones.....	51
Referencias	51
CAPÍTULO 4. PRODUCCIÓN DE JITOMATE A TRES RACIMOS EN TRES FASES II: EFECTOS DE LA DURACIÓN DE LA FASE INTERMEDIA SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO	56
Resumen	57
Introducción.....	58
Materiales y métodos	62
Resultados y discusión.....	66
Conclusiones.....	71
Literatura citada.....	71
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....	74

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO 1

Cuadro 1. Densidad de población del cultivo de jitomate en dos etapas del sistema de tres fases.	43
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.	46
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 fases.	48
Cuadro 4. Pruebas de contrastes ortogonales de las medias de las variables de rendimiento y sus componentes entre los tratamientos de tres y dos fases de cultivo de jitomate con la misma densidad de población en la etapa final.	49

CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Comparación de medias del efecto de la duración de la fase intermedia sobre el crecimiento de plantas de jitomate, 85 días después de la siembra.	67
Cuadro 2. Comparación de medias del efecto de la duración de la fase intermedia sobre el rendimiento y sus componentes en plantas de jitomate.....	69

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 1. Esquema de un sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en dos fases de cultivo.....	39
Figura 2. Esquema de un sistema de producción a tres racimos por planta en tres fases de cultivo.	41

CAPÍTULO 4

Figura 1. Esquema del sistema de producción a tres racimos por planta y tres ciclos por año en dos fases de cultivo (semillero y producción).	59
Figura 2. Esquema de sistema de producción a tres racimos por planta y seis a siete ciclos por año en tres fases de cultivo.....	61
Figura 3. Comportamiento del índice de área foliar al momento del trasplante y al final de la etapa intermedia de cada tratamiento bajo el sistema de tres fases de cultivo.....	68

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado del Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia, por brindarme todas las facilidades para la realización de este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para realizar mis estudios de Doctorado.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por sus grandes aciertos en la dirección de la presente tesis.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar y a la Dra. María Teresa Colinas León, por sus valiosas contribuciones y asesorías para la realización de este trabajo.

A mis profesores del posgrado, por todos los conocimientos que me transmitieron durante las clases con gran vocación y entusiasmo.

Un sincero agradecimiento al C. Luis Angel Romero Rivero, por haberme apoyado técnicamente en la realización de los experimentos que se llevaron a cabo en la presente tesis.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido a la realización de esta tesis.

Muchas Gracias.

DEDICATORIA

A mi padre Lorenzo José Cabañas Guerrero quien me inspira siempre a ser mejor

A mi madre Esther Díaz Huerta, por su amor incondicional

A mis hermanos Miguel, Omar, Sara y Dania a quienes quiero mucho

A Josue mi pequeño hijo, que amo con todo mi corazón

A Rosario, por todo su cariño y por el apoyo que me brindó en esta nueva aventura.

A todos y cada uno de los amigos que conocí durante mi estancia en el Doctorado, cada uno fue importante para mí

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Alan Cabañas Díaz

Fecha de nacimiento: 1 de febrero 1993

Lugar de nacimiento: Ciudad de México, México

CURP: CADA930201HDFBZL01

Cédula profesional: 11524736



Desarrollo académico

Licenciatura: Licenciatura como Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.

Maestría: Maestría en Ciencias en Horticultura. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

PRODUCCIÓN INTENSIVA DE JITOMATE A TRES RACIMOS POR PLANTA EN TRES FASES DE CULTIVO

Con el objetivo de optimizar el manejo de tiempo y espacio en la producción intensiva de jitomate en invernadero, se implementó un nuevo sistema en alta densidad a tres racimos por planta y tres etapas de cultivo (fase de semillero, fase intermedia y fase final de producción). Se establecieron dos experimentos independientes. En el primero se probaron cuatro combinaciones de densidad de población en las fases intermedia y final de producción (30 y 8; 25 y 7; 20 y 6; 17 y 5 plantas m^{-2} , respectivamente). Entre los 70 y 90 días después de la siembra (dds), el tratamiento 25 y 7 plantas m^{-2} , mostró un aumento en área foliar por planta de 853 cm^2 , mientras que con 17 y 5 plantas m^{-2} , el incremento fue de 518 cm^2 , lo que sugiere que el primero experimentó mayor estrés de competencia por luz. Con el tratamiento de 25 y 7 se tuvo un rendimiento de 8.9 kg m^{-2} utilizando el invernadero de producción final durante solamente 50 días, lo que da la posibilidad de programar hasta siete ciclos de cultivo anuales con un rendimiento potencial de 62.3 $\text{kg m}^{-2} \text{año}^{-1}$. En el segundo experimento, se establecieron cinco tratamientos con diferente duración de la fase intermedia de alta densidad (25, 30, 35, 40 y 45 días), además de un testigo que solo incluyó las fases de semillero y final de producción. A medida que se prolongó la fase intermedia, el IAF se incrementó, alcanzando un valor de casi 10 para los tratamientos de 40 y 45 días, lo que repercutió negativamente en el rendimiento. El tratamiento que mostró la mayor productividad potencial anual fue el que duró 30 días en la fase intermedia y 70 días en la fase final de producción (9.5 kg m^{-2} por ciclo y un potencial de 5.2 ciclos de cultivo por año).

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., sistemas de producción, agricultura protegida, densidades de población.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura
Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Alan Cabañas Díaz
Director de Tesis: Dr. Felipe Sánchez del Castillo

GENERAL ABSTRACT

INTENSIVE TOMATO PRODUCTION WITH THREE FRUIT CLUSTERS PER PLANT ACROSS THREE CULTIVATION PHASES

With the aim of optimizing time and space management in intensive greenhouse tomato production, a new high-density system was implemented, maintaining three fruit clusters per plant and three cultivation stages (seedbed phase, intermediate phase, and final production phase). Two independent experiments were established. In the first, four combinations of planting density were tested in the intermediate and final production phases (30 & 8; 25 & 7; 20 & 6; 17 & 5 plants per m⁻², respectively). Between 70 and 90 days after sowing (DAS), the highest leaf area per plant was observed in treatment 25 & 7 plants per m⁻² which presented 853 cm² whereas for 17 & 5 plants per m⁻² the increase was 518 cm², suggesting that the first treatment experienced higher light competition stress. On the other hand, treatment 25 & 7 yielded 8.9 kg per m² using the greenhouse for only 50 days in the final production phase, enabling up to seven cultivation cycles per year with a potential yield of 62.3 kg per m⁻² per year. In the second experiment, five treatments were established with different durations of the intermediate phase (25, 30, 35, 40, and 45 days), along with a sample that only included the seedbed and final production phases. As the high planting density intermediate phase was extended, the leaf area index (LAI) increased, reaching a value close to 10 for the 40- and 45-day treatments, which negatively affected yield. The treatment showing the highest potential annual productivity involved 30 days in the intermediate phase and 70 days in the final production phase (9.5 kg m⁻² per cycle and a potential of 5.2 cycles per year).

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., production systems, protected agriculture, planting densities.

Thesis of Doctor in Science in Horticulture
Universidad Autónoma Chapingo
Author: Alan Cabañas Díaz
Advisor: Dr. Felipe Sánchez del Castillo

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La actividad agrícola en nuestro país, enfrenta diversos desafíos que limitan su productividad y aumentan el riesgo económico. Factores como la topografía irregular, la variabilidad en la precipitación, las bajas temperaturas y las heladas son comunes. Estos problemas han impulsado el uso de alternativas tecnológicas como invernaderos y sistemas hidropónicos, que ofrecen mayor seguridad y rentabilidad, especialmente en cultivos hortícolas de alto valor (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

La implementación adecuada de estas tecnologías en cultivos de alto rendimiento y valor económico en el mercado permite ingresos para una vida digna de los productores involucrados y generan un impacto positivo en el empleo local, creando hasta 10 puestos de trabajo de tiempo completo por hectárea, así como un importante número de empleos indirectos, lo que contribuye al desarrollo económico regional (Pratt & Ortega, 2019).

El uso de invernaderos, que permiten un alto grado de control de las condiciones climáticas, en conjunto con sistemas hidropónicos diseñados para mantener las condiciones adecuadas para el funcionamiento óptimo de la raíz, representan la tecnología agrícola más avanzada e intensiva que existe a nivel comercial (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Heuvelink et al., 2018).

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), por su alta demanda en mercados nacionales e internacionales, se ha convertido en la hortaliza más cultivada bajo invernadero y sistemas hidropónicos, tanto a nivel mundial (Costa & Heuvelink, 2018), como nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2024).

En México, su superficie cultivada al aire libre ha disminuido significativamente, de 64,663 hectáreas en 2007 a 35,175 en 2017. En contraste, la superficie bajo Agricultura Protegida creció de 1,973 a 15,198 hectáreas (22.7 % anual) en el mismo periodo, con una producción que pasó del 0.9 % en 2003 a 63.3 % del

volumen total producido en 2017 (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2019).

En 2023, el País exportó 1.8 millones de toneladas de jitomate, representando el 56 % de la producción nacional, con el 99.8 % destinado a Estados Unidos (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2024).

Desde su introducción en México, el sistema de producción de jitomate cultivado bajo invernadero, importado como un paquete tecnológico, sigue siendo predominante en la mayoría de las empresas comerciales. Consiste en utilizar cultivares de tipo bola o saladette de hábito de crecimiento indeterminado, con densidad de población de dos a tres plantas m^{-2} , que alcanzan longitudes del tallo de hasta 8 m por lo que las plantas deben ser acostadas sobre el piso y tutoradas de su ápice de la estructura del invernadero a 3 o más m de altura. El ciclo de cultivo consta de dos fases: una fase de semillero de aproximadamente 30 días y una fase de producción en invernadero que, de resolverse adecuadamente varios problemas fitosanitarios, climáticos y técnicos, puede durar hasta 11 meses desde el trasplante hasta la cosecha, durante ese periodo se pueden producir más de 20 racimos por planta. En promedio, los rendimientos en invernaderos de mediana tecnología oscilan entre 200 y 300 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (Castellanos & Borbón, 2009), mientras que en invernaderos de alta tecnología llegan a superar las 400 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ por kg (Heuvelink et al., 2018).

De acuerdo con Silva-Acosta (2021) dicho sistema presenta las siguientes desventajas, sobre todo para pequeños productores:

1. Su manejo resulta técnicamente complejo, especialmente para productores con experiencia limitada, debido a la necesidad de realizar diversas prácticas culturales delicadas a lo largo del ciclo de cultivo, como deschupones, deshojes, bajado de plantas, polinización, control riguroso de plagas y enfermedades, y control del clima, entre otras.
2. El largo ciclo del cultivo, junto con el frecuente manejo de las plantas para realizar tareas como deschuponar, deshojar y bajar las plantas, favorece la

aparición y proliferación de plagas y enfermedades que pueden afectar significativamente el rendimiento y con ello la rentabilidad económica.

3. Hay necesidad de invernaderos altos y robustos (6 o más metros de altura) para permitir el crecimiento de las plantas al menos a 3 m de alto; se deben diseñar para resistir las cargas por el viento y el tutorado de las plantas, y a más altura es necesario más metal (acero, aluminio galvanizado y hierro) por unidad de superficie, elevando los costos de instalación.
4. El largo ciclo de cultivo aumenta la probabilidad de que las plantas estén expuestas a diversos estreses bióticos (plagas, enfermedades, etc.) y abióticos (temperaturas y humedades relativas altas o bajas, nublados prolongados o insolaciones intensas), debido a las fluctuantes condiciones climáticas.

Las técnicas empleadas para mitigar estos estreses conllevan a altos costos de instalación y operación, lo que hace que los invernaderos grandes y equipados sean rentables únicamente para grandes productores con acceso a mercados selectos o de exportación. En contraste, los pequeños y medianos productores, que dependen de la venta en mercados locales o centrales de abasto, frecuentemente enfrentan problemas con el precio de venta lo que complica la rentabilidad de sus empresas (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

Investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo han desarrollado y validado un sistema alternativo para la producción de jitomate hidropónico en invernadero, dirigido a pequeños y medianos productores. Este sistema, tras años de trabajo experimental, permite obtener un rendimiento anual 50 % superior al del sistema convencional sin incrementar los costos de producción (Sánchez-Del Castillo et al., 2010; Sánchez-Del Castillo et al., 2012).

En este sistema, se prolonga la fase de semillero retrasando el trasplante de las plántulas hasta los 45 a 50 días después de la siembra (dds), y se acorta la fase de trasplante a fin de cosecha a entre 100 y 110 días mediante el despunte (eliminación de la yema apical) por encima de la tercera inflorescencia y la eliminación de todos los brotes laterales (deschupone). De esta manera cada

planta produce solo tres racimos y aunque su rendimiento por planta es menor que en el sistema convencional, la reducción de su área foliar permite manejar mayores densidades de población (7 a 8 plantas m^{-2}), compensando la disminución del rendimiento. Al acortar la fase de trasplante a fin de la cosecha a menos de 110 días con la programación adecuada se pueden obtener tres ciclos de producción por año, resultando en rendimientos y rentabilidad económica superiores al sistema convencional (Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo et al., 2017).

El manejo en alta densidad de población y la reducción de la fase de producción a aproximadamente 110 días desde el trasplante hasta el final de la cosecha permiten alcanzar un potencial de hasta 72 racimos m^{-2} anualmente. Esto se traduce en rendimientos de 400 a 600 $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, considerando los tres ciclos anuales (Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo et al., 2017; Sánchez-Del Castillo et al., 2021).

Es cierto que el sistema de producción alternativo requiere más semillas, sustrato para germinación y espacio para semilleros, lo que resulta en costos anuales más altos. Sin embargo, los costos por ciclo son 50 % menores que en el sistema convencional de un ciclo por año, y los costos por kg de jitomate producido son similares, lo que permite una mayor producción y ganancia económica anual (Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo et al., 2017).

Esto lleva a reflexionar que, de lograrse una reducción adicional en el intervalo de tiempo entre el trasplante y la cosecha, se podría incrementar el número de ciclos anuales, lo que a su vez resultaría en un aumento significativo del rendimiento.

Actualmente no se vislumbra una técnica viable que permita mantener las plántulas en el semillero y realizar el trasplante más allá de los 60 dds. Aunque se ha demostrado experimentalmente que es posible reducir el tiempo desde el trasplante hasta el fin de la cosecha al despuntar más temprano las plantas para dejar sólo dos o incluso un racimo por planta, tratando de compensar el menor

rendimiento por planta con una mayor densidad; esta práctica no se ha mostrado económicamente viable debido al aumento en los costos de producción por ciclo, debido al alto precio de la semilla híbrida mejorada utilizada y al menor rendimiento por planta (Sánchez-Del Castillo & Ponce-Ocampo, 1998; Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo et al., 2017).

A partir de resultados experimentales obtenidos en un proyecto estratégico desarrollado en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), relativo a un sistema innovador de producción de jitomate despuntado a tres racimos por planta, pero basado no en dos, sino en tres fases de cultivo (fase de semillero, fase intermedia de alta densidad y fase final de producción), se ha demostrado que es posible acortar aún más la fase de producción, aunque con el auxilio de una superficie adicional de invernadero, donde se puedan trasplantar y mantener temporalmente las plantas en bolsas o macetas a muy alta densidad de población (18 a 25 plantas m^{-2} en una fase de cultivo intermedia), para después de un tiempo en el que el incremento de índice de área foliar haga necesario reubicarlas en el invernadero de producción final a la densidad de 6 a 8 plantas m^{-2} (Silva-Acosta, 2021; Martínez-Ayala, 2022; Villafuerte-Mojica, 2022).

Se plantea así, un sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta basado en tres fases de cultivo (fase de semillero, fase intermedia de alta densidad y fase final de producción); ajustando la fase de semillero a 45 días, la fase intermedia de alta densidad en el invernadero auxiliar también a 45 días y la fase final de producción a entre 50 y 60 días. Con la planeación y manejo adecuado de las fechas de siembra, trasplante y reubicación, se ve posible obtener, en el invernadero de la fase final de producción, un potencial de hasta siete ciclos de cultivo por año con rendimiento superior a 70 $\text{kg m}^{-2} \text{año}^{-1}$ (700 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y un beneficio económico muy alto por unidad de superficie para los pequeños o medianos productores (Silva-Acosta, 2021).

La fase intermedia, como ya se señaló, se desarrolla en un invernadero adicional que, para fines de mantener la máxima rentabilidad económica anual, ocuparía una superficie no mayor al 30 % del área de invernadero para la fase final de

producción (esto para limitar el costo adicional que implica la instalación y mantenimiento de dicho invernadero); por ello y aprovechando que las plantas después del trasplante aún son pequeñas y con poca área foliar por planta se plantea un manejo de alta densidad temporal en esta fase intermedia (17 a 25 plantas m^{-2}).

Con todo lo que se ha investigado y validado principalmente en la UACH, ya se ha generado el conocimiento necesario de cómo manejar el cultivo en la fase inicial de semillero y en la fase final para el crecimiento y recolección de los frutos; sin embargo, la alta densidad de población que se exige por el sistema de producción (17 a 25 plantas m^{-2}) durante la fase intermedia (45 a 90 dds), conduce a condiciones de estrés (por sombreado mutuo), sobre todo al final de la misma; es decir, en los días previos a su reubicación a su fase final a la densidad de 6 a 8 plantas m^{-2} , condiciones que eventualmente pueden producir efectos adversos sobre el rendimiento.

No sería una solución utilizar una menor densidad en esta fase intermedia ya que eso implicaría utilizar una mayor superficie de invernadero adicional, lo que se traduciría en mayores costos de instalación, reduciéndose el potencial beneficio económico del productor por unidad de superficie y tiempo.

Considerando lo anterior, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general contribuir a la implementación de este sistema de producción a tres racimos por planta y tres fases de cultivo, evaluando dos formas de aminorar el efecto negativo que la alta densidad durante la fase intermedia puede ocasionar sobre el rendimiento final de cada ciclo de cultivo y así llevar al sistema propuesto a su mayor potencial de rendimiento y rentabilidad económica anual. Para ello se plantearon y realizaron dos experimentos independientes:

En el primero, se comparó el efecto de diferentes densidades de población durante las fases intermedia y final, sobre aspectos morfológicos y sobre el rendimiento y sus componentes primarios. También, se comparó el comportamiento agronómico y los componentes de rendimiento, por ciclo y

potencial anual, entre plantas manejadas en tres fases de cultivo contra las manejadas en dos fases de cultivo; es decir sin fase intermedia.

En un segundo experimento, se estudió el efecto de acortar el periodo de duración de la fase intermedia sobre aspectos morfológicos de las plantas y sobre el rendimiento y sus componentes, tanto por ciclo como el potencial anual.

Para fines de elaboración y redacción de la presente tesis, cada experimento se expone y discute en capítulos (artículos científicos) por separado, estructurados según la guía de autores a la que fueron enviados para su publicación. Previo a su exposición se plantea una revisión de literatura como un marco de referencia del presente trabajo de tesis.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Invernaderos e hidroponía en México

La producción agrícola en México enfrenta diversas limitaciones naturales; aproximadamente el 80 % de la superficie cultivada depende de un clima errático y con escasas precipitaciones. Esta situación conlleva a rendimientos bajos y menor calidad de los productos cosechados (Alviter-Ponce & Granados-Sánchez, 2006). Para mitigar estos problemas, la agricultura protegida se ha convertido en una alternativa viable que permite controlar mejor las condiciones ambientales, al mismo tiempo que reduce los riesgos asociados a plagas y enfermedades. Como resultado, se obtiene no solo un incremento en la productividad, sino también una mejor calidad y mayor valor comercial de los productos cosechados (Vargas-Canales et al., 2018).

Dentro de las técnicas y sistemas de producción que caracterizan la agricultura protegida, destacan la fertirrigación, el acolchamiento del suelo, la utilización de cubiertas flotantes y la producción en estructuras de protección, tales como microtúneles, macrotúneles, casas sombra e invernaderos, además, se incluye el cultivo sin suelo, conocido como hidroponía (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Urrestarazu, 2015).

Como lo señalaron Pérez-Grajales & Castro-Brindis (2011) y Moreno-Reséndez et al. (2011) el cultivo en invernaderos e hidroponía contribuye a mitigar las restricciones y los efectos negativos ocasionados por condiciones climatológicas y edáficas adversas, permitiendo mayor productividad y producciones fuera de época, situaciones ambas que contribuyen a una mayor ganancia económica y más seguridad para quienes producen con estas tecnologías.

Un invernadero es una estructura agrícola con cubierta translúcida que regula factores climáticos como luz, dióxido de carbono, temperatura, humedad y viento. Protege las plantas de fenómenos meteorológicos adversos, como lluvia intensa y granizo, y actúa como barrera contra plagas y enfermedades. Su objetivo principal es crear condiciones óptimas para el crecimiento de cultivos de alto valor

económico, ofreciendo cierta independencia de las condiciones climáticas locales donde se ubica (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

Por su parte, en los sistemas hidropónicos las plantas se cultivan en un medio sin suelo, donde las raíces son irrigadas con una mezcla de nutrientes esenciales disueltos en agua. En lugar de suelo, se emplea un sustrato inerte o, en algunos casos, se utiliza únicamente la solución nutritiva (Sánchez-Del Castillo & Escalante-Rebolledo, 1988; Eigenbrod & Gruda, 2015; Urrestarazu, 2015).

La hidroponía en su definición más estricta se refiere al cultivo en el que las raíces de las plantas se desarrollan en una solución nutritiva aireada, sin ningún sustrato sólido. Esta interpretación se conoce comúnmente como "cultivo en solución". En un sentido más amplio, los sistemas hidropónicos abarcan cualquier técnica de cultivo en la que las plantas crecen y se desarrollan sin necesidad de suelo, ya sea en un sustrato sólido o en la misma solución nutritiva (Sandoval-Villa et al., 2012). Su objetivo principal es obtener un control óptimo sobre el entorno de las raíces, proporcionando las mejores condiciones posibles para que estas cumplan eficientemente sus funciones de suministrar agua, nutrimentos y hormonas a la parte aérea de la planta (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017; Urrestarazu, 2015).

En los últimos años, la superficie de invernaderos en México ha experimentado un aumento del 12 %. Sin embargo, entre 2000 y 2005, el crecimiento fue notablemente más acelerado, alcanzando un 600 %, al pasar de 340 a 7,000 hectáreas. Este crecimiento ha tenido un impacto significativo en la economía del sector productivo (Flores-Velázquez & Ojeda-Bustamante, 2016). En la actualidad, la superficie dedicada a invernaderos hidropónicos ha superado las 12,000 hectáreas, con una concentración predominante en los estados de Jalisco, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Michoacán (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

2.2 Generalidades sobre la planta de jitomate

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta dicotiledónea que pertenece a la familia de las Solanáceas y al género *Lycopersicum*; a pesar de que puede tener un ciclo de vida perenne, su cultivo comercial es anual. El crecimiento apical en las variedades determinadas es limitado e ilimitado en las variedades indeterminadas; su desarrollo es en forma rastrera, semierecta o erecta, pudiendo llegar, en las variedades indeterminadas hasta 10 m de longitud en un año (Muñoz-Ramos, 2011).

Su fruto es una baya típica bilocular, de forma variable entre esférica y cilíndrica, de tonos que van del amarillento al rojo debido a la presencia de los pigmentos licopeno y caroteno. Está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas. En su madurez presenta un pericarpio carnoso con dos o más lóculos y una placenta con una parte carnosa en el centro y otra más gelatinosa que llena parcialmente los lóculos, donde se encuentran las semillas (Carravedo-Fantova, 2006; Villanueva-Verduzco et al., 2010; SIAP, 2024). En la epidermis de los frutos se desarrollan pelos glandulares que desaparecen cuando éste llega a la madurez y en el ápice de los frutos suelen observarse restos del estilo (Pérez-Grajales & Castro-Brindis, 2011).

Las semillas tienen forma lenticular y presentan dimensiones aproximadas de 5 x 4 x 2 mm, están conformadas por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal. El embrión, cuyo desarrollo da lugar a la planta adulta, está constituido por una yema apical, dos cotiledones, el hipocótilo y la radícula (Cepeda-Siller, 2015). El endospermo contiene los elementos nutritivos necesarios para el desarrollo inicial del embrión. La testa o cubierta seminal está constituida por un tejido duro e impermeable, recubierto de pelos, que envuelve y protege el embrión y el endospermo (Chamarro, 2001).

Tiene un sistema radical constituido por una raíz principal pivotante que crece alrededor de 3 cm al día hasta alcanzar aproximadamente 60 cm de profundidad, además de raíces secundarias y las adventicias que llegan a formar una masa

densa y de gran volumen; sin embargo, este sistema radical, que surge cuando la planta se origina de una semilla, sufre grandes modificaciones por las prácticas culturales empleadas (Rodríguez-Rodríguez et al., 1997; SIAP, 2024). Cuando las plantas se desarrollan a partir de semillas y sin trasplante, la raíz principal resultante es muy vigorosa y puede penetrar en el suelo hasta incluso más de tres metros en terrenos aluviales profundos, por el contrario, cuando las plantas proceden de trasplante, la raíz principal se daña y se desarrollan abundantes raíces laterales secundarias, en estas condiciones, el 70 % de las raíces se localizan a menos de 20 cm de la superficie (Chamarro, 2001). De esta manera, cuando la planta procede de trasplante y es establecida en hidroponía con un sistema de riego por goteo, la mayoría de las raíces tienden a concentrarse en torno a la salida de agua en el emisor de goteo (Pérez-Grajales & Castro-Brindis, 2011).

El tallo principal es herbáceo y se forma de tallos secundarios compuestos de epidermis con pelos glandulares y no glandulares, corteza, cilindro vascular y tejido medular. La planta no puede sostenerse por sí sola y comercialmente se emplean tutores para su sostén (SIAP, 2024). Antes de que la primera inflorescencia sea formada, a lo largo del tallo principal se desarrollan entre 6 a 12 hojas; este tipo de crecimiento se llama ramificación monopodial, dicho tallo termina en la primera inflorescencia, la cual es desplazada lateralmente por el brote correspondiente a la axila de la hoja siguiente, que viene a ocupar la dirección principal, esto se repite con cada nueva inflorescencia cuyo resultado es una ramificación simpodial. De esta manera, el tallo principal crece en forma continua con inflorescencias internodales, normalmente a cada tres hojas (Flórez et al., 2012).

Según Pérez-Grajales & Castro-Brindis (2011) las hojas del jitomate son compuestas, alternas, bipinatisectas y pecioladas, con una longitud que puede ir de los 10 a 25 cm. Los segmentos foliares son de borde lobulado, ovales y acuminados y generalmente se desarrollan tres hojas entre cada racimo en los híbridos de crecimiento indeterminado. De acuerdo con Heuvelink & Okello

(2018) las hojas difieren en tamaño según el cultivar, la posición y las condiciones ambientales. Normalmente las dos o tres primeras hojas son pequeñas con pocos folíolos, por otra parte, las hojas posteriores, bajo condiciones de invernadero llegan a alcanzar hasta los 50 cm de largo, con un foliolo terminal grande y hasta ocho folíolos laterales también grandes.

Las flores se encuentran agrupadas en inflorescencias de racimo o cimas racimosas (SIAP, 2024). Villanueva-Verduzco et al. (2010) mencionan que la flor del jitomate es perfecta, regular e hipógina y que consta de cinco a más sépalos de igual número de pétalos de color amarillo. Según Chamarro (2001) la primera flor se forma en la yema apical y las demás flores se desarrollan lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal.

Las flores son hermafroditas, actinomorfas y péndulas, con una coloración amarillo brillante y 1 a 2 cm de diámetro. El cáliz está formado por 5 a 10 segmentos, lineales a lanceolados y persistentes. Su tamaño va aumentando a medida que se desarrolla el fruto. La corola es amarilla, rotada, con el tubo corto, dividida en cinco o más lóbulos, con numerosos pelos glandulares en la cara dorsal, cinco o más estambres adheridos al tubo de la corola, de filamentos cortos y anteras dehiscentes por hendiduras longitudinales. El pistilo es único, y está formado por la unión de 5 a 6 carpelos. El ovario es bilocular con la placenta central carnososa. Los pedicelos presentan un pequeño estrangulamiento en la parte media que corresponde a la zona de abscisión (Pérez-Grajales & Castro-Brindis, 2011).

2.3 Importancia económica del jitomate

El jitomate es una de las hortalizas de mayor producción y consumo en todo el mundo y de gran importancia económica para México. En el año 2022 su producción fue de 3, 462,000 toneladas, lo que representó un 4.1 % más que el año anterior y un 5.3 % superior al promedio de los 10 años anteriores, con lo cual México ocupó el lugar número 8 en producción mundial. Los Estados con mayor producción fueron Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Baja

California Sur y Zacatecas (SIAP, 2024). El País ocupa el lugar número uno en exportación a nivel mundial, mientras que Estados Unidos es el principal importador, y acapara el 99.7 % del total de las ventas del jitomate exportado de México (FIRA, 2019).

2.4 Requerimientos climáticos

La luz es un factor crucial en el rendimiento de las plantas, ya que influye directamente en la fotosíntesis, el crecimiento de los tejidos, la floración y la maduración de los frutos. En el caso de hortalizas de fruto como el jitomate, los intervalos óptimos durante la etapa de plántula oscilan entre 600 y 900 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que, en las etapas vegetativa y reproductiva, el intervalo ideal se sitúa entre 1,200 y 1,500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Pérez-Grajales & Castro-Brindis, 2011; Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

El dióxido de carbono (CO_2) se encuentra en el aire en concentraciones de entre 0.5 y 0.6 g por m^3 . Al ser un sustrato esencial para la fotosíntesis, una mayor concentración de CO_2 en el ambiente puede incrementar el contenido de materia seca en las plantas (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

Sin embargo, aunque la fotosíntesis y el rendimiento de los cultivos mejoran con niveles de CO_2 superiores a los ambientales, su uso no suele ser económicamente viable en México (Pérez-Grajales & Castro-Brindis, 2011; Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017)

La temperatura tiene un impacto significativo en la estabilidad de las enzimas y en los procesos bioquímicos, lo que a su vez influye en todas las funciones vitales de la planta, como la transpiración, la fotosíntesis, la biosíntesis y la respiración. En condiciones de temperatura óptima, las enzimas operan de manera eficiente y se mantienen estables durante períodos prolongados. A temperaturas relativamente bajas, aunque las enzimas permanecen estables, su actividad se reduce o se ralentiza considerablemente (Azcón-Bieto & Talón, 2008). A altas temperaturas, las enzimas pueden desnaturalizarse por completo (Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

Para el jitomate, las temperaturas óptimas de manera general van de 23 a 25 °C en el día y de 15 a 17 °C durante la noche. Temperaturas por arriba de 30 °C y por debajo de 8 °C alteran el desarrollo del cultivo. A 0 °C durante varios minutos se producen daños a nivel celular en las plantas (Muñoz-Ramos, 2011).

La humedad relativa óptima dentro del invernadero debe encontrarse entre 50 y 60 %, debido a que, con alta humedad en el ambiente, normalmente mayores a 70 %, el cultivo es más susceptible a enfermedades foliares (Pérez-Grajales & Castro-Brindis, 2011).

2.5 Sistema convencional de producción de jitomate bajo invernadero en México

En el manejo convencional del cultivo de jitomate en invernadero practicado en nuestro País, las plantas son conducidas a un tallo en un único ciclo de producción anual. Se realiza en dos fases, una fase en semillero que dura alrededor de 30 días después de la siembra y otra en un invernadero de producción en alrededor de hasta 11 meses de cultivo, con un periodo de inicio a fin de cosecha de 5 a 7 meses (Ponce-Ocampo et al., 2000).

Se utilizan variedades de hábito indeterminado y se emplean densidades de población de 2.5 a 3 plantas m⁻² de invernadero. Se deja que las plantas crezcan más de 7 m de longitud para obtener cosechas que pueden llegar a superar los 20 racimos por planta, con lo cual se logran rendimientos de hasta 500 t ha⁻¹ año⁻¹ en invernaderos de alta tecnología; sin embargo, los costos de producción por kg producido son muy elevados (Ponce-Ocampo et al., 2000; Heuvelink et al., 2018; Kubota et al., 2018).

De acuerdo con Sánchez-Del Castillo et al. (2014) la problemática de este sistema de producción radica en que no fue diseñado para las condiciones climáticas y económicas que predominan en México. Requiere tecnología, infraestructura y equipos altamente sofisticados, lo que se traduce en costos de instalación y operación muy elevados. Su manejo técnico es bastante complejo, ya que demanda un estricto cumplimiento de prácticas culturales, como

deschupone, deshoje, bajado de planta, manejo fitosanitario, polinización y control del clima, entre otras. Esto resulta especialmente desafiante para los productores con poca experiencia. Aunado a ello, la continua manipulación de plantas aumenta la proliferación de plagas y enfermedades, muy frecuentes en este sistema y que afectan seriamente al rendimiento en un ciclo de cultivo tan largo (Silva-Acosta, 2021).

Por otra parte, Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez (2017) mencionaron que, este sistema solo es rentable para grandes productores con acceso a mercados selectos o de exportación, pero no para pequeños y medianos productores que se ven obligados a vender a intermediarios o en centrales de abasto a precios tan bajos, que resulta poco rentable para el productor.

2.6 Sistema alternativo de producción de jitomate bajo invernadero e hidroponía

Ante las desventajas del sistema convencional de producción de jitomate, en la Universidad Autónoma Chapingo se ha desarrollado un sistema alternativo que también se lleva a cabo en dos fases: semillero y producción final. El objetivo principal de este sistema es reducir el ciclo de producción, desde el trasplante hasta la cosecha, a menos de cuatro meses, con lo cual se pueden obtener al menos tres ciclos de producción por año y un mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo en comparación con el sistema convencional (Sánchez-Del Castillo et al., 2012).

Se realizan trasplantes tardíos, aproximadamente 45 dds, junto con despuntes tempranos que consisten en eliminar la yema terminal de las plantas, para dejar solo tres racimos por planta, resultando en una altura aproximada de 1 metro. Debido al menor número de racimos y, de manera indirecta, a la reducción del área foliar del cultivo, es posible establecer una mayor densidad de población, alcanzando hasta 8 plantas m⁻² de invernadero. Aunque el rendimiento por planta es inferior en comparación con el sistema convencional, debido a la disminución en el número de racimos, se ve compensada parcialmente por la mayor densidad

de población utilizada. Como resultado, se logran producciones comerciales de hasta 600 t ha⁻¹ año⁻¹ (Sánchez-Del Castillo et al., 2017).

Según Villafuerte-Mojica (2022) las ventajas de este sistema respecto al convencional son:

- Un mayor beneficio económico para los pequeños productores, en virtud de concentrar la producción en pequeños periodos de tiempo y hacerlos coincidir con las temporadas en que los precios de venta son más altos, que es posible gracias al manejar el cultivo en ciclos cortos de producción, de menos de cuatro meses.
- El rendimiento por unidad de superficie al año puede ser mayor o al menos igual que el del sistema convencional, ya que el menor rendimiento por planta es compensado por la mayor densidad poblacional y más ciclos por año.
- El manejo resulta más redituable debido a que se reducen algunas labores culturales como podas, tutorio y deshoje, y por lo corto del ciclo hay menos gasto en el control de plagas y enfermedades.
- No requiere de invernaderos tan altos y sofisticados, y éstos pueden ser manejados con un mínimo de equipamiento en localidades de clima benigno.

2.7 Sistema alternativo basado en tres fases de cultivo

A partir del conocimiento adquirido sobre el sistema alternativo de producción de jitomate en alta densidad y tres racimos por planta, y considerando los beneficios que este sistema ofrece en comparación con el convencional, se ha planteado (Silva-Acosta, 2021; Martínez-Ayala, 2022; Villafuerte-Mojica, 2022), la posibilidad de lograr más ciclos de producción por año, lo que resultaría en un mayor rendimiento anual.

En este contexto, en la Universidad Autónoma Chapingo se está desarrollando bajo experimentación un sistema muy intensivo de producción de jitomate, muy similar al anterior, pero que contempla la utilización de tres fases de cultivo: fase

de semillero, fase intermedia de alta densidad y fase final de producción, en lugar de las dos que se manejan normalmente (semillero y final de producción). Las tres fases para este sistema se estructuran de la siguiente manera:

Primera fase (semillero). Comienza desde la siembra en charolas de 60 cavidades, con 200 ml de volumen por cavidad y turba como sustrato, donde se utiliza semilla híbrida mejorada. En esta fase se desarrolla la plántula y tiene una duración de siembra a trasplante de 45 días.

Segunda fase (intermedia de alta densidad). Esta fase comienza con el trasplante a los 45 dds en macetas con una capacidad de ocho litros, las cuales se rellenan con arena de tezontle rojo como sustrato. Se establece una densidad de población de 18 plantas m^{-2} . Para esta etapa, es necesario contar con un espacio adicional de invernadero, que no exceda el 30 % de la superficie de invernadero ocupada por el cultivo en la fase final. A cada maceta se le inserta un segmento de alambón de 1 m, y este se utiliza para tutorar cada planta de manera individual, se organizan en grupos de seis hileras, dejando pasillos de 50 cm para facilitar el acceso y el manejo. La duración de esta fase es de 45 días más (Silva-Acosta, 2021).

Tercera fase (final de producción). Concluidos los 45 días de la fase intermedia o los 90 dds, las plantas son reubicadas, con todo y macetas en un invernadero de producción para establecerlas a una densidad de población final de entre 6 y 8 plantas m^{-2} de invernadero donde permanecen otros 50 a 60 días en el lugar definitivo, hasta el final de la cosecha. Esta fase comprende todo el periodo de cosecha de los tres racimos dejados por planta. Al final de este periodo se recogen las plantas con todo y maceta, se hace una limpieza y desinfección del invernadero, y se colocan ahí las nuevas plantas que terminan su etapa intermedia de alta densidad en el invernadero auxiliar para así iniciar nuevamente esta fase (Villafuerte-Mojica, 2022).

Ajustando la fase de semillero a 45 días, la fase intermedia de alta densidad en el invernadero auxiliar también a 45 días y la fase final de producción a 50 días, con la planeación y manejo adecuado de las fechas de siembra, trasplante y reubicación, se posibilita, en el invernadero de la fase final de producción, un

potencial de hasta siete ciclos de cultivo por año con un rendimiento potencial estimado superior a 700 t ha⁻¹ año⁻¹ y un beneficio económico muy alto por unidad de superficie para los pequeños o medianos productores en invernadero (Silva-Acosta, 2021; Villafuerte-Mojica, 2022; Martínez-Ayala, 2022).

2.8 Desafíos asociados a las altas densidades

Según estudios de Silva-Acosta (2021), Villafuerte-Mojica (2022) y Martínez-Ayala (2022), a pesar del despunte de las plantas por encima del tercer racimo, la alta densidad de población de 18 plantas m⁻² durante la fase intermedia de cultivo (de los 45 a los 90 días después de la siembra), genera condiciones de estrés debido al sombreado mutuo entre plantas. Este estrés es más evidente en los días previos a su reubicación al invernadero de producción final; condiciones que eventualmente pueden conducir a la reducción del rendimiento por ciclo.

Cuando las plantas se desarrollan bajo altas densidades de población, la competencia por luz es determinante para regular el crecimiento vegetativo. Dicha competencia promueve cambios en la estructura y el desarrollo de las plantas para tolerar o evitar la sombra de las plantas contiguas. Entre las adaptaciones fenotípicas más comunes se encuentran el alargamiento de tallos y peciolo, mayor dominancia apical, orientación de las hojas hacia arriba, reducción del grosor de las hojas, disminución del contenido de clorofila, cambios en la distribución de fotoasimilados y en general una reducción en su productividad (Franklin & Whitlam, 2007). Al respecto, se han documentado experiencias comerciales en las que las plantas de las hileras centrales, debido a una menor interceptación de radiación fotosintéticamente activa, rinden menos en comparación a las hileras exteriores (Jarvis, 1998; Vázquez et al., 2007). También Taiz & Zeiger (2018) mencionaron que cambios significativos en la calidad o en la intensidad de la radiación incidente pueden provocar modificaciones en la anatomía y fisiología de la planta, así como afectar su crecimiento y desarrollo.

2.9 Últimas Investigaciones

Recientemente en la UACH se han realizado investigaciones encaminadas a solventar los problemas de la presión de densidad en la fase intermedia en el sistema a tres fases. Al respecto, Silva-Acosta (2021) evaluó diferentes variedades de híbridos de jitomate con características contrastantes en hábito de crecimiento y tipo de fruto para determinar cuáles se adaptaban mejor al sistema en tres fases, encontrando que los de tipo bola indeterminado rindieron más que las de tipo saladette. Además, encontró que el híbrido Cedral tuvo un rendimiento cercano a 2 kg planta⁻¹, destacando estadísticamente sobre el resto. Por otra parte, Martínez-Ayala (2022) probó durante la fase intermedia, ubicar las hileras de plantas de jitomate a distinta altura y la aplicación del retardador de crecimiento paclobutrazol, con el objetivo de disminuir la competencia por luz entre las plantas, pero no encontró diferencias en rendimiento; sin embargo, con base en sus resultados comprobó que es posible alcanzar los siete ciclos de producción anual que ofrece el sistema a tres fases. Con el mismo propósito, Villafuerte-Mojica (2022) ensayó la poda de diferentes hojas y/o folíolos encontrando que la remoción de más de cinco hojas inferiores afecta negativamente el rendimiento por planta en esas condiciones de alta densidad.

2.10 Literatura citada

- Alviter-Ponce, D., & Granados-Sánchez, D. (2006). Construcción y manejo de invernaderos en la producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) para el Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 5(1), 13-17.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Carravedo-Fantova, M. (2006). *Variedades autóctonas de tomates de Aragón. Centro de Investigación de Tecnología Agroalimentaria de Aragón*. Zaragoza, Gobierno de Aragón.

- Castellanos-Ramos, J. Z., & Borbón-Morales, C. (2009). *Panorama de la horticultura protegida en México*. In Castellanos-Ramos, J. Z. (Ed.), *Manual de producción de tomate en invernadero* (pp.1-18). Intagri.
- Cepeda-Siller, M. (2015). *El tomate rojo cultivo y control parasitológico*. Trillas.
- Chamarro, L. J. (2001). Anatomía y fisiología de la planta. In F. Nuez-Viñals (Ed.), *El cultivo del tomate* (pp. 43-91). Ediciones Mundi-Prensa.
- Costa, J. M. & Heuvelink, E. (2018). The global tomato industry. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., pp. 1-26). CABI International. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0001>
- Eigenbrod, C., & Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 483-498. doi.org/10.1007/s13593-014-0273-y
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2019). *Panorama Agroalimentario Tomate Rojo 2019*. <https://es.scribd.com/document/502336019/>
- Flores-Velázquez, J., & Ojeda-Bustamante, W. (2016). *Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México*. Instituto Mexicano Tecnológico del Agua.
- Flórez, L. E., González, G., Pulido, S. P., Wyckhuys, K., Escobar, H., Salamanca, C., Zamudio, A., Jiménez, J., Gil, R., Fuentes, L. S., Niño, N., Fuentes, L., & Bojacá, C. (2012). Tomate (*Solanum lycopersicum* L.). In Pinzón-Ramírez, H. (Ed.), *Manual para el cultivo de hortalizas* (pp. 498-528). Editorial Produmedios.
- Heuvelink, E., & Okello, R. C. (2018). Developmental processes. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., pp. 59-88). CABI International. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>

- Heuvelink, E., Li, T., & Dorais, M. (2018). Crop growth and yield. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., pp. 89-136). CABI International <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0089>
- Jarvis, R. W. (1998). *Control de enfermedades en cultivos de invernadero*. Mundi-Prensa.
- Franklin, K., & Whitelam, G. (2007). Light-quality regulation of freezing tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Genetics*, (39), 1410-1413. <https://doi.org/10.1038/ng.2007.3>
- Kubota, C., de Gelder, A., & Peet, M. M. (2018). Greenhouse tomato production. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., pp. 276–313). CABI internacional. <https://doi.org/https://doi.org/10.1079/9781780641935.0276>
- Martínez-Ayala, K. (2022). *Comportamiento agronómico de plantas de jitomate establecidas en un arreglo de dosel escaleriforme en periodos de alta densidad de población* [Tesis de Maestría, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1653>
- Moreno-Reséndez, A., Aguilar-Durón, J., & Luévano-González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29, 763-774. [10.22004/ag.econ.114479](https://doi.org/10.22004/ag.econ.114479)
- Muñoz-Ramos, J. J. (2011). Manejo del cultivo de tomate en Invernadero. In Castellanos-Ramos, J. Z. (Ed.), *Manual de producción de tomate en invernadero* (pp. 45-92). Intagri.
- Pérez-Grajales, M., & Castro-Brindis, R. (2011). *Jitomate en invernadero*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ponce-Ocampo, J., Sánchez-Del Castillo, F., Contreras-Magaña, E., & Corona-Sáez, T. (2000). Efecto de modificaciones al ambiente en la floración y fructificación de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Fitotecnia Mexicana* 23(1), 87-98.

- 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. División de Conectividad, Mercados y Finanzas. <http://dx.doi.org/10.18235/0001705>
- Rodríguez-Rodríguez, R., Tabares-Rodríguez, J. M., & Medina-San Juan, J. A. (1997). *Cultivo moderno del tomate*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Sánchez-Del Castillo, F., & Ponce-Ocampo, J. (1998). Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) cultivado en hidroponia. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 4(2), 89-94.
- Sánchez-Del Castillo, F., & Escalante-Rebolledo, E. (1988). *Hidroponía*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez-Del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. del C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del 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. del 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.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del C., Contreras-Magaña, E., & Sahagún-Castellanos, J. (2014). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(3), 239-251.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del 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. del 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>

Sandoval-Villa, M., Sánchez-García, P., & Alcántar-González, G. (2012). Principios de la hidroponía y del fertirriego. In G. Alcántar-González, & L. I. Trejo-Téllez (Eds.), *Nutrición de cultivos* (pp. 373-438). Colegio de Postgraduados.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Panorama agroalimentario*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

Silva-Acosta, A, G. (2021). *Híbridos de jitomate sometidos a periodos de alta densidad de población en condiciones de invernadero* [Tesis de Maestría, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/8629bbd2-9eb0-4367-97ae-429b0c9f18c4/full>

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018) *Fundamentals of plant physiology*. Oxford University Press.

Urrestarazu-Gavilán, M. (2015). *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Ediciones Mundi-Prensa.

Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., Aguilar-Ávila, J., Camacho-Vera, J. H., Ocampo-Ledesma, J. G., & Medina-Cuellar, S. E. (2018). Efficiency of small enterprises of protected agriculture in the adoption of innovations in Mexico. *Estudios Gerenciales*, 34(146), 52-62. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.146.2811>

- Vázquez-Rodríguez, J. C., Sánchez-Del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. del C. (2007). Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 55-62.
- Villafuerte-Mojica, A. (2022). *Poda selectiva de hojas en plantas de jitomate sometidas temporalmente a alta densidad de población* [Tesis de Maestría, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/e7228716-0798-49b3-9dc7-a19ed026a56c/content>
- Villanueva-Verduzco, C., Reyes-Sánchez, J., Shah-Gardizi, H., & Villaseñor-Perea, C. A. (2010). *Manual para la producción de tomate rojo en invernadero*. Universidad Autónoma Chapingo.

**CAPÍTULO 3. PRODUCCIÓN DE JITOMATE A TRES RACIMOS EN TRES
FASES I: EFECTOS DE DENSIDADES DE POBLACIÓN EN LAS FASES
INTERMEDIA Y FINAL SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO**

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

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 fases: 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 fases intermedia y final sobre variables agronómicas. Se compararon cuatro densidades en cada fase (intermedia: 30, 25, 20 y 17 plantas·m⁻²; final: 8, 7, 6 y 5 plantas·m⁻²) 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⁻² en fase intermedia y final, respectivamente, presentó un incremento del área foliar por planta de 853 cm² y un índice de área foliar de 2.1 m²·m⁻², mientras que con 17 y 5 plantas·m⁻², los incrementos respectivos fueron de 518 cm² y 0.9 m²·m⁻², lo cual indica que las primeras experimentaron mayor estrés por competencia de luz. Con 25 plantas·m⁻² en fase intermedia y 7 plantas·m⁻² en fase final, se tuvo un rendimiento de 8.9 kg·m⁻² por ciclo de cultivo, lo que permitiría obtener hasta siete ciclos por año.

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

Sometido a la Revista Chapingo Serie Horticultura

Estatus: Enviado

Autores: Alan Cabañas-Díaz, Felipe Sánchez-del Castillo, Esaú del Carmen Moreno-Pérez, María Teresa Beryl Colinas-y León

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 fases 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 $8 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$, 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 $450 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Moreno-Pérez et al., 2022; Sánchez-del Castillo et al., 2021).

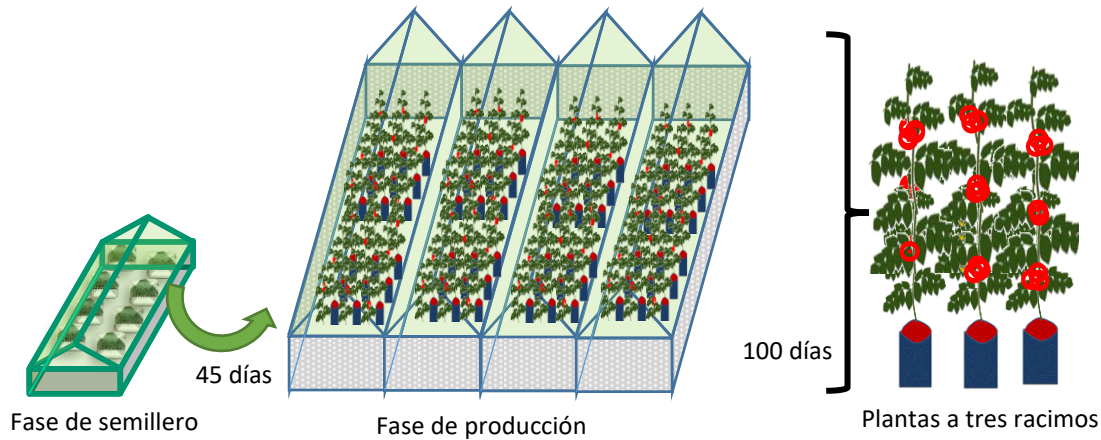


Figura 1. Esquema de un sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en dos fases de cultivo.

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 intercepción 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, 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 fases 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 alambón en un invernadero adicional más pequeño, en donde las plantas se manejan en alta densidad de población ($18 \text{ a } 25 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$) 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 ($7 \text{ a } 8 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$), con lo que inicia la fase final de producción, que dura de 50 a 60 días (Figura 2).

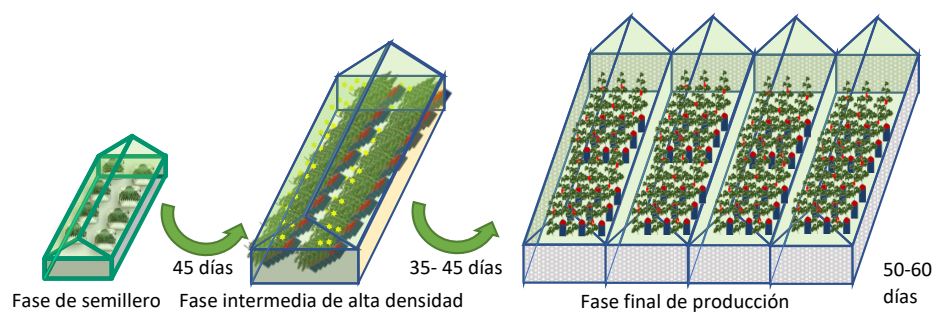


Figura 2. Esquema de un sistema de producción a tres racimos por planta en tres fases de cultivo.

La viabilidad del sistema de tres fases con tres racimos se basa en que, a los 45 dds, las plantas tienen un área foliar reducida, 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 fases 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 anual respecto al sistema anterior de tres ciclos y dos fases

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 fases, 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 2 250 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 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 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 cm³ 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), y las semillas se cubrieron con una capa de vermiculita de 0.5 cm.

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⁻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 utilizó 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 consistió en 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 por 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 fases intermedia y final (Cuadro 1). En todos los casos, se establecieron seis hileras de plantas con pasillos de 50 cm de ancho:

Cuadro 1. Densidad de población del cultivo de jitomate en dos etapas del sistema de tres fases.

Tratamiento	Densidad (plantas·m ⁻²)	
	Etapla intermedia	Etapla final
T1	30	8
T2	25	7
T3	20	6
T4	17	5

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 fases de cultivo,

también manejados a tres racimos por planta. Estos tratamientos consistieron en el trasplante a los 45 dds y una fase final de 98 días con densidades de 8, 7, 6 y 5 plantas·m⁻². Los testigos se compararon únicamente con sus tratamientos equivalentes de tres fases; 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 (coincidente con la mitad y el final de la fase intermedia), y variables de rendimiento al final del ciclo de cultivo. Las variables de crecimiento evaluadas fueron:

1. Área foliar por planta (cm²): se determinó con un medidor de área foliar (LI-3000A, LICOR®, EUA).
2. Índice de área foliar (m²·m⁻²): se obtuvo a partir del área foliar total (m²) por m² 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⁻¹): 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⁻² 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 frutos por unidad de superficie (g·m⁻² de invernadero) entre el número de frutos cosechados en esa superficie (frutos·m⁻²). Los frutos se pesaron en una balanza analítica (MC-173467, Ohaus®, EUA).
4. Rendimiento por planta (g·planta⁻¹): 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.

5. Rendimiento por unidad de superficie ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 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⁻² 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⁻²), cuyas plantas alcanzaron una altura promedio de 76 cm (Cuadro 2).

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.

Tratamiento (plantas·m ⁻²)	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Área foliar por planta (cm ²)	IAF (m ² ·m ⁻²)
70 días después de la siembra				
FI = 30 y FF = 8	80 ab	7.8 a	1777 a	5.33 a
FI = 25 y FF = 7	87 a	8.4 a	2204 a	5.51 a
FI = 20 y FF = 6	78 ab	8.5 a	2057 a	4.11 a
FI = 17 y FF = 5	76 b	8.5 a	2228 a	4.01 a
DMSH	9.64	1.17	700	1.59
90 días después de la siembra				
FI = 30 y FF = 8	85 a	9.9 a	2563 a	7.68 a
FI = 25 y FF = 7	80 a	9.6 a	3057 a	7.64 a
FI = 20 y FF = 6	77 a	8.7 a	2791 a	5.58 ab
FI = 17 y FF = 5	77 a	9.7 a	2746 a	4.94 b
DMSH	10.09	1.22	1010	2.62

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, $P \leq 0.05$).

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 en altas densidades (Jishi, 2018; Taiz et al., 2018). Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas, el tratamiento con 25 plantas·m⁻² en la fase intermedia presentó una tendencia hacia un IAF más alto (5.51 m²·m⁻²), aproximadamente 20 % mayor al tratamiento con 17 plantas·m⁻² (4.01 m²·m⁻²).

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 m²·m⁻²) en los dos tratamientos con mayor densidad (30 y 25 plantas·m⁻²), en comparación con el tratamiento de menor densidad (17 plantas·m⁻²), con un valor de 4.94 m²·m⁻².

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⁻² incrementó su área foliar por planta en 853 cm² (un promedio de 42.65 cm² por día) y su IAF en 2.1 m²·m⁻². En contraste, el tratamiento con 17 plantas·m⁻² solo aumentó su área foliar en 518 cm² (un promedio de 25.9 cm² por día) y su IAF en 0.93 m²·m⁻². 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).

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⁻² en la fase intermedia y 8 plantas·m⁻² 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⁻² en la fase intermedia y final, respectivamente, lo cual difirió estadísticamente del tratamiento con mayor densidad (30 plantas·m⁻² en fase intermedia y 8 plantas·m⁻² en fase final).

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 fases.

Tratamiento (plantas·m⁻²)	Frutos por planta	Frutos por m²	Peso medio de frutos (g)	Rendimiento (kg·planta⁻¹)	Rendimiento (kg·m⁻²)
FI = 30 y FF = 8	11.7 a	94 a	94 b	1.10 b	8.80 a
FI = 25 y FF = 7	11.4 a	80 b	112 ab	1.27 b	8.89 a
FI = 20 y FF = 6	11.5 a	69 bc	108 ab	1.24 b	7.44 a
FI = 17 y FF = 5	13.3 a	66 c	116 a	1.51 a	7.58 a
DMSH	2.14	12.7	21.4	0.24	1.66

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

En cuanto al rendimiento por planta, el tratamiento con 17 plantas·m⁻² en la fase intermedia y 5 plantas·m⁻² en la fase final presentó estadísticamente el mayor valor (1.51 kg·planta⁻¹). 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 tuvo 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 fases 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 podría alcanzar un rendimiento anual superior a los 50 kg·m⁻²·año⁻¹ (500 t·ha⁻¹·año⁻¹).

Al comparar los pares de tratamientos del sistema de tres fases con el sistema de dos fases, 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⁻²) del sistema de tres fases redujeron significativamente el número de frutos por planta y por m² en comparación con el sistema de dos fases bajo la misma densidad final. Sin embargo, esto no ocurre con las densidades bajas en la fase intermedia (20 y 17 plantas·m⁻²). 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⁻² también mostró diferencias significativas a favor del sistema de dos fases. Además, el peso medio de los frutos se vio negativamente afectado bajo el tratamiento de mayor densidad.

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

Contraste (plantas·m⁻²)	Frutos por planta	Frutos por m²	Peso medio de frutos (g)	Rendimiento (kg·planta⁻¹)	Rendimiento (kg·m⁻²)
FI = 30 y FF = 8 vs. 8 en dos fases	11.7 vs. 14.7**	94 vs. 118**	94 vs. 108*	1.1 vs. 1.6**	8.8 vs. 12.7**
FI = 25 y FF = 7 vs. 7 en dos fases	11.3 vs. 13.6*	80 vs. 96*	112 vs. 110 ^{ns}	1.3 vs. 1.5*	8.9 vs. 10.5**
FI = 20 y FF = 6 vs. 6 en dos fases	11.5 vs. 12.6 ^{ns}	69 vs. 75 ^{ns}	108 vs. 115 ^{ns}	1.2 vs. 1.5*	7.4 vs. 8.7*
FI = 17 y FF = 5 vs. 5 en dos fases	13.3 vs. 13.4 ^{ns}	66 vs. 69 ^{ns}	116 vs. 116 ^{ns}	1.5 vs. 1.5 ^{ns}	7.6 vs. 7.7 ^{ns}

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

El comportamiento observado al comparar 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 fases, 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 fases con una densidad final de 8 plantas·m⁻² generó un rendimiento de 12.7 kg·m⁻² 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⁻²·año⁻¹. En contraste, el manejo en tres fases con fase intermedia de 30 plantas·m⁻² y fase final de 8 plantas·m⁻² presentó un rendimiento de 8.8 kg·m⁻² 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⁻²·año⁻¹; es decir, 62 % más producción que el sistema de dos fases. 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 fases de cultivo con densidades similares en la fase final. Al respecto, Sánchez-del Castillo et al. (2017a) obtuvieron rendimientos de 15 a 18 kg·m⁻² por ciclo con el cultivar ‘Moctezuma’ a una densidad de 7 plantas·m⁻², mientras que Moreno-Pérez et al. (2022) reportaron de 13 a 14 kg·m⁻² con el cultivar ‘El Cid’ a una densidad de 8 plantas·m⁻². 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⁻² 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 fases de cultivo, las mayores densidades de población durante la fase intermedia (25 y 30 plantas·m⁻²) 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 fases presentó un menor rendimiento de frutos por ciclo en comparación con el sistema de dos fases 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⁻² en la fase intermedia y 7 plantas·m⁻² en la fase final alcanzaron un rendimiento de 8.9 kg·m⁻² por ciclo de cultivo, con la posibilidad de obtener siete ciclos por año, lo cual representa un potencial anual de 62.3 kg·m⁻² (623 t·ha⁻¹·año⁻¹). 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 fases que se está desarrollando.

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
- 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
- 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 (*Lycopersicum 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=6091310>

**CAPÍTULO 4. PRODUCCIÓN DE JITOMATE A TRES RACIMOS EN TRES
FASES II: EFECTOS DE LA DURACIÓN DE LA FASE INTERMEDIA SOBRE
EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO**

Three-cluster tomato production in three phases II: Effects of intermediate phase duration on growth and yield

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

Resumen

Los altos costos de producción de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero, imponen la necesidad de desarrollar estrategias para optimizar el uso del espacio y tiempo a fin de lograr una productividad anual que permita rentabilidad económica para los productores. En este trabajo se prueba un manejo muy intensivo del cultivo, donde potencialmente se pueden lograr entre cinco y siete ciclos por año al acortar cada ciclo de producción a entre 50 y 60 días mediante el despunte a tres racimos por planta y el manejo de tres fases de cultivo: semillero, fase intermedia de alta densidad de población (18 plantas m⁻²) y fase final de producción. La alta densidad de la fase intermedia es necesaria para este sistema, pero puede generar competencia por luz a un grado que afecte negativamente el rendimiento; por ello, el objetivo fue estudiar el efecto de la duración de esta fase en el rendimiento por ciclo y la productividad potencial anual. Se establecieron cinco tratamientos: 25, 30, 35, 40 y 45 días de fase intermedia y un testigo con sólo dos fases (semillero y fase final de producción). El tratamiento con mayor productividad potencial anual fue el que duró 30 días en fase intermedia (9.5 kg m⁻² por ciclo y un potencial de 5.2 ciclos de cultivo por año).

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

Sometido a la Revista Chapingo Serie Horticultura

Estatus: Enviado

Autores: Felipe Sánchez-Del Castillo, Alan Cabañas-Díaz, Esaú del Carmen Moreno-Pérez, J. Jesús Magdaleno-Villar

Introducción

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

Por su valor y demanda en el mercado nacional y extranjero, así como el alto rendimiento y calidad que se obtienen bajo sistemas de agricultura protegida, el jitomate ha sido la hortaliza más importante, y la que más se ha manejado en condiciones de invernadero y con sistemas hidropónicos en nuestro país y en otros del mundo (Costa & Heuvelink, 2018; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). Durante 2018 se exportaron 1.68 millones de toneladas, volumen equivalente a 48.7 % de la producción nacional estimada en poco más de 3 millones de toneladas y el 99.7 % de las ventas del jitomate mexicano exportado se destinó a Estados Unidos (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2019).

Se ha validado comercialmente un sistema alternativo para la producción de jitomate hidropónico bajo invernadero que, sin incrementar los costos de producción por tonelada, permite lograr un rendimiento anual 50 % mayor al del sistema convencional de producción en invernadero, lo que ha resultado en mayores ganancias para los pequeños y medianos productores que sólo tienen acceso a mercados locales (Sánchez-Del Castillo et al., 2010; Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo & Moreno-Pérez, 2017).

El sistema alternativo desarrollado (Figura 1) se caracteriza por tener dos fases de cultivo: etapa de plántula en semillero y fase de producción (a partir del trasplante hasta el fin de

la cosecha) con lo que se logran tres ciclos de cultivo por año, en lugar del ciclo único del método de cultivo convencional. Para ello, se han implementado prácticas culturales que retrasan el trasplante hasta los 45-50 días después de la siembra (dds) y que reducen el periodo de trasplante a fin de la cosecha a 100-110 días mediante el despunte (eliminación de la yema terminal) por encima de la tercera inflorescencia junto con la poda de brotes laterales para dejar un solo tallo, lo que limita cada planta a producir sólo tres racimos. Si bien el rendimiento por planta se ve disminuido, la menor área foliar que forma cada planta despuntada de esta manera permite aumentar la densidad de población hasta 8 plantas m^{-2} , lo que compensa parcialmente la reducción del rendimiento por planta, mientras que el acortamiento de la fase de producción a menos de 110 días, permite obtener tres ciclos de cultivo por año (Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo et al., 2017) con rendimientos potencial anual cercano a las 450 t ha^{-1} (Sánchez-Del Castillo et al., 2021; Moreno-Pérez et al., 2022).

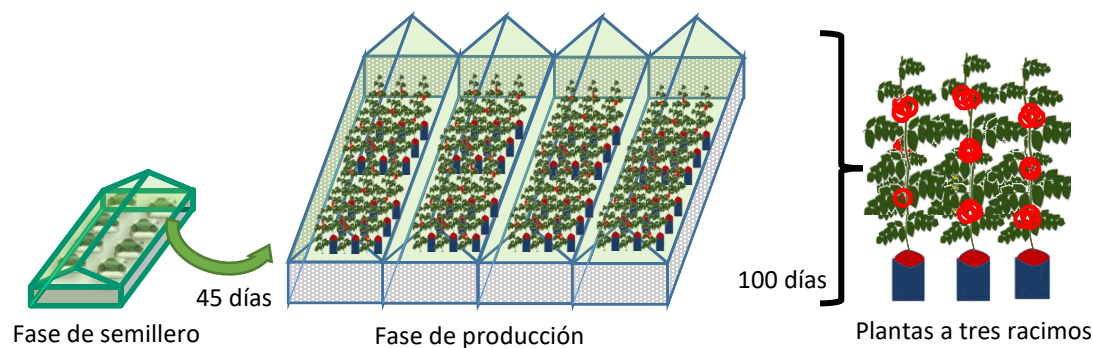


Figura 1. Esquema del sistema de producción a tres racimos por planta y tres ciclos por año en dos fases de cultivo (semillero y producción).

Por la alta densidad de población que se maneja, este sistema demanda una mayor cantidad de semillas, más charolas de germinación y más sustrato para la germinación y el crecimiento de plántulas con tres ciclos por año; sin embargo los costos de producción por ciclo han resultado, en promedio, menores que los del sistema clásico de un ciclo de cultivo por año, de tal manera que los costos de producción por kilogramo producido han resultado similares, resultando finalmente en una mayor ganancia económica por año (Sánchez-Del Castillo et al., 2012; Sánchez-Del Castillo et al., 2021).

Aunque se han logrado rendimientos altos con el sistema tres racimos por planta y tres ciclos de cultivo por año, si todavía fuera posible reducir el intervalo de tiempo que dura la fase de producción, se podrían obtener más ciclos de cultivo por año y, por lo tanto, mayor productividad anual. Al respecto, se ha intentado experimentalmente despuntar más temprano las plantas para, en vez de tres, dejarles solo dos, o inclusive un solo racimo a cada una, compensando el menor rendimiento por planta con un aumento proporcional en la densidad de población, pero no ha resultado práctico, ya que redundaría en costos de producción más altos por ciclo por el elevado costo de la semilla híbrida mejorada que se usa para la producción en invernadero, combinado con un menor rendimiento por planta (Sánchez-Del Castillo & Ponce-Ocampo, 1998; Sánchez-Del Castillo et al., 2017).

El propósito de la presente investigación es contribuir a desarrollar un nuevo sistema de producción de jitomate basado ya no en dos fases de cultivo (plántula en semillero y producción), sino en tres (plántulas en semillero, fase intermedia de alta densidad de población manejada en un invernadero adicional y fase final de producción). Usando el despunte a tres racimos por planta, con la inclusión de esta fase intermedia con una duración de 35 a 45 días usando un pequeño invernadero adicional, experimentalmente se ha logrado acortar el periodo de tiempo de 100-110 días que las plantas permanecen en su fase de producción a entre 50 y 60 días, lo que potencialmente permite entre seis y siete ciclos de cultivo por año (datos pendientes de publicarse).

La etapa de semillero es similar al sistema anteriormente propuesto y se planea que dure 45 días. Las plántulas de esa edad se trasplantan a bolsas o macetas con sustrato hidropónico y con un tutor de alambra integrado, serán manejadas no en el invernadero de producción final, sino en uno adicional más pequeño en donde se proyecta que las plantas crecerán temporalmente (35 a 45 días) en alta densidad de población (18 plantas m⁻²); a este periodo del cultivo se le denomina fase intermedia de alta densidad. Para fines de mayor rentabilidad económica, el invernadero adicional, debería tener una superficie cubierta como máximo 30 % de la que se ocupará en la fase final de producción. Entre los 80 y 90 días (o sea 35 a 45 días después del trasplante) las plantas, con todo y su contenedor y tutor, son trasladadas y reubicadas al invernadero de

producción a su densidad final de población (8 plantas m^{-2}), empezando así la fase final de producción que debe durar entre 50 y 60 días más (Figura 2).

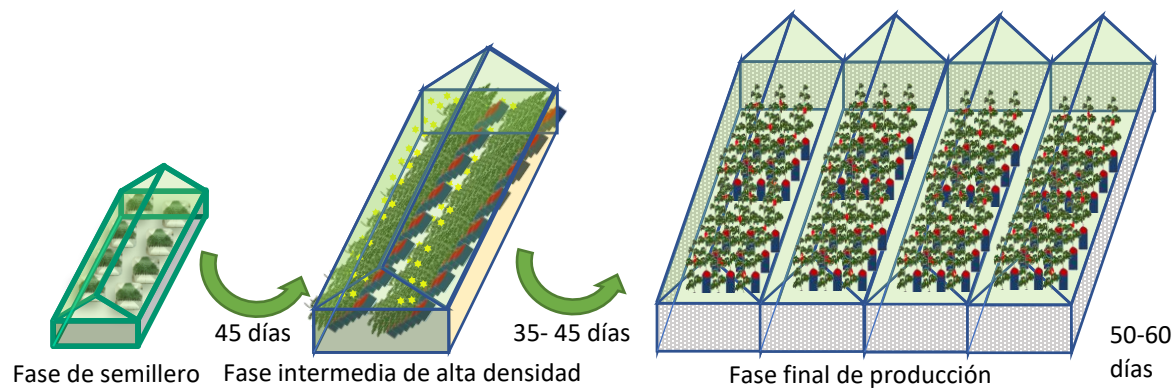


Figura 2. Esquema de sistema de producción a tres racimos por planta y seis a siete ciclos por año en tres fases de cultivo.

El problema es que a medida que se prolonga la duración de la fase intermedia con las plantas creciendo a densidades tan altas como 18 plantas m^{-2} , el área foliar por planta y en consecuencia el IAF irán alcanzando valores tan elevados que ocasionarán un estrés por competencia entre las plantas, a un grado tal que pueden afectar negativamente su crecimiento y rendimiento posteriores. De acuerdo con autores como Heuvelink et al. (2018) y Taiz et al. (2018) el IAF óptimo para máxima producción en el cultivo de jitomate se ubica entre 3 y 4.

Por ello el objetivo particular del presente trabajo fue determinar el máximo periodo de tiempo que las plantas pueden crecer en la fase intermedia de cultivo en alta densidad de población, sin efectos negativos en el crecimiento y rendimiento subsecuente, y estimar la productividad potencial en función del número de ciclos de cultivo por año que se pueden lograr de acuerdo con la duración resultante de la fase de producción final.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero e hidroponía en un ciclo que duró 140 días de siembra a fin de cosecha, abarcando desde marzo hasta julio de 2023. Tuvo lugar en las instalaciones del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México, localizado a 19°29'35" de latitud norte y 98°52'19" de longitud oeste a una altura de 2,250 msnm.

El invernadero utilizado es de tipo capilla de estructura metálica, con cubierta de polietileno térmico de alta dispersión de luz y tiene una orientación norte-sur. Está equipado con un calefactor de gas LP y un sistema de enfriamiento con pared húmeda y extractores en la pared opuesta, que permite mantener la temperatura del día entre 20 y 30 °C y entre 10 y 20 °C durante la noche a lo largo del año, mientras que la humedad relativa osciló entre 50 y 80 %. El piso fue cubierto con tela blanca de polipropileno (ground cover). Las tres fases del cultivo (plántulas en semillero, intermedia de alta densidad y final de producción) se desarrollaron en diferentes espacios dentro del mismo invernadero.

Como material vegetal se utilizó el híbrido comercial de jitomate 'Condor', que es de tipo saladette de hábito de crecimiento indeterminado. Las semillas fueron sembradas en charolas de poliestireno de 60 cavidades con un volumen de 200 ml por cavidad y una separación de 5 cm entre cavidades. Previo a la siembra las charolas fueron lavadas y desinfectadas.

Como sustrato para la germinación se utilizó una mezcla de turba vegetal (Cosmopeat®, pH=5.0-6.5 y CE=0.2-0.8 dS m⁻¹) con perlita (Multiperl) en proporción 1:1 (v/v). Colocada la semilla, se cubrió con una capa de vermiculita de aproximadamente 0.5 cm. Realizada la siembra, las charolas fueron colocadas individualmente sobre una estructura metálica elevándolas del suelo aproximadamente 50 cm.

Las plántulas fueron irrigadas con una solución nutritiva diluida a la mitad de su concentración normal durante los primeros 40 dds, con uno o dos riegos diarios, dependiendo de las condiciones ambientales. A partir de los 40 dds, se utilizó la solución a su concentración completa hasta el final del ciclo de cultivo. La solución nutritiva

completa contenía las siguientes concentraciones de nutrimentos (mg L^{-1}): Nitrógeno = 200, fósforo = 60, potasio = 250, calcio = 250, magnesio = 50, azufre = 150, hierro = 3, manganeso = 1, boro = 0.5, cobre = 0.2 y zinc = 0.2. Como fuentes de fertilizantes se utilizaron: 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 a un intervalo de 5.5 a 6.5 mediante adiciones de ácido sulfúrico diluido al 10 %. El agua para preparar la solución nutritiva procedía de pozo profundo y era de buena calidad ($\text{CE} = 0.3 \text{ dS m}^{-1}$); la CE resultante de la solución nutritiva completa aplicada osciló entre 2.2 y 2.5 dS m^{-1} a lo largo del ciclo de cultivo.

A los 40 dds se trasplantaron las plántulas para iniciar la fase intermedia de cultivo a una densidad de 18 plantas m^{-2} . Esto se realizó en macetas de 20 cm de diámetro y 21 cm de altura, lo que dio un volumen de 6.8 litros de sustrato por maceta. Se utilizó arena de tezontle rojo con la mayoría de sus partículas entre 1 y 3 mm de diámetro. A cada contenedor se le insertó en la arena una pieza de alambón de 1.2 m de largo para utilizarlo como tutor de la planta ayudándose con unos anillos plásticos que sujetaban el tallo de las plantas con dicho alambón.

La solución nutritiva era preparada en una cisterna y se distribuía a través de cintillas de goteo (Toro® cal. 8000) que corrían a lo largo de las hileras de plantas, con un gasto de 3800 ml h^{-1} por gotero. El espaciamiento entre goteros fue de 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 definió diariamente procurando un 20 % de drenaje respecto al volumen de solución aplicado en cada contenedor en cada riego. Se proporcionaron entre 4 y 8 riegos diariamente dependiendo de las condiciones climáticas y de la etapa fenológica del cultivo.

Las plantas de todos los tratamientos fueron despuntadas (remoción de la yema terminal) a los 75 dds, dejando dos hojas por arriba de la tercera inflorescencia formada. Todos los brotes laterales fueron eliminados conforme aparecieron, conduciendo el cultivo a un solo tallo por planta.

La cosecha de los primeros frutos comenzó a los 120 dds, cuando alcanzaron una coloración rosa; posteriormente se hicieron cortes sucesivos, esto durante 20 días más.

Se compararon seis tratamientos, en todos ellos, la fase de plántula en semillero duró 40 días, después de lo cual las plántulas fueron trasplantadas para iniciar una fase intermedia en alta densidad ($18 \text{ plantas m}^{-2}$), a excepción de un tratamiento testigo (T1) sin fase intermedia que fue trasplantado directamente a la fase final de producción a una densidad de 6 plantas m^{-2} . Los otros cinco tratamientos consistieron en diferentes tiempos de duración de las plantas en las fases intermedia y final (T2= 25 y 75; T3= 30 y 70; T4= 35 y 65; T5= 40 y 60; T6= 45 y 55 días, respectivamente). Para iniciar la fase final las plantas que estaban en fase intermedia a $18 \text{ plantas m}^{-2}$ fueron reubicadas con su maceta y tutor en otro espacio del invernadero a una densidad de 6 plantas m^{-2} donde 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. Se efectuaron pruebas de análisis de varianza y de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) con el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2002), versión 9.0.

A los 85 dds, se registraron datos de variables del crecimiento, momento en que las plantas de todos los tratamientos ya se encontraban en la fase final de producción. Además, al final del ciclo de cultivo se cuantificó el rendimiento y sus componentes principales por unidad de superficie.

Las variables de crecimiento medidas o calculadas fueron:

5. Altura de planta (cm): esta variable se midió con un flexómetro, la medición fue realizada desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento.
6. Diámetro de tallo (mm): para determinar esta variable se utilizó un vernier electrónico, tomando la medición en la parte media entre el cuarto y quinto nudos formados.
7. Área foliar por planta (cm^2): esta variable se determinó a los 40 dds (inicio de la fase intermedia) y después cada cinco días a partir de los 65 hasta los 85 dds mediante un método de estimación indirecto. Primero se realizó un muestreo

destrutivo de dos plantas por tratamiento a las cuales se les midió el largo y ancho de cada una de sus hojas y se determinó su área foliar mediante un integrador de área foliar Licor 3100 (Licor Inc., Lincoln Nebraska, EUA). Con estos datos se realizó una regresión lineal simple considerando el resultado del área foliar en el integrador y el producto de la multiplicación de largo por ancho de cada hoja y se generó la siguiente fórmula para la estimación del área foliar.

$$\text{Área foliar estimada} = 0.2889x + 10.813$$

$$R^2 = 0.9477$$

Donde x es el producto de la multiplicación de largo por ancho de una hoja dada. Posteriormente se midió el largo y ancho de cada hoja de dos plantas por unidad experimental para obtener el área foliar de hoja, con lo cual al sumar el dato de cada hoja dio como resultado el área foliar por planta.

Una vez determinada el área foliar por planta, se calculó el Índice de área foliar (m^2 de hoja m^{-2} de área cubierta): se obtuvo al dividir el área foliar total de las plantas (m^2 de hojas) creciendo encima de cada m^2 de área de superficie en cada unidad experimental.

Las variables de rendimiento fueron:

1. Número de frutos por unidad de superficie (frutos m^{-2} de invernadero): se calculó en cada unidad experimental, multiplicando el número de frutos por planta por la densidad de población en la fase final de producción, que fue de 6 plantas por m^2 , para todos los tratamientos.
2. Peso medio de fruto (g): se calculó dividiendo el peso total de 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 de producción (kg m^{-2} de invernadero): se calculó multiplicando el rendimiento por planta por la densidad de población de cada tratamiento en su fase final de producción.

4. Rendimiento potencial por año ($\text{kg m}^{-2} \text{año}^{-1}$ de superficie de invernadero): se estimó multiplicando el rendimiento por ciclo por el número de ciclos posibles por año para cada tratamiento según los diferentes tiempos de duración de las plantas en la fase final, bajo el supuesto de que en invernaderos con control de temperatura como el del presente experimento, y/o ubicados en localidades con condiciones de clima muy estable a lo largo del año, cada ciclo de cultivo tendría una duración similar. El número de ciclos posibles por año se obtuvo dividiendo los 365 días del año entre los días de duración de la fase final de producción de cada tratamiento.

Resultados y discusión

A los 85 dds, las plantas testigo sin fase intermedia tuvieron una menor altura y mayor diámetro de tallo respecto a las de todos los tratamientos de tres fases, a excepción del de 25 días de duración en fase intermedia para diámetro del tallo (Cuadro 1).

Estos resultados se pueden explicar por un efecto temporal de competencia por luz entre plantas ocasionado por la alta densidad de población presente durante dicha fase. Cómo lo mencionan Martínez et al. (2014), Taiz et al. (2018) y Jishi (2018), la competencia por luz entre plantas puede provocar un “síndrome para evitar la sombra” (shade avoidance syndrome) que entre otros síntomas provoca plantas más altas y delgadas, ya que en esas condiciones se producen menos fotoasimilados y estos se destinan en mayor proporción a elongar los tallos para buscar una mayor incidencia de luz sobre ellas. También es posible que, bajo esas condiciones de alta densidad, se estimule la síntesis de auxinas y/o giberelinas que induzcan elongación celular (Taiz et al., 2018; Bhatla, 2018; Kalra y Bhatla, 2018).

El área foliar por planta y, por lo tanto, el IAF en la fase final de producción resultaron similares entre todos los tratamientos evaluados. Esto seguramente se debió a que las plantas fueron despuntadas a los 75 dds, por lo que posteriormente ya no se formaron nuevas hojas y las que estaban presentes alcanzaron su máximo tamaño antes de los 85 dds, fecha en que se realizaron las mediciones.

Al trasplantarse para iniciar la fase intermedia a los 40 dds, las plantas tenían un área foliar relativamente pequeña y, por lo tanto, a la densidad de población de 18 plantas m⁻², presentaban un IAF de apenas 0.5 m² m⁻², por lo que aún no entraban en competencia por luz. Sin embargo, se observa que a medida que la fase intermedia se prolongó, el IAF aumentó rápidamente (Figura 1). Al ir aumentando el IAF la competencia por luz seguramente se hizo más intensa causando disminución del rendimiento en los tratamientos con mayor duración de la fase intermedia.

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

Tratamientos	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Área foliar por planta (cm ²)	IAF en fase final (m ² m ⁻²)
Testigo sin FI	74 b	13.8 a	5521	3.31
25 días en FI	88 a	13.1 ab	5718	3.43
30 días en FI	89 a	12.4 b	5482	3.29
35 días en FI	88 a	12.6 b	5695	3.41
40 días en FI	88 a	12.1 b	5435	3.26
45 días en FI	93 a	12.0 b	5457	3.27
DMS	7.45	1.14	965	0.57

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). DMS: diferencia mínima significativa. FI: fase intermedia. IAF: índice de área foliar.

Cabe señalar que, cuando el IAF de un cultivo supera un cierto umbral, las plantas comienzan a competir por la radiación solar incidente (Taiz et al., 2018). En estas condiciones, las hojas de las capas inferiores del dosel reciben menos luz y pueden consumir más fotoasimilados de los que producen. Esto resulta finalmente en una menor tasa de ganancia de peso por planta al día (Heuvelink et al., 2018; Heuvelink et al., 2020); además la calidad de la luz que penetra al interior del dosel cambia, provocando que los fitocromos produzcan señales que activen o inhiban genes relacionados con el balance

hormonal y en consecuencia con modificaciones en la morfología de las plantas que, a su vez, pueden afectar negativamente el rendimiento al desviar los fotoasimilados para ese propósito, dejando menos para formar más frutos y de mayor peso (Martínez et al., 2014; Jishi, 2018).

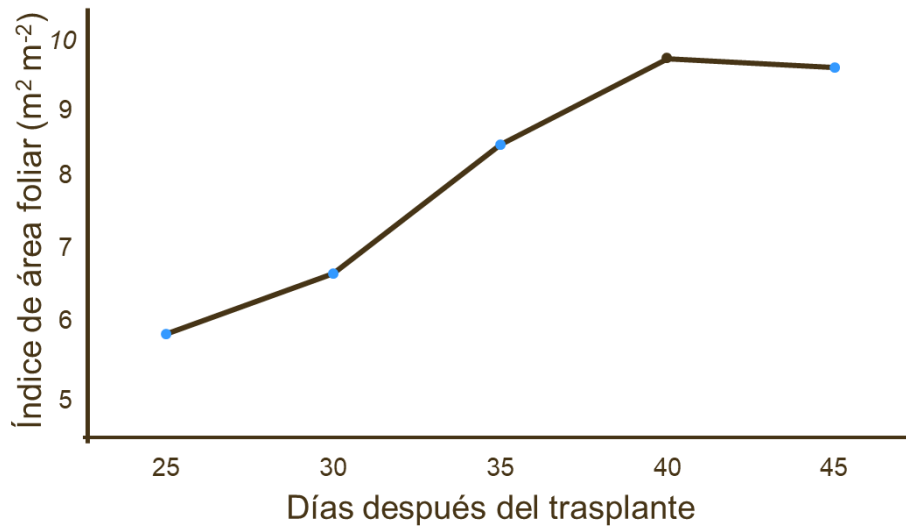


Figura 3. Comportamiento del índice de área foliar al momento del trasplante y al final de la etapa intermedia de cada tratamiento bajo el sistema de tres fases de cultivo.

El mayor rendimiento por ciclo de producción se obtuvo con el testigo sin fase intermedia y cuando las plantas permanecieron en la fase intermedia sólo 25 ó 30 días y en la fase final 75 ó 70 días respectivamente (Cuadro 2); es decir, en estos dos últimos tratamientos no hubo reducción del rendimiento debido al efecto de competencia por luz entre plantas por la alta densidad de población presente durante la fase intermedia. En cambio, con los tratamientos de mayor tiempo en fase intermedia, el rendimiento de las plantas disminuyó de manera significativa y de forma progresiva según la duración de esta fase. En el caso del tratamiento con mayor duración en la fase intermedia (45 días), el rendimiento se redujo en 33 % respecto al de los dos primeros tratamientos mencionados (Cuadro 2).

Los resultados muestran un rendimiento potencial anual significativamente mayor en todos los tratamientos con fase intermedia respecto al testigo, lo que se explica por el mayor número de ciclos posibles de producción por año en los tratamientos a tres fases.

Es interesante destacar que el rendimiento por ciclo disminuyó conforme aumentó el periodo que las plantas pasaron en la etapa intermedia de alta densidad, pero como el número de ciclos de cultivo posibles por año también aumentó al alargar dicha fase, el rendimiento potencial por año se mantuvo similar entre todos los tratamientos de tres fases (Cuadro 2). Al respecto, los tratamientos con 0, 25, 30, 35, 40 y 45 días en fase intermedia, en un ciclo de cultivo total de 140 días pueden lograr 3.6, 4.8, 5.2, 5.6, 6.1, y 6.6 ciclos de cultivo por año, respectivamente.

Cuadro 2. Comparación de medias del efecto de la duración de la fase intermedia sobre el rendimiento y sus componentes en plantas de jitomate.

Tratamiento	Frutos m ⁻²	Peso medio de fruto (g)	Rendimiento (kg m ⁻² ciclo ⁻¹)	Rendimiento potencial (kg m ⁻² año ⁻¹)
Testigo sin FI	114 a	87 ab	9.8 a	35.8 b
25 días en FI	109 a	90 a	9.7 a	47.2 a
30 días en FI	108 a	88 a	9.5 a	49.6 a
35 días en FI	98 ab	84 abc	8.1 b	45.8 a
40 días en FI	99 ab	72 c	7.1 bc	43.4 a
45 días en FI	88 b	75 bc	6.5 c	43.6 a
DMS	16	12	0.21	6.7

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). DMS: diferencia mínima significativa. FI: fase intermedia.

El alargar la fase intermedia a 45 días se produjo una disminución significativa en el número de frutos por planta (Cuadro 2). En los demás tratamientos, esta variable fue similar. Sin embargo, numéricamente se observó una tendencia a un mayor número de frutos cuando las plantas estuvieron sin fase intermedia (testigo) o cuando la fase

intermedia se limitó a 25 ó 30 días. También se observó un aumento significativo en el peso medio de fruto en el testigo y en los dos últimos tratamientos mencionados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se considera que el manejo más adecuado para un productor a escala comercial es el de seguir un sistema de producción de tres fases con una duración de 30 días en fase intermedia y 70 días en la fase final de producción, ya que numéricamente es con este tratamiento con el que se obtiene mayor rendimiento (9.5 kg m^{-2} por ciclo de cultivo) y potencial de 5.21 ciclos por año, lo que equivale a 49.6 kg m^{-2} ($496 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), rendimiento anual similar al promedio reportado en invernaderos de alta tecnología, pero cuyos costos de producción por año son mucho más elevados (Heuvelink et al., 2020). Además, considerando un costo de producción constante por ciclo, el costo de producción por año sería relativamente más bajo respecto a los demás tratamientos (excepto al de duración de 25 días en fase intermedia) pues tiene menos ciclos de cultivo por año.

Cabe hacer la observación de que el rendimiento por unidad de superficie por ciclo de 9.8 kg m^{-2} fue inferior a lo esperado, pues resultó comparativamente más bajo que el obtenido en otros ensayos. Por ejemplo, Sánchez-Del Castillo et al. (2017) reportan rendimientos de 15 a 18 kg m^{-2} por ciclo con el cultivar 'Moctezuma' a tres racimos en dos fases (semillero y fase final de producción) y una densidad de 7 a 13 plantas m^{-2} , mientras que Moreno-Pérez et al. (2022) obtuvieron 13 kg m^{-2} con el cultivar 'El Cid' manejado igual, pero a una densidad de 8 plantas m^{-2} . Cabe mencionar que en ambos casos fueron utilizadas como contenedores camas rellenas con arena de tezontle con 30 cm de profundidad dando de 25 a 30 litros de sustrato por planta. En el presente experimento la densidad de población en fase final se limitó a sólo 6 plantas m^{-2} y el volumen de sustrato a 6.8 litros por planta; ambas situaciones, además de la alta densidad, pudieron contribuir al bajo rendimiento obtenido.

De acuerdo con Heuvelink et al. (2018) y Heuvelink et al. (2020) el mayor rendimiento se puede alcanzar con un IAF cercano a 4, por lo que se considera conveniente explorar el comportamiento agronómico de densidades de población mayores a 6 plantas m^{-2} , sin incrementar a más de 18 la densidad de plantas en la etapa intermedia. Por otro lado, se debe experimentar con el uso de bolsas o macetas de mayor volumen de sustrato por

planta, pues esto favorece un mayor rendimiento al propiciar mejores condiciones para el crecimiento de la raíz por una mejor oxigenación y capacidad de retención de la solución nutritiva, con menos oscilaciones de pH y conductividad eléctrica entre riego y riego (Suazo-López et al., 2014).

En el proceso de optimizar este sistema de producción se recomienda realizar un experimento que comprenda distintas densidades de población en la fase final de producción en conjunción con mayores volúmenes de contenedor a fin de confirmar estas suposiciones y superar esta limitación del rendimiento por ciclo.

Conclusiones

La prolongación de la fase intermedia de alta densidad se acompañó de incrementos en el índice de área foliar, plantas de mayor altura y menor diámetro del tallo.

Con una duración de 30 días en fase intermedia, se logró un rendimiento de 9.5 kg m⁻² por ciclo de cultivo y 5.2 ciclos posibles por año, lo que representa potencialmente el mayor rendimiento anual (49.6 kg m⁻² de invernadero).

Literatura citada

- Bhatla, C. S. (2018). Auxins. In Bhatla, C. S. & Lal, A. M. (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
- Costa, J. M., & Heuvelink, E. (2018). The global tomato industry. In Heuvelink, E. (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., 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). Plant growth and yield. In Heuvelink, E. (Ed.), *Tomatoes* (2nd ed., 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 Wien, H. C., & Stützel, H. (Eds.), *The Physiology of Vegetable Crops*, (2nd ed., pp. 138-178). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781786393777.0138>
- Jishi, T. (2018). Led lighting technique to control plant growth and morphology. In Kosai, T. (Ed.), *Smart Plant Factory* (pp. 211-222). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_14
- Kalra, G., & S. C. Bhatla. (2018). Gibberellins. In Bhatla, C. S. & Lal, A. M. (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
- 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>
- Moreno-Pérez, E. del 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*. 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
- Sánchez-Del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. del C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del C., & Contreras-Magaña, E. (2012). Development of Alternative Crop Systems for Commercial Production of

Vegetables in Hydroponics – I: Tomato. *Acta Horticulturae*, 947, 179-187. Doi: 10.17660/ActaHortic.2012.947.22

Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del 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.

Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. del 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. del 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.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (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. Doi: 10.9734/ARRB/2014/11936

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

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

A partir de los resultados obtenidos en los experimentos, se concluye lo siguiente:

Considerando el menor tiempo que ocupa la fase final de producción en el sistema de tres fases, hay un incremento en el rendimiento potencial anual de jitomate respecto al sistema alternativo en dos fases de cultivo.

Las densidades de 25 y 30 plantas m^{-2} durante la fase intermedia promovieron elongación de tallo y un mayor índice de área foliar, respecto al resto de tratamientos.

La densidad de 25 plantas m^{-2} en la fase intermedia y 7 plantas m^{-2} en la fase final obtuvo 8.9 kg m^{-2} por ciclo de cultivo con la posibilidad en invernaderos con posibilidad de control ambiental de realizar hasta siete ciclos anuales de producción en fase final, con un rendimiento potencial anual de 62.3 kg m^{-2} , lo que equivale a 623 toneladas por hectárea al año. Desde luego se requiere una validación experimental en invernaderos con control eficaz de la temperatura.

Prolongar la fase intermedia de alta densidad de población produjo elongación y menor diámetro de tallo, también incrementó el índice de área foliar.

Al mantener las plantas durante 30 días en la fase intermedia se obtuvo un rendimiento de 9.5 kg m^{-2} por ciclo de cultivo y 5.2 ciclos de producción posibles por año, con un rendimiento potencial anual de 49.6 kg m^{-2} de invernadero.