



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIA EN HORTICULTURA

COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE
PLANTAS DE JITOMATE ESTABLECIDAS EN UN
ARREGLO DE DOSEL ESCALERIFORME EN
PERIODOS DE ALTA DENSIDAD DE POBLACIÓN

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

KEVIN MARTÍNEZ AYALA

Bajo la supervisión de:

DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

Chapingo, Estado de México. Junio de 2022.



APROBADA



Instituto de Horticultura

La presente tesis titulada **“COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE PLANTAS DE JITOMATE ESTABLECIDAS EN UN ARREGLO DE DOSEL ESCALERIFORME EN PERIODOS DE ALTA DENSIDAD DE POBLACIÓN”** fue realizada por el C. Kevin Martínez Ayala, bajo la dirección del Dr. Felipe Sánchez del Castillo y asesoría del Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez y Dr. J. Jesús Magdaleno Villar, misma que fue aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

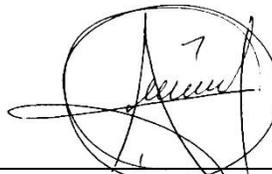
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ASESOR:



Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

ASESOR



Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

Chapingo, México. Junio de 2022.

CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	v
DATOS BIOGRÁFICOS.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	7
1.2. Hipótesis.....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
2.1. Generalidades del jitomate	9
2.2. Importancia del cultivo bajo agricultura protegida.....	12
2.3. Sistema convencional de producción	13
2.4. Sistema alternativo de producción.....	13
2.5. Optimización del sistema alternativo	14
2.6. Problemática de la fase intermedia.....	16
2.7. El empleo de los sistemas escaleriformes hacia la optimización del sistema alternativo.....	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1. Fase de semillero	19
3.2. Fase intermedia de alta densidad.....	25
3.3. Fase final	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1. Variables evaluadas a los 45 dds (fase de semillero).....	33
4.2. Variables evaluadas a los 75 dds (fase intermedia)	35

4.3.	Variables evaluadas a los 90 dds (final de la fase intermedia)	39
4.4.	Análisis del rendimiento y sus componentes	43
4.5.	Análisis de rendimiento entre hileras	47
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
6.	LITERATURA CITADA.....	52

DEDICATORIA

-Con gratitud por siempre-

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado, sin el cual hubiese sido imposible realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, especialmente, **al Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia** por permitirme ser parte de tan renombrada casa de estudios.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por su imprescindible orientación en el desarrollo de esta tesis. Por toda su atención y cordialidad. Por la eminente calidad en los conocimientos proporcionados.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, por su excelente disposición para la culminación de este trabajo, su constante y acertada asesoría, así como sus invaluable enseñanzas

Al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar, por su presteza y ayuda incondicional, la puntualidad de sus observaciones, al igual que su admirable docencia.

Al C. Luis Ángel Romero Rivero, auxiliar de la Academia de Agricultura Protegida, por el apoyo en campo y las facilidades otorgadas.

A todo el personal académico, técnico y administrativo del Departamento de Fitotecnia y a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de la presente investigación.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento en plántulas de jitomate a los 45 días después de la siembra.....	33
Cuadro 2. Comparaciones de medias a los 45 días después de la siembra para variables de crecimiento en plántulas de jitomate sin y con dos aplicaciones de paclobutrazol a los 22 y 38 días después de la siembra.....	34
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento en plantas de jitomate durante la fase intermedia (75 días después de la siembra).	35
Cuadro 4. Comparaciones de medias para variables de crecimiento en plantas de jitomate durante la etapa intermedia (75 días después de la siembra).....	36
Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento en plantas de jitomate al final de la fase intermedia (90 días después de la siembra).....	40
Cuadro 6. Comparaciones de medias para variables de crecimiento en plantas de jitomate al final de la fase intermedia (90 días después de la siembra).....	41
Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza para el número de frutos entre tratamientos al final de la cosecha.....	44
Cuadro 8. Cuadrados medios del análisis de varianza para el peso de frutos entre Tratamientos al final de la cosecha.	44
Cuadro 9. Comparaciones de medias para el número de frutos entre Tratamientos al final de la cosecha.....	45
Cuadro 10. Comparaciones de medias para el peso de frutos entre tratamientos al final de la cosecha.	45

Cuadro 11. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta al final de la cosecha en los tratamientos de dosel uniforme sin y con aplicación de paclobutrazol. 47

Cuadro 12. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta al final de la cosecha en los tratamientos de dosel escaleriforme de dos escalones sin y con aplicación de paclobutrazol. 48

Cuadro 13. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta al final de la cosecha en los tratamientos de dosel escaleriforme de tres escalones sin y con aplicación de paclobutrazol. 48

Cuadro 14. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta a final de la cosecha en el testigo de dos fases de cultivo. 48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista externa del invernadero utilizado en la fase de semillero.	20
Figura 2. Vista interna del invernadero utilizado en la fase de semillero.	20
Figura 3. Material vegetal utilizado.	21
Figura 4. Charolas de 60 cavidades utilizadas en semillero.	22
Figura 5. Aplicación de paclobutrazol.	23
Figura 6. Toma de datos en laboratorio de plantas representativas.	24
Figura 7. Vista externa del invernadero utilizado en la fase intermedia.	25
Figura 8. Vista interior del invernadero utilizado desde la fase intermedia.	26
Figura 9. Vista de arreglo de las plantas formando un dosel uniforme. a) Sin aplicación de PBZ y b) Con aplicación de PBZ.....	27
Figura 10. Vista del arreglo de las plantas formado un dosel en forma de escalera con dos escalones. a) Sin aplicación de PBZ y b) Con aplicación de PBZ.....	28
Figura 11. Vista del arreglo de plantas formando un dosel en forma de escalera, con tres escalones. a) Sin aplicación de PBZ y b) Con aplicación de PBZ.....	29
Figura 12. Vista del arreglo de las plantas en el Testigo absoluto.	30
Figura 13. Vista del acomodo de las plantas en la fase final.	32

RESUMEN

Comportamiento agronómico de plantas de jitomate establecidas en un arreglo de dosel escaleriforme en periodos de alta densidad de población

Como alternativa productiva para incrementar el rendimiento de jitomate hidropónico en invernadero, se tuvo como objetivo evaluar el efecto ejercido sobre el cultivo derivado de diferentes arreglos del dosel, uniforme o escaleriforme, y la aplicación del retardador de crecimiento paclobutrazol, utilizando un nuevo sistema de producción basado en tres fases de cultivo (semillero, fase intermedia a una densidad de población de 30 plantas m⁻² y fase final a una densidad de 8 plantas m⁻²) con plantas despuntadas a tres racimos. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con doce y cuatro repeticiones, dependiendo de la fase en la que se encontrara el cultivo. Se realizaron mediciones de diferentes variables morfológicas (altura y ancho de planta, grosor del tallo e índice de área foliar), de acumulación de biomasa (razón de área foliar y peso seco) a los 45, 75 y 90 días después de la siembra, así como mediciones del rendimiento final dentro y entre los tratamientos (número y peso total de frutos). En el presente trabajo, el crecimiento de las plantas a lo largo de su ciclo de cultivo fue menor a lo esperado y no causó efectos detectables de competencia por luz, independientemente de la aplicación del retardador de crecimiento, por lo que no hubo diferencias entre los tratamientos producidas por la disposición de las hileras de plantas durante la fase intermedia de cultivo a pesar de la alta densidad de población que se aplicó temporalmente. No obstante, en base a los resultados obtenidos, se mostró que es posible alcanzar los siete ciclos de producción anual que ofrece este nuevo sistema de producción. Sin embargo, el rendimiento por unidad de superficie fue relativamente bajo, por lo que se plantean sugerencias de trabajos experimentales encaminados a mejorarlo.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., manipulación del dosel, paclobutrazol, sistemas de producción.

ABSTRACT

Agronomic behavior of tomato plants established in a ladder-shaped canopy arrangement in periods of high population density

As a productive alternative to increase the yield of hydroponic tomato in the greenhouse, the aim of this work was to evaluate the effect exerted on the crop derived from different arrangements of the canopy, uniform or stair-shaped, and the application of the growth retardant paclobutrazol, using a new production system based on three cultivation phases (seedbed, intermediate phase at a population density of 30 plants m⁻² and final phase at a density of 8 plants m⁻²) with plants blunted to three clusters. An experimental design of randomized complete blocks with twelve and four repetitions was used, depending on the phase in which the crop was growing. Measurements were made of different morphological traits (plant height and width, stem thickness and leaf area index), biomass accumulation (leaf area ratio and dry weight) at 45, 75 and 90 days after sowing, as well as measurements of the final yield within and among the treatments (number and total weight of fruits). In the present work, the growth of the plants throughout their cultivation cycle was lower than expected and did not cause detectable effects of competition for light, regardless of the application of the growth retardant, so there were no differences between the treatments produced by the arrangement of the rows of plants during the intermediate phase of cultivation despite the high population density that was temporarily applied. However, based on the results obtained, it was shown that it is possible to achieve the seven annual production crop cycles offered by this new production system. Nevertheless, the yield per unit area was relatively low, so suggestions for new experimental work to improving it are made.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., canopy manipulation, paclobutrazol, production system.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías en el sector agropecuario tiene como objetivos aumentar el rendimiento por unidad de superficie, la calidad de los productos que se generen y reducir el riesgo de fracaso por la presencia de circunstancias ambientales o económicas adversas. En varias regiones de México, las condiciones climáticas, geográficas y socioeconómicas para la producción de cultivos presentan limitaciones para el crecimiento y desarrollo de cultivos, por lo que el reto es generar tecnologías de producción que se adecúen a las circunstancias de las diferentes regiones y que sean factibles de ser llevadas a la práctica por los productores (Bastida, 2012; Sánchez et al., 2017a).

Frente a dicha problemática, se ha señalado a la agricultura protegida como una de las opciones con mayor viabilidad para conseguir una producción más segura y rentable de cultivos de alto valor económico (Sánchez et al., 2017b), destacando entre estos últimos el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) ya que, de acuerdo con las estadísticas, se trata de una de las hortalizas con mayor valor en el mundo y en México (Rodoni, 2008; Islas, 2021). Se cultiva ampliamente bajo invernadero, convirtiendo al país en su principal productor y exportador (FIRA, 2019).

La producción de jitomate bajo invernadero en México, se ha hecho tradicionalmente de acuerdo con un paquete tecnológico desarrollado para las condiciones socioeconómicas y ambientales del norte de América y Europa, caracterizado por el uso de variedades indeterminadas a densidades de población de 2 a 3 plantas m⁻², donde los tallos pueden crecer más de 7 m para cosechar 15 o más racimos por planta en un solo ciclo de cultivo por año, en el que se establecen dos fases, una de semillero de 30 a 60 días de siembra a trasplante, y otra del trasplante hasta fin de cosecha que puede durar de 200 a 300 días o inclusive más (Sánchez et al., 2012).

El rendimiento promedio con invernaderos de mediana tecnología con este sistema de cultivo se ubica en un rango entre 200 y 300 t ha⁻¹ año⁻¹ (Sánchez & Moreno, 2017); aunque con invernaderos de alta tecnología se indicaron rendimientos que pueden sobrepasar las 400 e incluso las 500 t ha⁻¹ año⁻¹ (Heuvelink et al., 2018). De acuerdo con Sánchez et al. (2012) y Sánchez (2016), este sistema presenta algunas desventajas, entre las cuales se destacan la dificultad técnica para el manejo del cultivo por lo largo de su ciclo, la necesidad de invernaderos muy altos que se traducen en elevados costos de instalación y operación que solo son rentables para grandes productores con acceso a mercados selectos o de exportación y las fluctuaciones constantes de precios en el mercado nacional que pueden derivar eventualmente en pérdidas económicas.

Por lo anterior, a lo largo de varios años de investigación y diferentes validaciones con productores, en el Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, se ha desarrollado un sistema alternativo de producción de jitomate apto para invernaderos de mediana tecnología ubicados en zonas templadas, el cual consiste básicamente en el manejo del cultivo en dos fases:

La primera fase consiste en sembrar las semillas y manejar las plántulas en un invernadero acondicionado como semillero y trasplantarlas al invernadero definitivo cuando éstas alcancen una edad de 45 a 55 días.

La segunda fase tiene lugar en ese invernadero definitivo, va desde el trasplante hasta el final de la cosecha. Consiste en despuntar a las plantas (eliminación de la yema terminal) una o dos hojas por encima del tercer racimo, quitando también todos los brotes laterales o “chupones”, de tal manera que sólo se dejan para cosecha tres racimos por planta. Así, en climas templados, se logra reducir el tiempo de esta fase a unos 100 días en condiciones de localidades de clima templado, lo que permite obtener tres ciclos de cultivo por año.

Dado que con este sistema las plantas crecen poco (aproximadamente 1 m de altura) y tienen menos área foliar que las del sistema convencional, para

compensar parcialmente el menor rendimiento por ciclo que se obtiene de cada planta, se pueden manejar densidades tan altas como 7 a 8 plantas m^{-2} (Sánchez et al., 2012; Sánchez et al., 2019), por lo que, con este sistema, se han reportado a escala comercial rendimientos anuales 50 % mayores al sistema convencional de mediana tecnología (Sánchez & Moreno, 2017).

Bajo este sistema de producción, los primeros días después del trasplante el área foliar de las plantas todavía es pequeña y el índice de área foliar (IAF) es bajo por lo que una alta proporción de la radiación incidente no está siendo absorbida por el dosel. Más adelante, conforme las plantas van creciendo, el IAF del cultivo se va incrementando hasta llegar a un máximo.

De acuerdo con lo anterior, se plantea la posibilidad de implementar un nuevo y más productivo sistema de producción basándose en la idea de que, mediante el uso de macetas como contenedores, las plantas pudieran cultivarse, después del trasplante, de manera temporal, en un espacio adicional de invernadero en alta densidad (tres a cuatro veces más que la densidad definitiva) y luego de ese tiempo, cuando el área foliar de las plantas se incrementara más allá de cierto límite (índice de área foliar mayor a 5), se reubicarían las macetas con todo y plantas en el invernadero definitivo a la densidad normal de 7 a 8 plantas m^{-2} .

Así, a cambio de un espacio adicional de invernadero de un 25 a 30 % con relación al ocupado en la fase final de cultivo, se podría reducir a aproximadamente 50 días el periodo de tiempo que las plantas permanecerían en el invernadero definitivo durante cada ciclo de cultivo. Acoplado las fases de semillero y de alta densidad en un invernadero adicional, para hacer cultivos secuenciados en el tiempo, se podrían lograr hasta siete ciclos de cultivo por año en el invernadero definitivo, lo que en teoría podría duplicar el rendimiento anual respecto a lo que actualmente se logra con los tres ciclos por año del sistema a tres racimos por planta en alta densidad.

El principal argumento que hace posible la concepción de este nuevo sistema de producción es que se puede hacer un uso más eficiente del espacio y del

tiempo dentro del invernadero al desarrollar el cultivo no en dos, sino en tres fases o periodos de tiempo, cada una de las cuales ocuparía un espacio en particular.

La primera fase o fase de semillero de este nuevo sistema comprendería desde la siembra, la germinación y desarrollo de la plántula en el semillero hasta su trasplante a los 45 después de la siembra (dds) tal y como se maneja actualmente para el sistema de tres racimos por planta y tres ciclos por año.

La segunda fase o fase intermedia de alta densidad duraría otros 45 días y requeriría un espacio de invernadero adicional equivalente al 25 a 30 % de la superficie que se destinaría para la tercera y última fase. Durante este periodo de los 45 a los 89 dds, las plantas se manejarían a una densidad tan alta como 30 plantas m⁻² de invernadero (15 cm entre plantas y 15 cm entre hileras) en conjuntos de seis hileras de plantas separadas por pasillos de 50 cm de ancho.

Esta etapa iniciaría con el trasplante de las plántulas de 45 días de edad provenientes del semillero a bolsas o macetas de 15 cm de diámetro y aproximadamente seis litros de capacidad; rellenas con arena de tezontle rojo. Cada planta sería tutorada individualmente con un alambrón enterrado en la bolsa o maceta el cual se sujetaría a la planta con anillos de plástico.

La tercera fase denominada fase final iniciaría a los 90 dds con el traslado de las plantas provenientes de la fase intermedia de alta densidad con todo y su contenedor, ya sea bolsa o maceta junto con los tutores de alambrón, a un invernadero definitivo a una densidad final de 7 a 8 plantas m⁻². Ahí permanecerían hasta el final de la cosecha lo que ocurriría aproximadamente a los 140 días después de la siembra; es decir, esta etapa tendría una duración de 50 días.

De esta manera, haciendo siembras escalonadas cada 50 días y manejando la etapa intermedia en el pequeño invernadero adicional, se podrían obtener en el invernadero de la fase final de producción ciclos de cultivo cada 50 días, haciendo posible, como ya se mencionó, el logro de siete ciclos por año con un

potencial de rendimiento que se estima cercano a las 1000 t ha⁻¹ año⁻¹, lo cual es muy sorprendente, sobre todo hablando de invernaderos de baja o mediana tecnología.

Casi todo el manejo y prácticas culturales que requeriría este sistema de cultivo ya se conocen, excepto el manejo de la etapa intermedia de alta densidad de población, donde hacia el final de esta, se esperaría un efecto negativo por la creciente competencia entre plantas debido al crecimiento paulatino de su área foliar. Así, el principal reto que plantea este sistema de producción y que pone en duda su factibilidad, es el posible efecto negativo que puede tener un periodo temporal de alta densidad de población sobre el rendimiento y la calidad de fruto al final del ciclo; efecto que seguramente será más marcado durante los últimos días de la fase intermedia de alta densidad, periodo donde cada planta alcanza su máxima área foliar.

Sánchez & Moreno (2017) y Heuvelink et al. (2018), señalaron que un índice de área foliar óptimo para el crecimiento y desarrollo del jitomate se ubica entre 3 y 4. Como es sabido, las densidades de población altas conducen a índices de área foliar excesivos, además de una menor producción de fotoasimilados por planta, desencadenándose alteraciones morfológicas tales como un mayor crecimiento de los entrenudos con tallos alagados que resultan más débiles a la manipulación y más susceptibles a daños mecánicos o a condiciones de estrés, hojas más delgadas y con menos área foliar que tienden a apuntar hacia arriba, aspectos todos que repercuten negativamente en el rendimiento final (Wien, 1999; Taiz & Zeiger, 2002; Higuchi & Hisamatsu, 2016; Jishi, 2018).

Para una misma cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente sobre el dosel por unidad de superficie y tiempo, a una mayor densidad de población, se provoca menos absorción de RFA por planta y también una distribución menos uniforme entre todas las hojas, pues al haber más hojas por unidad de superficie, las inferiores quedan más sombreadas por las superiores.

Ambas situaciones disminuyen la tasa de producción de asimilados por planta al día y esto se reflejará al final del ciclo en un menor rendimiento y tamaño de

fruto por planta (Gardner et al., 2017; Heuvelink et al., 2018). Como lo señalan Li et al. (2014), las plantas se benefician en mayor medida entre más uniforme es la distribución de radiación fotosintéticamente activa a través del dosel del cultivo, dado que la tasa de fotosíntesis de cada hoja en particular muestra una saturación hiperbólica gradual con el incremento en intensidad de luz. Dicho de otra manera, la mayor tasa de fotosíntesis en un dosel ocurre cuando la mayoría de las hojas están iluminadas a una irradiancia media que cuando sólo pequeños porcentajes de éstas reciben una intensidad de radiación alta y una mayor porción recibe una irradiancia baja.

Una forma de mejorar la distribución de la radiación incidente sobre las hojas del dosel y disminuir los efectos morfogenéticos del sombreado mutuo, consiste en acomodar las hileras de plantas en niveles o escalones colocados a distintas alturas para formar un dosel en forma de escalera (Vázquez et al., 2007; Sánchez et al., 2010).

Varios autores (Méndez & Sánchez, 2005; Vázquez et al., 2007; Sánchez et al., 2014; Sánchez et al., 2017a) reportan reducciones en altura de planta e incrementos importantes en el rendimiento final con la disposición escalonada de hileras de plantas de jitomate para formar un dosel en forma de escalera, y lo atribuyen a una intercepción más uniforme de la RFA, respecto a plantas creciendo a la misma densidad, pero formando un dosel uniforme (hileras de plantas al mismo nivel).

En este experimento se plantea que la colocación de las hileras de plantas para formar un dosel en forma de escalera durante la fase intermedia de cultivo (45 a 90 dds) puede conducir a una distribución más uniforme de la RFA en el dosel, ayudando a las plantas a sobrellevar el estrés por la alta densidad temporal a la que serán sometidas durante esta fase y que esto puede reflejarse en un mayor peso medio de frutos y un mayor rendimiento por planta en la fase final del cultivo.

Por otro lado, se plantea que otra forma posible de aminorar los efectos negativos del estrés ocasionado por la alta densidad temporal a la que se verán

sometidas las plantas en la fase intermedia podría ser mediante reducción en la altura de las plantas y, sobre todo, de su área foliar, aspectos que podrían promoverse mediante la aplicación de retardadores de crecimiento como el paclobutrazol (PBZ). Se sabe que la aplicación de retardadores del crecimiento desde el semillero provoca la disminución del crecimiento de las plantas porque se reduce la altura y la distancia de los entrenudos (Fletcher et al., 2000; Brigard et al., 2006). También se disminuye su área foliar (De Moraes et al., 2005; Ruíz, 2019).

Barret y Nell (1986), señalaron que los triazoles son activos en concentraciones pequeñas y que, por lo regular, sólo se requiere de una a tres aplicaciones del inhibidor, pero su efecto y persistencia dependerá de la especie y las condiciones ambientales en que se encuentra la planta. Experimentos recientes, que aún no se publican, muestran que, si las aplicaciones de retardadores se realizan inmediatamente antes del trasplante, sus efectos pueden perdurar hasta uno o dos meses después, lo que incidiría en la fase intermedia, periodo donde el cultivo estará temporalmente sometido a una densidad de población tan alta como 30 plantas m⁻².

Tomando en cuenta lo antes descrito, en la presente investigación se busca demostrar que el manejo de las plantas en un arreglo en dosel escaleriforme y la aplicación de retardadores de crecimiento, pueden coadyuvar a lograr un índice de área foliar óptimo, al igual que una distribución más uniforme de la RFA sobre el dosel y al interior de este, durante la fase intermedia del sistema de producción planteado, y reducir en las plantas el estrés por la alta densidad, lo cual puede reflejarse ventajosamente en el rendimiento final del ciclo de cultivo.

1.1. Objetivos

- Contribuir a la implementación de un paquete tecnológico de producción de jitomate manejado a tres racimos por planta en tres fases de cultivo (inicial en semillero, intermedia de alta densidad en invernadero adicional y final en el invernadero definitivo).

- Evaluar el comportamiento agronómico del cultivo de jitomate a tres racimos por planta al disponer las hileras de plantas en forma de escalera durante la etapa intermedia del cultivo (45 a 90 días después de la siembra) a una densidad de 30 plantas m⁻².
- Ponderar el efecto combinado de la aplicación de retardador de crecimiento como el paclobutrazol previo al trasplante y el manejo de un dosel escaleriforme en alta densidad de población en la etapa intermedia del cultivo (45 a 90 días después de la siembra), sobre el comportamiento agronómico del cultivo de jitomate manejado a tres racimos por planta.

1.2. Hipótesis

La aplicación de paclobutrazol en la etapa de plántula promoverá plantas compactas y con poca área foliar durante la fase intermedia; aunado a ello, la disposición de las hileras de plantas en forma de escalera durante la fase intermedia del cultivo favorecerá una distribución más uniforme de la RFA incidente sobre el dosel, lo que permitirá alcanzar un área foliar óptima, repercutiendo en un mayor crecimiento de las plantas y un mayor rendimiento al final del ciclo de cultivo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del jitomate

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta herbácea, arbustiva, dicotiledónea, perenne, cultivada como anual, de metabolismo C3 y doble juego de cromosomas con $2n= 24$ cromosomas, perteneciente a la familia *Solanaceae*, género *Solanum*, sección *Lycopersicon* (López, 2017; Heuvelink & Okello, 2018). Su centro de origen se sitúa en Sudamérica, donde existe la mayor diversidad genética y materiales silvestres. Sin embargo, a partir de la colonización de América, su lugar de domesticación se atribuye a México, donde fue introducido por parte de los españoles (Peralta et al., 2006).

El cultivo desarrolla un sistema radical compuesto por una raíz principal, algunas raíces secundarias y un gran número de raíces adventicias que se desarrollan en la base del tallo. Al haber alta humedad, la planta enraiza nuevamente desde los segmentos del tallo en posición horizontal (Argerich & Troilo, 2011; Heuvelink & Okello, 2018).

La planta desarrolla su tallo dependiendo del cultivar, dividiéndose en dos grandes categorías: cultivares de crecimiento determinado o definido y cultivares de crecimiento indeterminado o indefinido. En los de tipo determinado, el desarrollo del tallo principal, una vez que ha producido cierto número de inflorescencias laterales, detiene su crecimiento formando una inflorescencia terminal, alcanzando con frecuencia hasta los 2 m de altura, manteniendo generalmente un tamaño arbustivo. Los cultivares indeterminados poseen en su ápice un meristemo de crecimiento que produce un alargamiento continuo, pudiendo alcanzar longitudes de hasta 10 metros. Las primeras inflorescencias aparecen de la sexta a la novena hoja y de ahí se producen de manera continua cada tres hojas (Argerich & Troilo, 2011).

Las hojas del jitomate son compuestas, imparipinadas, suaves, carnosas, pecioladas e irregularmente lobuladas con bordes dentados o lobulados, frecuentemente rizadas, aunque también pueden ser lisas. Se disponen sobre

los tallos alternadamente con una filotaxia de 2/5 en forma de espiral. Están densamente cubiertas por pelos glandulares los cuales le confieren su olor característico (Picken et al., 1986).

El tamaño foliar varía según su cultivar, posición y condiciones ambientales. Las dos o tres primeras hojas pueden ser pequeñas con pocos folíolos. Las siguientes, bajo condiciones de invernadero en cultivares comerciales, alcanzan típicamente los 50 cm de largo, con un foliolo terminal grande y hasta ocho folíolos laterales grandes, que también pueden ser compuestos. En el raquis de la hoja se pueden intercalar muchos folíolos más pequeños con los grandes (Heuvelink & Okello, 2018).

Las hojas están conformadas por epidermis superior e inferior, las cuales sostienen los tejidos internos y no contienen cloroplastos. La epidermis del envés contiene abundantes estomas que facilitan el intercambio gaseoso, mientras que éstos son más escasos en el haz. El mesófilo en empalizada está formado por una o dos capas de células columnares vacuoladas muy compactas inmediatamente debajo de la epidermis del haz. Los cloroplastos se encuentran en el citoplasma de estas células, cerca de los espacios aéreos, lo que facilita el intercambio de gases. El mesófilo esponjoso, entre el parénquima de empalizada y la epidermis del envés, comprende tres o más capas de células vacuoladas más grandes, conectadas libremente en un complejo sistema de espacio aéreo, que contiene menos cloroplastos (Picken et al., 1986).

La flor del jitomate es hermafrodita, autocompatible, regular, hipógina, pedunculada, de color amarillo y forma corimbos axilares. El cáliz se forma por cinco sépalos. La corola cuenta con cinco pétalos dispuestos de forma helicoidal a intervalos de 1/5 en espiral con un número igual de estambres que se alternan con los pétalos y un ovario bilocular o plurilocular (Greyson & Sawhney, 1972; Aguilar, 2012).

Las anteras son bilobuladas y contienen varios cientos de granos de polen. El pistilo se encuentra constituido por un ovario de varios lóculos, generalmente de

cinco a nueve, pero puede haber hasta de dos lóculos. Posee una placenta carnosa central y un estilo largo que ejerce presión sobre las anteras próximas, de las que levemente sobresale y termina en un estigma achatado. Cuando el polen es liberado de las anteras, cae directamente sobre el estigma donde eventualmente germina (González, 1991; Chávez, 2013).

Las flores se agrupan en racimos y se encuentran unidas al eje floral por un pedicelo articulado que contiene la zona de abscisión (Nuez, 2001; Baquero et al., 2010). El número de flores depende del tipo de jitomate: por ejemplo, puede ir desde 4 a 6 flores por racimo en cultivares tipo arriñonado, hasta 100 flores en jitomates tipo “cherry” o de 2 a 7 en tipo saladette (Aguilar, 2012).

La fecundación de los óvulos marca el inicio del crecimiento del fruto. El fruto de jitomate es una baya carnosa de color rojo a amarillo, cuyas formas más comunes son oblonga y redonda. La superficie puede ser lisa o surcada. El fruto está constituido por una parte carnosa (paredes del pericarpio y exocarpio) y la pulpa (tejido placentenario y semillas) (Picken et al., 1986; Chamarro, 1995).

Una buena fecundación es indispensable para tener frutos bien formados. Tanto el tamaño como el contenido de sólidos solubles del fruto depende de los fotoasimilados recibidos de las hojas. El tiempo necesario para que un ovario fecundado se desarrolle a un fruto maduro es de siete a nueve semanas, en función del cultivar, la posición del racimo y las condiciones ambientales (Picken et al., 1986; Chamarro, 1995).

El fruto de jitomate genera numerosas semillas de tamaño pequeño (3-5 mm de largo por 2-4 mm de ancho), discoidales o reniformes, aplastadas y pubescentes (Gómez, 2012) conformadas principalmente por el embrión, el endospermo y la testa. El embrión es la parte que dará origen a la plántula, está constituido por la yema apical, dos cotiledones, el hipocótilo y la radícula. El endospermo contiene reservas nutritivas necesarias para el desarrollo del embrión. La testa está formada por un tejido duro e impermeable (Heuvelink y Okello, 2018).

2.2 Importancia del cultivo bajo agricultura protegida

De acuerdo con el SIAP (2020), la agricultura protegida nacional ha presentado un aumento promedio de 3 mil ha anuales en los últimos 14 años. De esta manera, actualmente se cuentan por lo menos con 42 mil ha bajo este régimen de agricultura. Del total de la superficie, casi 26 mil ha son destinadas a la plantación de hortalizas, siendo jitomate el cultivo predominante, con el 70 % de ocupación de dicha superficie (Sánchez & Moreno, 2017).

El jitomate es considerado como la hortaliza de mayor importancia y valor económico a nivel mundial (Heuvelink et al., 2018; FAOSTAT, 2021). En el país, este cultivo representa uno de los mayores ingresos de divisas. De las cerca de 4.3 millones de t que se produjeron en 2019, el 42 % fue exportado, principalmente hacia Norteamérica, convirtiendo a México en el principal proveedor mundial de jitomate, con un aporte que llega a representar el 25 % del comercio global de esta hortaliza (FAOSTAT, 2019; SIAP, 2020).

Internamente, Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Zacatecas conforman el mayor núcleo productivo de jitomate en México, con alrededor de 25 mil ha cultivadas en conjunto y una producción cercana a 2 millones de t anuales, es decir, alrededor del 48 % de la producción nacional. Se estima que la actividad agrícola del jitomate genera alrededor de 400 mil empleos directos y cerca de un millón más indirectos, constituyéndola en uno de los subsectores socioeconómicos más relevantes en la agricultura mexicana (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, 2018; Celis, 2019).

En este contexto, la agricultura protegida es fundamental para el desarrollo actual y potencial del cultivo, debido a su importancia socioeconómica, permitiendo minimizar las restricciones y perjuicios causados por fenómenos meteorológicos al promover un mejor control ambiental, a la vez de garantizar tanto mejores rendimientos y productos de alta calidad y valor económico como el aumento de la rentabilidad económica por unidad de espacio y tiempo (Moreno et al., 2011; Sánchez & Moreno, 2017).

2.3 Sistema convencional de producción

El sistema de producción de jitomate en invernadero practicado comúnmente se basa en el uso de variedades de hábito indeterminado y es principalmente utilizado por productores del norte de Europa y América (Sánchez et al., 2014). En dicho sistema, las plántulas se producen en charolas de 200 cavidades y son trasplantadas a un suelo mejorado o a sustratos hidropónicos, a densidades de 2 a 3 plantas m⁻², conducidas a uno o dos tallos hasta más de 7 m de altura para cosechar de 15 a 20 racimos por planta en un ciclo de cultivo de 10 a 11 meses, cuyo periodo de cosecha tiende a durar entre 7 y 8 meses (Sánchez et al., 2014). Bajo este manejo, se puede alcanzar rendimientos de 400 a 500 t ha⁻¹ año⁻¹, aunque los costos de producción son muy elevados (Sánchez et al., 2014; Heuvelink et al., 2018).

En general, el sistema ocupa invernaderos de mediana a alta tecnología, de muy altos costos, y exige un estricto manejo técnico de las prácticas culturales tales como el bajado de plantas, el mantenimiento de un índice de área foliar constante y el control fitosanitario; todo ello derivado del ciclo de cultivo tan largo que se maneja (Sánchez et al., 2017b).

2.4 Sistema alternativo de producción

Debido a las desventajas presentadas en el sistema tradicional, investigadores del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo han desarrollado un sistema alternativo para la producción de jitomate en invernadero, con el que se pretende obtener un mayor rendimiento por área cultivada, lo que implicaría mayores ingresos económicos para productores con invernaderos menos equipados y con menos recursos que dependen en gran medida de esta actividad económica (Jorge & Sánchez, 2003).

El resultado de estos trabajos de investigación ha permitido generar y validar a escala comercial un paquete tecnológico de producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero, el cual está orientado a reducir el periodo de trasplante a fin de cosecha y aumentar la densidad de población con la finalidad

de obtener más ciclos de cultivo por año y así mayores rendimientos: consiste en manejar el cultivo de jitomate en dos fases, la fase de semillero y la fase final o de producción que va del trasplante a fin de la cosecha (Sánchez et al., 2012; Sánchez et al., 2017a; Ruiz, 2019).

La primera fase comprende la siembra, la germinación y el desarrollo de las plántulas, que permanecen en el semillero hasta los 45-60 días después de la siembra, lo que permite obtener plantas de mayor edad para realizar trasplantes tardíos. La fase final inicia desde el trasplante en el invernadero definitivo hasta el fin de la cosecha y tiene una duración de 100 a 110 días, la floración ocurre entre los 45 y 60 días después de la siembra y, durante ese periodo, se realiza el despunte de la yema terminal dejando una o dos hojas por encima de la tercera inflorescencia, manteniendo tres racimos por planta.

De esta forma, se reduce la altura de la planta a aproximadamente 1 m, lo que permite manejar altas densidades de población de hasta 10 a 12 plantas m^{-2} de superficie útil o 7 a 8 plantas m^{-2} de invernadero, según la distribución y el acomodo que se les otorgue. Finalmente, la cosecha comienza entre los 70 a 90 días después del trasplante y termina entre los 100 y 120, lo que permite al menos tres ciclos de producción por año con rendimientos que pueden alcanzar hasta 20 $kg m^{-2}$ de invernadero o 450-600 $t ha^{-1} año^{-1}$ (Sánchez & Corona, 1994; Sánchez & Ponce, 1998; Ucán et al., 2005; Sánchez et al., 2010).

2.5 Optimización del sistema alternativo

Pese a los notorios beneficios que implica el sistema alternativo, teóricamente, aún es posible optimizarlo para lograr siete u ocho ciclos de cultivo por año con rendimientos que eventualmente podrían alcanzar los 100 $kg m^{-2} año^{-1}$, es decir, 1000 $t ha^{-1} año^{-1}$, o incluso superiores. Lo anterior representaría beneficios económicos muy altos por unidad de superficie para los pequeños y medianos productores con invernaderos de mediana o baja tecnología.

Es de esta forma que se propone ahora realizar el sistema alternativo utilizando tres fases, en lugar de las dos manejadas normalmente. Las mencionadas tres fases para la optimización del sistema implicarían lo siguiente:

- Primera fase (fase de semillero). Se llevaría a cabo de la misma forma que con el sistema en dos fases siembra, germinación y desarrollo de la plántula, y tendría una duración de 45 días.
- Segunda fase (fase intermedia). Su principal importancia radica en acortar los ciclos de la fase final hasta 50 días, optimizando espacio y tiempo, lo que posibilitaría lograr siete ciclos de producción anuales. Para llevarla a cabo se necesitaría un espacio de invernadero adicional que tuviera un área equivalente al 25 % de la superficie de invernadero que ocuparía el cultivo en la fase final. La duración de la fase intermedia sería de otros 45 días, empezando con el trasplante a macetas de 15 cm de diámetro rellenas con un sustrato inerte. Las plantas se manejarían en hidroponía en el invernadero adicional a una densidad de 30 plantas m⁻².
- Tercera fase (fase final). Pasados los 45 días de la fase intermedia, a los 90 días después de la siembra, las plantas junto a sus respectivas macetas se reubicarían en un invernadero más grande para dar una densidad final de 8 plantas m² de invernadero, donde permanecerían otros 45 a 50 días después de la reubicación, hasta el final de la cosecha.

Derivado de la información recopilada sobre el sistema de producción a tres racimos y alta densidad, está demostrado que es posible realizar un manejo eficiente de la fase inicial en semillero y de la fase final. Sin embargo, la fase intermedia, que es la adición fundamental para optimizar el sistema y reducir la duración de la fase final, presenta la problemática de la alta densidad de plantas, lo cual podría incidir perjudicialmente, sobre todo en los últimos días previos al inicio de la tercera fase.

2.6 Problemática de la fase intermedia

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, floración temprana en detrimento del desarrollo foliar y órganos de almacenamiento, 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 & Whitelam, 2007)

Al inicio de la segunda fase, la densidad de 30 plantas m^2 no debería representar ningún problema; sin embargo, debido al continuo crecimiento del área foliar, puede ser estresante para las plantas hacia el final de esta segunda fase como consecuencia del sombreado mutuo y el alto índice de área foliar que puede sobrepasar sus condiciones óptimas (Heuvelink et al., 2018).

De acuerdo con diversos autores, a medida que el índice de área foliar aumenta, las hojas inferiores del cultivo son más sombreadas, lo que provoca una menor tasa fotosintética y menor producción de fotosintatos, ocasionando las mencionadas alteraciones morfogénicas que impactan negativamente en el rendimiento final (Camacho et al., 1995; Wien, 1999; Taiz & Zeiger, 2002; Higuchi & Hisamatsu, 2016; Jishi, 2018).

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).

2.7 El empleo de los sistemas escaleriformes hacia la optimización del sistema alternativo

Para buscar una solución al sombreado entre plantas e incrementar los rendimientos por unidad de superficie, se han realizado experimentos para comprobar que es posible distribuir homogéneamente la radiación solar sobre las hileras centrales de plantas mediante su acomodo a diferentes niveles o alturas, generando un dosel en forma de escalera y se ha logrado con ello una distribución homogénea de la radiación fotosintéticamente activa entre las distintas hojas que conforman el dosel (Méndez et al., 2005; Sánchez et al., 2009; Sánchez et al., 2010; Sánchez et al., 2014; Sánchez et al., 2017a).

A grandes rasgos, el sistema de producción con doseles escaleriformes se basa en implementar diferentes disposiciones, principalmente verticales, de plantas para fomentar que éstas reciban luz en mayor cantidad y mejor calidad, especialmente en las partes inferiores e intermedias del dosel, incrementando la producción de fotoasimilados que posteriormente repercutirán sobre el rendimiento final (Bastida, 2012; Sánchez et al., 2014; Sánchez et al., 2017a).

Para el caso específico de producción de jitomate en arreglos de dosel escaleriforme, se han encontrado altos rendimientos, los cuales se han adjudicado a un uso más eficiente de la radiación incidente en el dosel (Méndez et al., 2005; Vázquez et al., 2007; Sánchez et al., 2009; Sánchez et al., 2010; Sánchez et al., 2014; Sánchez et al., 2017a).

Al ser comparados contra doseles uniformes, resulta una constante que la menor cantidad de frutos por planta se obtiene de los doseles uniformes, lo que se ha explicado en relación a que los arreglos escaleriformes reciben una distribución más homogénea de la luz en las hojas del dosel, en tanto que, en las hileras de plantas con disposición uniforme, la radiación solar es casi totalmente interceptada por las hojas superiores debido a que sus plantas se encuentran en competencia completa y alta densidad de población (Heuvelink & Dorais, 2005; Ucán et al., 2005; Sánchez et al., 2014; Sánchez et al., 2017a).

Teniendo en cuenta las referencias anteriores, se considera importante evaluar los efectos que puede tener la implementación de doseles escaleriformes para aminorar los efectos de una densidad de población tan alta como la propuesta para la fase intermedia (30 plantas m⁻²) en aras de optimizar el sistema de producción a tres racimos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó del 4 de marzo al 17 de julio del 2021 en el Campo Agrícola Experimental perteneciente al Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, localizado en las coordenadas 19° 29' 34.54" N y 98° 52' 20.73" O a 2,270 metros sobre el nivel del mar, en un clima templado subhúmedo (Cw) según Köppen (Briggs et al., 2003), con una temperatura media anual de 15.9° C y una precipitación promedio de 686.0 mm por año (Reina, 2020).

Se planteó un sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta dividido en tres fases de cultivo:

- Fase de semillero
- Fase intermedia de alta densidad
- Fase final

3.1. Fase de semillero

Comprendió el periodo de la siembra de la semilla hasta el trasplante de las plántulas. El invernadero o semillero utilizado durante esta primera fase estaba conformado por una nave tipo capilla de dos aguas, de 30 m de largo por 11 m de ancho, altura máxima de 5.5 m en orientación norte-sur (Figuras 1 y 2).

El invernadero contaba con una cubierta de polietileno térmico calibre 720 con 80% de transmisión de luz, cortinas del mismo material y ventanas protegidas por una malla antiáfidos de 40 x 25 hilos por pulgada cuadrada, con un área de ventilación total de 32 % respecto al área cubierta.

En el interior del invernadero se procuró mantener temperaturas diurnas entre 20 y 30 °C y nocturnas entre 10 y 16 °C, con una humedad relativa de 50 a 70% durante el día.



Figura 1. Vista externa del invernadero utilizado en la fase de semillero.



Figura 2. Vista interna del invernadero utilizado en la fase de semillero.

El control de las condiciones ambientales fue posible mediante la apertura y cierre de ventanas, así como el empleo de un sistema de calefacción

automático de combustión directa de gas LP *Dragonfire* con 250,000 BTU de capacidad y un sistema de muro húmedo hecho de paneles de fibra de celulosa (9.8 m de largo por 2 m de alto) y dos extractores de aire, ubicados en el lado apuesto del muro, accionados con motores de 1.5 HP de potencia y un caudal de 44,000 m³ h⁻¹. El piso del invernadero estaba cubierto con tela blanca de polipropileno (“ground cover”) para tener mejores condiciones sanitarias al interior, así como una mejor difusión de la luz incidente.

Se utilizaron semillas del cultivar Buena Vista (XTM11227), de tipo saladette y hábito de crecimiento determinado de la empresa Sakata, el cual se caracteriza por producir plantas con racimos de entre 6 a 7 frutos, de color rojo intenso que conservan la homogeneidad en tamaños grandes y maduración uniforme (<https://www.sakata.com.mx/>). Se considera resistente al cáncer del tallo por *Alternaria*, marchitez por *Fusarium* y *Verticillium*, nemátodos, virus del bronceado del tomate y virus de la hoja de la cuchara amarilla del tomate (Figura 3).



Figura 3. Material vegetal utilizado.

Para la siembra se emplearon charolas de polietileno de 60 cavidades (de seis hileras a lo ancho por 10 a lo largo cada una, con una separación de 5.8 cm entre cavidades) con capacidad volumétrica de 200 mm³ por cada cavidad (Figura 4). Las charolas fueron previamente lavadas con agua y desinfectadas con sales cuaternarias de amonio (Anibac® Plus al 45%). Como sustrato para esta fase, se utilizó turba vegetal y perlita en proporción volumétrica 1:1, agregándose superficialmente una capa de aproximadamente 0.5 cm de espesor de vermiculita para cubrir la semilla.



Figura 4. Charolas de 60 cavidades utilizadas en semillero.

Durante esta fase, se probaron dos tratamientos: plantas con paclobutrazol y sin paclobutrazol. Para el caso del tratamiento con PBZ se hicieron dos aplicaciones a los 22 y 38 dds, utilizando el producto Cultar® 25 SC, a una concentración de 50 mg L⁻¹. La aplicación se hizo con el apoyo de una mochila aspersor y una cortina móvil de polietileno para evitar que las plántulas sin PBZ fueran contaminadas con el producto (Figura 5).



Figura 5. Aplicación de paclobutrazol.

La solución nutritiva empleada para irrigar durante la fase de semillero fue al 50% de la que propone Sánchez et al. (2014) cuya concentración de nutrimentos en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ fue: Nitrógeno= 200, Fósforo= 50, Potasio= 200, Calcio= 250, Magnesio= 50, Azufre= 150, Hierro= 2, Manganeso= 1, Boro= 0.5, Cobre= 0.1 y Zinc= 0.1. Como fuentes fertilizantes se emplearon nitrato de calcio, ácido fosfórico al 85 %, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato ferroso, sulfato de manganeso, tetraborato de sodio, sulfato de cobre y sulfato de zinc.

El diseño experimental fue bloques completos al azar con doce repeticiones por Tratamiento, y unidad experimental de 32 plántulas. A los 45 dds, se tomaron dos plantas representativas por cada repetición y se midieron, en el Laboratorio de Ecología del Departamento de Fitotecnia (Figura 6), las variables morfológicas siguientes:

- a) Altura de plántula (cm): desde la base del tallo hasta el meristemo apical, con el apoyo de un flexómetro.

- b) Diámetro del tallo (mm): a la altura del entrenudo de la tercera y cuarta hoja, con un vernier electrónico.
- c) Área foliar por plántula (cm²): determinado directamente en un integrador de área foliar (LI-3100C, LI-COR®, EUA).
- d) Peso seco total por plántula (g): las mismas plántulas seleccionadas fueron colocadas dentro de bolsas de papel y posteriormente secadas en una estufa de aire forzado (FE-291, Felisa®, México) a 70 °C durante 72 h; el peso se determinó con una balanza analítica.
- e) Razón de área foliar: se obtuvo al dividir en cm² el área foliar entre los gramos de peso seco total.



Figura 6. Toma de datos en laboratorio de plantas representativas.

3.2. Fase intermedia de alta densidad

A los 46 dds, las plántulas fueron trasplantadas a bolsas de polietileno rellenas de tezontle, y ubicadas, desde los 45 y hasta los 90 dds, en un segundo invernadero con características similares al del semillero (Figuras 7 y 8).



Figura 7. Vista externa del invernadero utilizado en la fase intermedia.

En este invernadero, el muro húmedo estaba conformado por paneles de celulosa (28 m de largo por 2.6 de alto) y tres extractores (uno por cada nave) accionados con motores de 1.5 HP y capacidad de desplazamiento del aire $40,900 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

También contaba con tres calentadores de gas LP *Dragonfire*; sin embargo, éstos no se utilizaron debido a que las temperaturas internas se mantuvieron sobre el límite mínimo requerido por el cultivo ($>10^\circ \text{ C}$).



Figura 8. Vista interior del invernadero utilizado desde la fase intermedia.

Las bolsas en las que se hizo el trasplante eran de color negro de 120 micras de grosor de 35 cm de alto y 15 cm de diámetro (5 L de capacidad), las cuales fueron pintadas de blanco en su costado exterior buscando aumentar la luz difusa y evitar que se elevara la temperatura en el área de la raíz.

Las partículas de tezontle con que fueron rellenas las bolsas tenían un diámetro entre 1 y 3 mm. Previo al trasplante, se instaló un sistema de riego a base de cintilla con goteros integrados a cada 15 cm.

El volumen de riego diario, con la mencionada solución nutritiva propuesta por Sánchez et al. (2014) al 100 %, fue dosificado en función de las condiciones climáticas (intensidad de luz, temperatura y humedad relativa) y la etapa fenológica del cultivo, procurando que hubiera un sobrerriego del 20 % en cada riego para evitar la acumulación de sales en la rizósfera.

En esta etapa intermedia, se probaron siete tratamientos:

Tratamiento 1. Arreglo de las plantas para formar un dosel uniforme, utilizando plántulas sin aplicación de PBZ. Se formaron seis hileras de plantas, todas a la misma altura (Figura 9a).

Tratamiento 2. Arreglo de las plantas para formar un dosel uniforme, utilizando plántulas con aplicación de PBZ. Se formaron seis hileras de plantas, todas a la misma altura (Figura 9b).



Figura 9. Vista de arreglo de las plantas formando un dosel uniforme. a) Sin aplicación de PBZ y b) Con aplicación de PBZ.

Tratamiento 3. Arreglo de las plantas en un dosel en forma de escalera de dos escalones, utilizando plantas sin aplicación de PBZ. Se formaron seis hileras de plantas; las dos hileras centrales estuvieron elevadas 50 cm del nivel del piso, quedando dos hileras al nivel del piso en el lado oriente y dos en el lado poniente; formando así dos escalones (Figura 10a).



Figura 10. Vista del arreglo de las plantas formado un dosel en forma de escalera con dos escalones. a) Sin aplicación de PBZ y b) Con aplicación de PBZ.

Tratamiento 4. Arreglo de las plantas en un dosel en forma de escalera de dos escalones, utilizando plantas con aplicación de PBZ. Se formaron seis hileras de plantas; las dos hileras centrales estuvieron elevadas 50 cm del nivel del piso, quedando dos hileras al nivel del piso en el lado oriente y dos en el lado poniente; formando así dos escalones (Figura 10b).

Tratamiento 5. Arreglo de las plantas en un dosel en forma de escalera, con tres escalones, sin aplicación de PBZ. Se formaron seis hileras de plantas; en este caso, las dos hileras centrales se ubicaron en la parte más alta, seguidas por dos hileras en el lado oriente, y dos en el lado poniente, cada hilera ubicada a 50 cm de diferencia entre hileras contiguas, formando así, tres escalones (Figura 11a).



Figura 11. Vista del arreglo de plantas formando un dosel en forma de escalera, con tres escalones. a) Sin aplicación de PBZ y b) Con aplicación de PBZ.

Tratamiento 6. Arreglo de las plantas en un dosel en forma de escalera, con tres escalones, con aplicación de PBZ. Se formaron seis hileras de plantas; en este caso, las dos hileras centrales se ubicaron en la parte más alta, seguidas por dos hileras en el lado oriente, y dos en el lado poniente, cada hilera ubicada a 50 cm de diferencia entre hileras contiguas, formando así, tres escalones (Figura 11b).

Tratamiento 7 (Testigo absoluto de dos fases). Formado por tres hileras de plantas sin PBZ y trasplantadas directamente a una fase final en cama de siembra como suele hacerse en el sistema de manejo a tres racimos por planta en alta densidad y dos fases de cultivo (Figura 12).



Figura 12. Vista del arreglo de las plantas en el Testigo absoluto.

En los primeros seis tratamientos, el marco de plantación fue de 15 cm entre plantas y 16.7 cm entre hileras. Cada seis hileras de plantas se dejó un pasillo de 50 cm de ancho entre camas, lo que resultó en una densidad de población de 30 plantas m^{-2} . Para el testigo absoluto con trasplante a camas, el marco de plantación fue de 25 cm entre plantas y 25 cm entre hileras, es decir 12 plantas m^{-2} útil (8 plantas m^{-2} de invernadero).

En todos los tratamientos las hileras de plantas mantuvieron una orientación norte-sur.

Durante esta etapa del desarrollo del cultivo, se empezaron a desarrollar brotes laterales, mismos que fueron eliminados conforme aparecieron hasta que concluyó el ciclo.

A los 52 dds, se comenzó con la labor de tutoreo individual de las plantas, la cual consistió en encajar en el sustrato de las bolsas de cultivo, un alambrcn de 1 m de largo y sostener de él, mediante abrazaderas plásticas, el tallo de la

planta. Aproximadamente a los 70 dds, momento en que fue visible la tercera inflorescencia, se hizo despunte mediante la eliminación del ápice principal de la planta, dejando solamente una hoja por encima de dicha inflorescencia.

En esta etapa se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental constó de 24 plantas.

A los 75 dds se midieron las mismas variables consideradas en la primera fase.

3.3. Fase final

A los 91 dds se reubicaron las plantas de los primeros seis tratamientos en el invernadero para ajustar su densidad a solamente 8 plantas m⁻² de invernadero, colocándolas junto a las bolsas en juegos de tres hileras con separación de 33 cm entre hileras y 20 cm entre plantas. Todas las plantas fueron colocadas a la misma altura conformando un dosel uniforme.

Aquí el diseño experimental fue también en bloques al azar con cuatro repeticiones por tratamiento, pero la unidad experimental constó de 12 plantas (Figura 13).

Durante esta etapa, que duró hasta de los 91 a los 135 dds, conforme los frutos iban madurando se llevó a cabo la cosecha en seis cortes diferentes, en los cuales se registraron el número de frutos cosechados y su peso en gramos, de tal manera que, al final del experimento, fue posible calcular el peso medio de frutos, y su rendimiento por racimo, planta, hilera y unidad de superficie.

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), para lo cual se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis System versión 9.1 (SAS Institute, 2002).



Figura 13. Vista del acomodo de las plantas en la fase final.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variables evaluadas a los 45 dds (fase de semillero)

Los tratamientos de aplicación de PBZ en la fase de semillero se efectuaron con la idea de que se formaran plantas menos altas y con menor área foliar para favorecer su tolerancia a los posibles efectos de la alta densidad de población temporal a la que fueron sometidas durante la fase intermedia. Se esperaba también que al final del ciclo esta situación pudiera redundar en plantas con mayor rendimiento de fruto en relación con las plantas que no recibieron aplicación y que, por lo tanto, resienten más los efectos negativos de la alta densidad temporal a la que fueron sometidas. Más adelante se van discutiendo los detalles que resultaron de estas aplicaciones. El análisis de varianza que se muestra en el Cuadro 1, muestra que, a los 45 dds, hubo diferencias en el crecimiento de las plántulas a las que se les aplicó PBZ en comparación con las que crecieron sin aplicación de dicho regulador, esto para todas las variables evaluadas, excepto en el grosor del tallo. Las comparaciones de medias (Cuadro 2) muestran que las plántulas con aplicaciones de PBZ tuvieron una altura 50 %, un área foliar por planta 40 %, una razón de área foliar 22 % y un peso seco 20 % menores a las plantas sin aplicación de este producto, diferencias que fueron estadísticamente significativas. En grosor de tallo, no hubo diferencias.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento en plántulas de jitomate a los 45 días después de la siembra.

Fuente de variación	Grados de libertad	Altura (cm)	Grosor de tallo (mm)	Área foliar por planta (cm ²)	Razón de área foliar (cm ² /g)	Peso seco total (g)
Bloque	11	1.5	0.1	83.1	31.9	0.007
Tratamientos	1	934**	0.3	13,309**	3489**	0.3*
Error	11	1.6	0.1	196.8	62.8	0.02
Coefficiente de variación (%)		6.2	10.5	14.2	8.2	15.2
Media		20.2	3.0	98.7	95.7	1.1

*: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$) **: Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$).

Cuadro 2. Comparaciones de medias a los 45 días después de la siembra para variables de crecimiento en plántulas de jitomate sin y con dos aplicaciones de paclobutrazol a los 22 y 38 días después de la siembra.

Tratamiento	Altura (cm)	Grosor de tallo (mm)	Área foliar por planta (cm ²)	Razón de área foliar (cm ² /g)	Peso seco total (g)
-Plántulas sin paclobutrazol	26.5 a	3.1 a	122.3 a	107.7 a	1.2 a
-Plántulas con paclobutrazol	14.0 b	2.9 a	75.2 b	83.6 b	1.0 b
DMSH	1.1	0.3	12.6	7.1	0.1

Valores con distinta letra dentro de una misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta.

Se ha encontrado que las aplicaciones de paclobutrazol pueden generar plantas con entrenudos cortos (Brigard et al., 2006) y hojas más pequeñas (Seleguini et al., 2013). Jankiewicz (2003) y Xia et al. (2018) indicaron que el PBZ es un retardante del crecimiento del grupo de los triazoles que inhibe la actividad de la entkaureno-oxidasa, una enzima en la ruta biosintética de giberelinas, cuyo efecto principal es la reducción de la altura de las plantas, respuesta que puede variar según la concentración, el método de aplicación y el estado fenológico de la planta (Peng et al., 2014; Wang et al., 2014).

Particularmente en plántulas de jitomate, Moreno et al. (2021) encontraron que las aplicaciones de paclobutrazol redujeron en 9.4 cm la altura de las plántulas respecto al testigo sin aplicación, efecto que fue mayor con tres aplicaciones de 50 ppm de ingrediente activo. Cabe señalar que el PBZ es absorbido por las hojas, translocándose hasta los puntos de crecimiento donde inhibe la producción de giberelinas al impedirse la oxidación del kaureno a ácido

kareurenóico, disminuyendo la tasa de división y expansión celular, y consecuentemente el crecimiento (Rademacher, 2000), lo que explica los resultados obtenidos en el presente estudio.

4.2. Variables evaluadas a los 75 dds (fase intermedia)

A los 75 dds, cuando las plantas habían permanecido 30 días en la fase intermedia a una densidad de 30 plantas m⁻², se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos para todas las variables evaluadas, como se muestra en el análisis de varianza (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento en plantas de jitomate durante la fase intermedia (75 días después de la siembra).

Fuente de variación	Grados de libertad	Altura (cm)	Grosor (mm)	Índice de área foliar (m ²)	Razón de área foliar (cm ² g ⁻¹)	Peso seco total (g)
Bloque	3	20.8	0.2	0.04	368	0.9
Tratamientos	6	809**	2.7**	0.9**	6576**	11.1**
Error	18	6.5	0.3	0.03	332	0.8
Coefficiente de variación (%)		6.5	7.6	13.3	18.2	16.2
Media		39.1	7.2	1.3	99.8	5.5 (g)

** : Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$).

Cuadro 4. Comparaciones de medias para variables de crecimiento en plantas de jitomate durante la etapa intermedia (75 días después de la siembra).

Tratamientos	Altura (cm)	Grosor (mm)	Índice de área foliar (m ² /m ²)	Razón de área foliar (cm ² /g)	Peso seco total (g)
-Uniforme sin PBZ	53.0 a	7.2 abc	1.6 a	98 b	5.7 bc
-Uniforme con PBZ	21.8 b	8.4 a	1.0 b	83 bc	4.1 cd
-Escalera sin PBZ de dos pisos	49.6 a	6.6 bc	1.9 a	183 a	3.6 d
-Escalera con PBZ de dos pisos	25.7 b	7.0 bc	1.0 b	51 c	6.9 ab
-Escalera sin PBZ de tres pisos	50.6 a	6.0 c	1.8 a	102 b	5.9 bc
-Escalera con PBZ de tres pisos	24.5 b	7.1 abc	1.0 a	85 bc	4.1 cd
-Testigo absoluto sin PBZ	48.5 a	8.0 a	0.6 b	97 b	8.2 a
DMSH	5.9	1.4	0.4	42.6	2.1 (g)

Valores con distinta letra dentro de una misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). PBZ: paclobutrazol. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta.

Al analizar la prueba de comparaciones de medias (Cuadro 4) sobresalen los siguientes resultados:

- a) La altura de las plantas y el índice de área foliar estuvieron fuertemente influenciadas por la aplicación de PBZ en la etapa de semillero, con una disminución significativa en sus valores, respecto a las plantas sin aplicaciones de dicho retardador; esto independientemente del arreglo de las plantas. Esta disminución en altura de planta a los 75 dds fue de aproximadamente un 50 %.
- b) Es conveniente aclarar que el Testigo absoluto no estuvo sometido a una fase intermedia por lo que su IAF no fue calculado con base en 30 plantas m⁻² como se hizo en los demás tratamientos, sino que se hizo a 8

plantas m^{-2} , debido a ello se encuentra entre los tratamientos con valores más bajos; sin embargo, su área foliar por planta a los 75 dds resultó ser la mayor (750 cm^2).

- c) El IAF de todos los tratamientos a la mitad de la fase intermedia (75 dds) resultó más bajo de lo que se esperaba (menos de 2), sobre todo en los tratamientos donde se aplicó PBZ. En consecuencia, a esta edad todavía no se daba un efecto importante de competencia, lo que parece favorable para el manejo del sistema de producción que se busca implementar aún sin aplicar el PBZ.

A este resultado pudo contribuir el que la variedad utilizada fue de hábito determinado y también a que el volumen del contenedor (menos de 5 L) con arena de tezontle pudo ser limitante para un buen crecimiento y desarrollo de la raíz, afectando también el crecimiento de las hojas. Al respecto se sugiere hacer un experimento complementario con diferentes volúmenes de contenedor e incluso con otras variedades, incluyendo algunas de hábito indeterminado.

- d) En grosor del tallo, no hubo un efecto claro del PBZ ni del arreglo de las plantas, pero se observa una tendencia a mayor grosor en los tratamientos donde se aplicó el PBZ.
- e) El tratamiento de dosel escaleriforme de dos escalones y sin aplicaciones de PBZ, tuvo significativamente mayor razón de área foliar, pero exhibió el menor peso seco total.

- f) Finalmente, el mayor peso seco lo obtuvo el Testigo absoluto sin fase intermedia, lo cual se explica porque con este tratamiento se logró al mismo tiempo mayor altura, mayor grosor de tallo y mayor área foliar.

Investigaciones como las de Wang et al. (2015), Xu et al. (2017) y Moreno et al. (2021), sostienen que las aplicaciones de PBZ, a la vez que reducen la altura de las plantas, aumentan el diámetro de su tallo, esto debido a que los fotoasimilados que no pueden ser utilizados en el crecimiento de los ápices son redistribuidos en otras estructuras de las plantas (Cai et al., 2014; Novacek et al., 2013). Sin embargo, en el presente trabajo, aunque si hubo disminución en altura de planta, no se observó ningún efecto marcado sobre el grosor de tallo.

El menor peso seco en el Tratamiento 3, se puede explicar por su bajo grosor de tallo y alto valor de razón de área foliar, ya que fue uno de los tratamientos con más altura de planta. Se podría considerar que el espaciamiento entre plantas haya sido insuficiente para garantizar las condiciones adecuadas para el desarrollo de las plantas, principalmente en cuanto a cantidad y calidad de luz, ya que autores como Taiz y Zeiger (2002) y Gardner et al. (2017), mencionaron que cuando las plantas crecen en condiciones de baja radiación fotosintéticamente activa tienden a crecer más en área, pero presentar un limbo foliar de menor grosor, es decir, tienen menos capas de células. Por otra parte, en aquellas plantas desarrolladas en mejores condiciones fotosintéticas, las hojas son más gruesas y de menor superficie, lo que les permite tener un mayor peso foliar en un área foliar menor (Nangare et al., 2015; Shahak et al., 2004).

No obstante, el área foliar por planta a los 75 dds en todos los tratamientos fueron bajos para un cultivo como el jitomate (menos de 800 cm²); por ejemplo, Sánchez (1994), trabajando con el cultivar Humaya, indeterminado de tipo bola, encontró valores tan altos como 2000 cm² por planta a esa misma edad de 75 dds.

Como ya se mencionó seguramente hubo otros factores, como el hábito determinado de la variedad, así como poco volumen de sustrato para un adecuado desarrollo de la raíz, lo que hizo que en general el crecimiento de las plantas en esta etapa fuera escaso (Jones, 2005; Sonneveld & Voogt, 2009).

Los mayores valores en área foliar, grosor de tallo y peso seco en las plantas del Testigo absoluto en dos fases, seguramente fueron efecto de una menor densidad de plantas, ya que todos los demás tratamientos estuvieron compuestos por seis hileras de plantas, mientras que en dicho Testigo hubo únicamente tres, por lo que estuvieron en mejores condiciones para recibir luz solar.

Al respecto, Reghin et al. (2006) han mencionado que, en jitomate, a densidades poblacionales más bajas hay una mayor intercepción de radiación solar por planta, resultando en una mayor tasa de producción de fotoasimilados, lo cual afecta favorablemente su crecimiento y desarrollo en etapas tempranas.

4.3. Variables evaluadas a los 90 dds (final de la fase intermedia)

A los 90 dds, también se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para todas las variables del crecimiento evaluadas (Cuadros 5 y 6).

Las plantas con menor altura y menor índice de área foliar en etapa intermedia por efecto de la aplicación de paclobutrazol en etapa de plántula, continuaron siendo las de menor valor a los 90 dds, mientras que las plantas del tratamiento Testigo absoluto mantuvieron su mayor altura, índice de área foliar y peso seco.

Se observa que los 15 días finales de la fase intermedia (de los 75 a los 90 dds) las plantas siguieron creciendo en altura de manera importante. Por ejemplo, la altura de las plantas en los tratamientos sin PBZ, se incrementó en promedio 15 cm, mientras que en las que se aplicó dicho producto, el incremento fue de aproximadamente 8 cm.

Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables de crecimiento en plantas de jitomate al final de la fase intermedia (90 días después de la siembra).

Fuente de variación	Grados de libertad	Altura (cm)	Grosor (mm)	Índice de área foliar (m ²)	Razón de área foliar (cm ² /g)	Peso seco total (g)
Bloque	3	172.2	7.2	0.02	225.5	3.5
Tratamientos	6	1546.6**	7.6	0.3**	159.2**	111.0**
Error	18	70.6	9.4	0.03	35.7	4.0
Coefficiente de variación (%)		15.7	18.0	11.5	9.3	12.0
Media		53.4	17.0	1.5	64.2	16.6 (g)

** : Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$)

Cuadro 6. Comparaciones de medias para variables de crecimiento en plantas de jitomate al final de la fase intermedia (90 días después de la siembra).

Tratamientos	Altura (cm)	Grosor (mm)	Índice de área foliar (cm ²)	Razón de área foliar (cm ² /g)	Peso seco total (g)
-Uniforme sin PBZ	68.1 a	18.1 a	1.8 ab	72.1 ab	15.5 bc
-Uniforme con PBZ	30.3 b	16.0 a	1.2 c	60.7 abc	12.9 c
-Escalera sin PBZ de dos pisos	66.8 a	16.3 a	1.7 ab	73.7 a	14.9 bc
-Escalera con PBZ de dos pisos	35.2 b	18.4 a	1.2 c	58.0 c	14.0 c
-Escalera sin PBZ de tres pisos	69.7 a	18.5 a	1.8 a	58.9 bc	19.4 b
-Escalera con PBZ de tres pisos	32.0 b	16.9 a	1.2 c	64.3 abc	12.0 c
-Testigo absoluto sin PBZ	71.7 a	14.8 a	1.3 bc	61.5 abc	27.2 a
DMSH	19.6	7.1	0.4	13.9	4.7 (g)

Valores con distinta letra dentro de una misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta.

En cuanto al grosor del tallo, se registró una tendencia hacia su homogenización, lo que podría indicar que, a los 90 dds, los efectos del PBZ dejaron de ser perceptibles sobre dicha variable, siendo a los 75 dds cuando más notoria fue su influencia al realizar una comparación entre todas las mediciones realizadas. El IAF apenas aumentó un poco en la mayoría de los tratamientos, excepto en el testigo absoluto donde el incremento fue mayor. De lo anterior se deriva que no hubo una restricción al crecimiento de las plantas por la alta densidad a la que se manejó esta fase intermedia. Por ejemplo, Heuvelink et al., (2018) indican que el IAF óptimo para máxima productividad en un dosel maduro de plantas de jitomate se ubica entre 3 y 4, valor que ni el testigo en dos fases alcanzó. Esto debido quizá a un fuerte hábito determinado de la variedad evaluada.

Los resultados sobre la altura de planta concuerdan con lo señalado por Flores et al., (2016), Ferreira et al., (2017) y Ramos et al., (2021), quienes encontraron que el PBZ ejerce su efecto provocando plantas más compactas y con menor competencia entre ellas, facilitando su manejo y cosecha por la menor altura.

Por otra parte, se ha reportado que, el PBZ, además de retardar el crecimiento vegetativo (menor altura), reduce la distancia de entrenudos (Wang et al., 2014; Ramírez, 2021), permitiendo una mayor densidad de raíces y un mayor peso foliar debido a un mayor grosor de las hojas (Campos et al., 2014; França et al., 2018; Gollagi et al., 2019).

Los mayores valores en altura, grosor de tallo, IAF y peso seco por planta de las plantas del tratamiento de Testigo absoluto en dos fases de cultivo sobre el resto de los tratamientos podría ser explicado por observaciones como las indicadas por Sánchez et al. (2012) y Hernández et al. (2018) quienes han señalado que las raíces del tomate crecen de diferente manera dependiendo del volumen del sustrato en el que son establecidas, ya que se considera que la limitación de espacio para el desarrollo de las raíces provoca un desarrollo radical corto y ramificado, así como una menor producción y translocación de citocininas que son reguladores de crecimiento necesarios en los procesos de división celular en la parte aérea de la planta, ocasionándose así un menor desarrollo vegetativo.

Galicia (2020) identificó que estas limitaciones en el espacio de desarrollo radical no sólo inciden en el desarrollo vegetativo de las plantas, sino también pueden afectar el peso y número de frutos.

4.4. Análisis del rendimiento y sus componentes

Se hicieron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias para el número y peso medio de frutos, tanto por racimo como por planta (Cuadros 7 a 10). Los análisis de varianza entre tratamientos indicaron que hubo diferencias altamente significativas en el número total de frutos, aunque con coeficientes de variación altos (Cuadro 7). Respecto al peso se encontraron diferencias entre tratamientos para el peso del racimo 1, peso del racimo 2 y peso total de frutos por planta (Cuadro 8).

De acuerdo con las comparaciones de medias, no hubo diferencias en número de frutos por racimo, pero sí en el número total de frutos por planta, encontrándose que con el Tratamiento 7 (Testigo absoluto) tuvieron dos frutos más que con los tratamientos de dosel escaleriforme de dos pisos sin y con PBZ, y de tres pisos con PBZ, diferencias que fueron significativas (Cuadros 9 y 10), lo que condujo a que con el Testigo también se lograra el mayor peso de fruto por planta, en este caso con diferencias significativas comparado con los demás tratamientos. Desafortunadamente, el número de frutos por racimo y por planta en general fue bajo, lo que condujo a rendimientos menores a un kilogramo por planta ($951 \text{ g planta}^{-1}$ en el Testigo absoluto, que fue el rendimiento más alto de todos los tratamientos, equivalente a 7.6 kg^{-2}).

En otros trabajos experimentales a tres racimos por planta se han reportado rendimientos de 1.5 a $2.5 \text{ kg planta}^{-1}$ con otros cultivares de tipo saladette (Sánchez et al., 2017b; Moreno et al., 2021; Sánchez et al., 2021).

Este resultado es explicado debido al bajo índice de área foliar formado, ya que, de acuerdo con varios autores (Fischer & Pérez, 2012; Sánchez & Moreno, 2017; Heuvelink et al., 2018), en jitomate el IAF óptimo para una máxima fotosíntesis y alto rendimiento se encuentra entre 3 y 4, mientras que el IAF formado en el presente experimento fue mucho menor. Aun así, dado que se podrían lograr hasta 7 ciclos de cultivo al año, potencialmente sería factible un rendimiento anual de más de 500 t ha⁻¹ año⁻¹, que es mayor a lo que normalmente se obtiene con los sistemas convencionales.

Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza para el número de frutos entre tratamientos al final de la cosecha.

Fuente de variación	Grados de libertad	Frutos del racimo 1	Frutos del racimo 2	Frutos del racimo 3	Frutos/planta
Bloque	23	1.6	2.1	1.3	4.9
Tratamientos	6	2.6	3.6	0.9	16.0**
Error	138	1.5	2.0	1.6	4.5
Coeficiente de variación (%)		76.5	54.3	50.5	30.7
Media		1.6	2.6	2.5	6.9

** : Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$)

Cuadro 8. Cuadrados medios del análisis de varianza para el peso de frutos entre Tratamientos al final de la cosecha.

Fuente de variación	Grados de libertad	Frutos del racimo 1	Frutos del racimo 2	Frutos del racimo 3	Peso de fruto/planta
Bloque	23	19407.0	24289.8	14934.7	67080.7
Tratamientos	6	33655.2*	71692.6*	24861.3	327200.5**
Error	138	15668.9	28831.9	19562.0	53837.9
Coeficiente de variación (%)		74.8	59.7	53.7	32.6
Media		167.2	284.0	260.1	711.3

*: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$) y **: Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$).

Cuadro 9. Comparaciones de medias para el número de frutos entre Tratamientos al final de la cosecha.

Tratamientos	Frutos del racimo 1	Frutos del racimo 2	Frutos del racimo 3	Frutos/planta
-Uniforme sin PBZ	1.6 a	2.6 a	2.6 a	6.9 ab
-Uniforme con PBZ	1.9 a	2.6 a	2.7 a	7.2 ab
-Escalera sin PBZ de dos pisos	1.3 a	2.7 a	2.4 a	6.5 b
-Escalera con PBZ de dos pisos	2.0 a	2.7 a	2.5 a	7.4 ab
-Escalera sin PBZ de tres pisos	1.2 a	2.3 a	2.3 a	5.9 b
-Escalera con PBZ de tres pisos	1.6 a	2.2 a	2.4 a	6.2 b
-Testigo absoluto sin PBZ	2.0 a	3.4 a	2.9 a	8.3 a
DMSH	1.0	1.2	1.1	1.8

Valores con distinta letra dentro de una misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta.

Cuadro 10. Comparaciones de medias para el peso de frutos entre tratamientos al final de la cosecha.

Tratamientos	Peso de frutos del racimo 1	Peso de frutos del racimo 2	Peso de frutos del racimo 3	Peso de frutos/planta (g)
-Uniforme sin PBZ	152.9 ab	268.6 ab	253.2 a	674.9 b
-Uniforme con PBZ	180.6 ab	254.7 ab	256.0 a	691.4 b
-Escalera sin PBZ de dos pisos	139.3 ab	297.7 ab	251.3 a	688.3 b
-Escalera con PBZ de dos pisos	195.1 ab	292.2 ab	254.8 a	742.2 b
-Escalera sin PBZ de tres pisos	111.2 b	237.8 b	230.0 a	579.1 b
-Escalera con PBZ de tres pisos	166.3 ab	240.5 b	245.3 a	652.2 b
-Testigo absoluto sin PBZ	225.0 a	396.0 a	330.2 a	951.4 a
DMSH	108.1	146.6	120.8	200.4

Valores con distinta letra dentro de una misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta.

Ciertos autores (Fletcher et al., 2000; Cai et al., 2014; Xu et al., 2017), han indicado que aplicaciones de PBZ en el semillero mejoran el número y tamaño de frutos en jitomate. En el presente experimento no fue así, por lo que el mayor número de frutos y rendimiento por planta y por unidad de superficie fue en el Testigo absoluto manejado en dos fases de cultivo, y se explica por el mayor volumen de sustrato por planta y al espaciamiento que hubo entre plantas durante la fase intermedia, pues con la menor densidad de población en esta etapa, las plantas recibieron mayor radiación solar permitiendo una mayor síntesis de fotoasimilados los cuales son determinantes en la producción de biomasa (Larcher, 2003; Heuvelink & Dorais, 2005, Reghin et al., 2006) y el rendimiento final (Fischer & Pérez, 2012; Nangare et al., 2015).

Cabe recordar que para este tratamiento Testigo, se usó como contenedor una cama de siembra en vez de bolsas, por lo que seguramente las plantas crecieron en un ambiente con mayor volumen de sustrato para la raíz, lo que pudo haber beneficiado tanto el crecimiento como el rendimiento como lo señalan Loyola y Alberoni (2020), Sánchez et al. (2012) y Hernández et al. (2018) quienes destacaron la importancia que tiene el efecto del volumen del contenedor para un mayor crecimiento radical, lo que a su vez deriva en mejores rendimientos, pues al no haber condicionantes limitantes como en las bolsas de polietileno, las raíces pudieron aprovechar mejor el agua y nutrimentos aportados en la solución nutritiva a través del riego.

4.5. Análisis de rendimiento entre hileras

Se realizaron análisis de varianza individuales entre hileras de plantas para cada uno de los tratamientos de disposición de plantas (Cuadros 11 a 14), con la intención de evaluar si había un efecto derivado de la ubicación de las plantas en las diferentes hileras que los conformaban durante la etapa intermedia y que se hubiera derivado en efectos en el rendimiento o número de frutos por planta. No se dieron diferencias en número o peso de frutos por planta entre las diferentes hileras que conformaban cada tratamiento por lo que ya no se anexan las pruebas de comparación de medias.

Este resultado puede deberse a que con el hábito determinado de las plantas y el bajo índice de área foliar formado no hubo competencia entre plantas por luz, a pesar de que la densidad de población durante los 45 días que duró la etapa intermedia fue de 30 plantas m⁻², por lo que las distintas hileras de plantas que conformaron cada tratamiento se comportaron de manera similar en cuanto al rendimiento producido por planta.

Cuadro 11. Cuadros medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta al final de la cosecha en los tratamientos de dosel uniforme sin y con aplicación de paclobutrazol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Uniforme sin paclobutrazol		Uniforme con paclobutrazol	
		Total de frutos	Peso total de frutos	Total de frutos	Peso total de frutos
Bloque	3	0.1	835	2.1	29585
Tratamientos	5	3.9	33428	6.5	26374
Error	15	2.9	38062	7.3	59000
Coefficiente de variación (%)		24.8	28.9	37.7	35.1
Media		6.9	675	7.2	691

Cuadro 12. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta al final de la cosecha en los tratamientos de dosel escaleriforme de dos escalones sin y con aplicación de paclobutrazol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Escalera de dos pisos sin paclobutrazol		Escalera de dos pisos con paclobutrazol	
		Total de frutos	Peso total de frutos	Total de frutos	Peso total de frutos
Bloque	3	0.2	4540.7	2.0	22977
Tratamientos	5	3.5	24433.4	6.4	56096
Error	15	5.3	58024.0	5.1	66716
Coeficiente de variación (%)		35.4	34.9	30.5	34.8
Media		6.5	688	7.4	742

Cuadro 13. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta al final de la cosecha en los tratamientos de dosel escaleriforme de tres escalones sin y con aplicación de paclobutrazol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Escalera de tres pisos sin paclobutrazol		Escalera de tres pisos con paclobutrazol	
		Total de frutos	Peso total de frutos	Total de frutos	Peso total de frutos
Bloque	3	4.0	16965.4	4.3	16305
Tratamientos	5	1.1	11206.5	1.9	16399
Error	15	1.0	16800.6	6.0	35085
Coeficiente de variación (%)		16.1	21.1	39.5	28.7
Media		6.2	614	6.2	652

Cuadro 14. Cuadrados medios del análisis de varianza para número total de frutos y peso total de frutos por planta a final de la cosecha en el testigo de dos fases de cultivo.

Fuente de variación	Grados de libertad	Total de frutos	Peso de frutos/planta (g)
Bloque	7	5.1	144671.4
Tratamientos	2	12.1	143598.6
Error	14	6.3	163615.0
Coeficiente de variación (%)		30.2	42.5
Media		8.3	951

Pese a que, en general, en este tipo de estudios es frecuente que en algunos de los tratamientos no se encuentren diferencias estadísticas (Santos & Sánchez, 2003; Vázquez et al., 2007; Sánchez et al., 2009), es de destacar que no haya habido efectos en el rendimiento originados por la posición de las hileras de plantas, ya que esto significaría que todas las hojas de todos los tratamientos interceptaron la radiación solar de la misma forma, o bien en todos los casos se favoreció la misma cantidad de luz penetrante al interior del dosel (Dussi, 2007).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Bajo las condiciones en que se realizó el experimento se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones:

El crecimiento de las plantas a lo largo de su ciclo de cultivo fue menor a lo esperado y no causó efectos detectables de competencia por luz durante la etapa intermedia de alta densidad, aún en los tratamientos en que se aplicó paclobutrazol a las plántulas.

Las aplicaciones de paclobutrazol en plántulas agudizaron la reducción de la altura y área foliar por planta, pero sin consecuencias negativas en rendimiento comparado con los tratamientos en que no se aplicó este producto.

Al menos en las condiciones en que se realizó este experimento y con la variedad que se utilizó, las aplicaciones de paclobutrazol no son necesarias para implementar el sistema de tres fases de cultivo y siete ciclos de producción por año propuesto.

No hubo diferencias entre los diferentes tratamientos de disposición de las hileras de plantas durante la fase intermedia de cultivo a pesar de la alta densidad de población que se manejó debido al limitado crecimiento de las plantas en altura y área foliar en todos los tratamientos manejados en tres fases de cultivo.

En base a los resultados obtenidos se mostró que usando un espacio adicional de invernadero proporcionalmente pequeño es posible obtener, en un invernadero para la fase final, ciclos de cultivo de plantas a tres racimos en 50

días, lo que potencialmente podría permitir a escala comercial hasta siete ciclos de cultivo al año con una muy alta productividad anual; sin embargo, el rendimiento del ciclo establecido fue relativamente bajo, por lo que se considera que se debe seguir evaluando este sistema de tres fases de cultivo con otras variedades (sobre todo de hábito indeterminado), con contenedores que contengan un mayor volumen de sustrato y/o con sustratos que en volúmenes limitados otorguen simultáneamente condiciones adecuadas de retención de agua y de oxigenación suficiente para la raíz.

El testigo absoluto en dos fases de cultivo otorgó mayor rendimiento por unidad de superficie respecto a algunos tratamientos de tres fases, pero ocupó el invernadero de fase final por espacio de 105 días, lo que potencialmente permite sólo tres ciclos al año y, por lo tanto, menos productividad anual que cualquiera de los tratamientos de tres fases.

6. LITERATURA CITADA

- Aguilar, R. M. (2012). *Efecto de luz suplementaria en la producción de plántula de tomate (Solanum lycopersicum L.)*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 108 p.
- Argerich, C., & Troilo, L. (2011). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas en la cadena de tomate*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Buenos Aires.
- Baquero, R. A. Q., López, H. E. B., Herrera, J. G. Á., Hernández, J. F. C., & Pinzón, H. H. (2010). Efecto del número de racimos por planta sobre el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum L.*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4(2), 185-198.
- Barrett, J. & Nell, T. (1986). *Evaluation of XE-1019 and paclobutrazol for height control of flowering annuals*. Proceedings annual meeting. Plant Growth Regulator Society of America, USA.
- Bastida, C. O. A. (2012). *Métodos de cultivo hidropónico de jitomate (Solanum lycopersicum L.) bajo invernadero basado en doseles escaleriformes*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 115 p.
- Brigard, J. P., Harkess, R. L., & Baldwin, B. S. (2006). Tomato early seedling height control using a Paclobutrazol seed soak. *HortScience*, 41(3), 768-772. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.768>
- Briggs, R. S., Lucas, R. G., & Taylor, Z. T. (2003). Climate classification for building energy codes and standards: Part 1-development process. *ASHRAE Transactions*, 109, 109.
- Cai, T., Xu, H., Peng, D., Yin, Y., Yang, W., Ni, Y., & Wang, Z. (2014). Exogenous hormonal application improves grain yield of wheat by optimizing tiller productivity. *Field Crops Research*, 155, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.008>
- Camacho, R. G., Garrido, O., & Lima, M. G. (1995). Caracterización de nueve genotipos de maíz (*Zea mays L.*) en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz. *Scientia Agricola*, 52, 294-298. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161995000200015>
- Campos, de M. A. P., Seleguini, A., Da Rocha, S., & Veloso, V. (2014). Peliculização de sementes de tomate associada ao paclobutrazol. *Bragantia*, 73(2), 123-129. <https://doi.org/10.1590/brag.2014.026>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2018) <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/86Tomate.pdf>

- Celis, F. (2019, mayo 8). *400,000 empleos están en juego por arancel al jitomate de México*. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/400000-empleos-estan-en-juego-por-arancel-al-jitomate-de-mexico/>
- Chamarro, L. J. (1995). *Anatomía y Fisiología de la Planta. El Cultivo del Tomate*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Chávez, G. M. A. (2013). *Efecto de dos coberturas plásticas en la producción de jitomate (Lycopersicon esculentum Mill.) bajo invernadero en el municipio de Coatepec Harinas*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Tenancingo, México. 64 p.
- De Moraes, P. J., Saraiva, G. J. A., De Araújo, T. S., Henriques, da S. D. J., Cecon, P. R., & Barbosa, J. G. (2005). Ornamental tomato growth and fruiting response to paclobutrazol. *Acta Horticulturae*, 683, 327. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.683.40>
- Dussi, M. C. (2007). *Intercepción y distribución lumínica en agroecosistemas frutícolas*. En: Árboles frutales: ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. (Ed. G. O. Sozzi). Universidad de Buenos Aires. pp. 201-244.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Tomato statistics*. <https://www.fao.org/faostat/es/#compare>
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Cultivos y productos de ganadería*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Ferreira, N., Vendruscolo, E., Seleguini, A., Dourado, W., Benett, C., & Nascimento, A. (2017). Crescimento, produção e qualidade de frutos de tomateiro em cultivo adensado com uso de paclobutrazol. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 72-79. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5690>
- FIRA. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2019). <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2019/06/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019.pdf>
- Fischer, G. & Pérez, C. P. (2012, noviembre 28-30). *Efecto de la radiación solar en la calidad de los productos hortícolas*. [Sesión de conferencia] Congreso Internacional de Hortalizas en el Trópico, 2012. Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas. Bogotá, Colombia.
- Fletcher, R. A., Gilley, A., Davis, T. D., & Sankhla, N. (2000). Triazoles as plant growth regulators and stress protectants. *Horticultural Reviews*, 24(1), 55-138. <https://doi.org/10.1002/9780470650776.ch3>

- Flores, L. R., Martínez, G. R., López, D. H. A., & Marín, C. M. (2016). Aplicación periódica de bajas concentraciones de paclobutrazol y ácido salicílico en papa en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1143- 1154. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.238>
- França, C. F. M., Ribeiro, W., S., Santos, M. N. S., Petrucci, K. P. O. S., Rêgo E. R., & Finger, F. L. (2018). Growth and quality of potted ornamental peppers treated with paclobutrazol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(3), 316-322. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000300006>
- Franklin, K. A. & Whitelam, G. C. (2007). *Red: far-red ratio perception and shade avoidance*. In: Halliday Light and plant development (Eds. G. C. Whitelam & K. J. Franklin). Blackwell Publishing. pp. 211-234.
- Galicia, L. E. A. (2020). *Efecto de la concentración de la solución nutritiva, poda, tipo y volumen de sustratos en el rendimiento y calidad de tomate Cherry determinado (Solanum lycopersicum cv. cerasiforme)*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 95 p.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (2017). *Physiology of crop plants*. Scientific publishers. Iowa.
- Gollagi, S. G., Jasmitha, B. G., & Sreekanth, H. S. (2019). A review on: paclobutrazol a boon for fruit crop production. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 2686-2691.
- Gómez, M. (2012). *Calidad de fruto en 12 poblaciones silvestres de jitomate Solanum lycopersicum L var. cerasiforme (Dunal) del occidente de México*. Tesis doctoral. Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco. 107 p.
- González, I. A. (1991). *El jitomate (Lycopersicon esculentum Mill.), aspectos para su cultivo en México*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 708 p.
- Greyson, R. I. & Sawhney, V. K. (1972). Initiation and early growth of flower organs of *Nigella* and *Lycopersicon*: insights from allometry. *Botanical Gazette*, 133(2), 184-190. <https://doi.org/10.1086/336632>
- Hernández, V. M. A., Hernández, M. S. P., Montalvo, S. Á., & Recio, M. A. (2018). Profundidad, peso y volumen del sistema radical del tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Pedro en condiciones de invernadero. *Agrisost*, 24(2), 124-129.
- Heuvelink, E. & Dorais, M. (2005). *Crop growth and yield*. In: Tomatoes (Ed. E. Heuvelink). Wageningen University. pp. 85-114. <https://doi.org/10.1079/9780851993966.0085>
- Heuvelink, E. & Okello, C. O. R. (2018). *Developmental process*. In: Tomatoes. (Ed. E. Heuvelink. 2nd ed.) Wageningen University. pp. 59-88. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>

- Heuvelink, E., Tao, L., & Dorais, M. (2018). *Plant growth and yield*. In: Tomatoes (Ed. E. Heuvelink. 2nd ed.) Wageningen University. pp. 89-136. <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>
- Higuchi, Y. & Hisamatsu, T. (2016). *Light acts as a signal for regulation of growth and development*. In: Led Lighting for Urban Agriculture (Eds. T. Kosai, K. Fujiwara, E. S. Runkle). Springer. pp. 57-73. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_5
- Islas, J. C. (2021). *Estudio de efecto antagónico de una cepa bacteriana contra Fusarium oxysporum en jitomate Solanum lycopersicum L.* Tesis de maestría. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Puebla. 77 p.
- Jankiewicz, L. S. (2003). *Reguladores de crecimiento, desarrollo y resistencia en plantas, propiedades y acción*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Jarvis, R. W. (1998). *Control de enfermedades en Cultivos de Invernaderos* Mundi-Prensa. Madrid.
- Jishi, T. (2018). *Led lighting technique to control plant growth and morphology*. In: Smart plant factory (Ed. T. Kosai). Springer. pp. 211-222. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_14
- Jones, J., B. (2005). *The plant root: its roles and functions*. In: Hydroponics: A Practical Guide for the Soilles Grower (Ed. J. B. Jones). CRC Press. pp. 19-28. <https://doi.org/10.1201/9780849331671>
- Jorge, S. M. & Sánchez, Del C. F. (2003). Densidad de Población, Arreglos de Dosel y Despuntos en Jitomate Cultivado en Hidroponía Bajo Invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(4), 257-262.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer Science & Business Media. New York <https://doi.org/10.1093/aob/mch084>
- Li, T., Heuvelink, E., Dueck, T. A., Janse, J., Gort, G., & Marcelis, L. F. (2014). Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors. *Annals of Botany*, 114, 145–156. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu071>
- López, L. M. (2017). *Manual técnico del cultivo del tomate: Solanum lycopersicum*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San José.
- Méndez, G. T., Sánchez, del C. F., Sahagún, C. J., & Contreras, M. E. (2005). Doseles escaleriformes con hileras de plantas de jitomate orientadas en dirección este-oeste. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(1), 185-192.

- Moreno, A., Aguilar, J., & Luévano, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15(29), 763-774.
- Moreno, P. E., Sánchez, del C. F., Ruiz, D. M., & Contreras, M. E. (2021). Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(1), 5-17. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>
- Nangare, D. D., Singh, J., Meena, V. S., Bhushan, B., & Bhatnagar, P. R. (2015). Effect of green shade nets on yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) in semi-arid region of Punjab. *Journal of Applied and Natural Science*, 1: 1–8. <https://doi.org/10.31018/jans.v10i1.1629>
- Novacek, M. J., Mason, S. C., Galusha, T. D., & Yaseen, M. (2013). Twin rows minimally impact irrigated maize yield, morphology, and lodging. *Agronomy Journal*, 105, 268–276. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0301>
- Nuez, F. (2001). *El cultivo del tomate*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Peng, D., Chen, X., Yin, Y., Lu, K., Yang, W., Tang, Y., & Wang, Z. (2014). Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid. *Field Crop Research*, 157, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.015>
- Peralta, I. E., Knapp, S., & Spooner, D. M. (2006). Nomenclature for wild and cultivate tomatoes. *Tomato Genetics Cooperative*. 56, 6-12. <https://tgc.ifas.ufl.edu/vol56/html/vol56featr.htm>
- Picken, A. J. F., Stewart, K., & Klapwijk, D. (1986). *Germination and vegetative development*. In: The Tomato Crop. (Eds. J. G. Atherton & J. Rudich) Chapman and Hall. pp. 110-166
- Rademacher, W. (2000). Growth retardants: effects on gibberellin biosynthesis and other metabolic pathways. *Annual review of plant biology*, 51(1), 501-531. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.501>
- Ramírez, V. R. M. (2021). *Comparativo de triazoles y dosis en el crecimiento de frutos de Persea americana "palto" variedad hass en condiciones de Barranca*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huacho, Perú. 65 p.
- Ramos, F. J., Ayala, G. O. J., Pérez, G. M., Sánchez, del C. F., & Magdaleno, V. J. J. (2021). Efecto del paclobutrazol sobre el crecimiento de la planta, rendimiento y calidad del fruto en tomate. *Bioagro*, 33(1), 59-64. <http://www.doi.org/10.51372/bioagro331.8>

- Reghin, M. Y., Otto, R. F., Olinik, J. R., & Jacoby, C. F. (2006). Produção de cebola sobre palhada a partir de mudas obtidas em bandejas com diferentes números de células. *Horticultura Brasileira*, 24, 289-297. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362006000400004>
- Reina, G. J. (2020). *Comparación de la dinámica nutrimental en jitomate despuntado a tres racimos entre sistemas hidropónicos abiertos y cerrados*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 114 p.
- Rodoni, L. (2008). *Efecto de tratamientos con ozono sobre maduración y calidad de tomate (Solanum lycopersicum) y frutilla (Fragaria x ananassa)*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina. 75 p.
- Ruíz, D. M. (2019). *Efectos de Densidad de Población, Volumen de Contenedor, Paclobutrazol y Luz Suplementaria sobre Calidad de Plántula y Floración de Jitomate*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 141 p.
- Sánchez, Del C. F. (1994). *Relaciones entre Fuente y Demanda en Jitomate Manejado con Despuntos y Alta Densidad de Población*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 111 p.
- Sánchez, Del C. F. & Corona, S. T. (1994). Evaluación de cuatro variedades de jitomate bajo un sistema hidropónico a base de despuntos y altas densidades. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 1(2), 109-114.
- Sánchez, Del C. F. & Ponce, O. 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.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E., & Cruz, A. E. L. (2009). Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(1), 67-73.
- Sánchez, del C. F., Moreno, P. E., Coatzín, R. R., Colinas, L. M., & Peña, L. 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 C. F., Moreno, P. E., & Contreras, M. E. (2012). Development of Alternative Crop Systems for Commercial Production of Vegetables in Hydroponics. *Acta Horticulturae*, 947, 179-187. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.22>
- Sánchez, del C. F., Moreno, P. E., Contreras, M. E., & Sahagún, C. J. (2014). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(3), 239-251. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.10.037>

- Sánchez, Del C. F. (2016). *Validación Comercial de un Sistema de Producción de Jitomate Basado en la Formación de Doseles en Forma de Escalera*. Informe Técnico del Proyecto de Transferencia de Tecnología 2015. Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez, Del C. F. & Moreno, P. E. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo. 405 p.
- Sánchez, del C. F., Moreno, P. E., Pastor, Z. O., & Contreras, M. E. (2017a). 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 C. F., Moreno, P. E., Vázquez R. J. C, & González, N. M. A. (2017b). 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 C. F., Portillo, M. L., Moreno, P. E., Magdaleno, V. J. J., & Vázquez, R. 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. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- Santos, M. J. & Sánchez, del C. F. (2003). Densidades de población, arreglos de dosel y despuntes en jitomate cultivado en hidroponía bajo invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(4), 257-262.
- SAS Institute. (2002). *SAS/STAT Users Guide Version 9.1*. SAS Publishing. Morth Carolina. https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/stat_u_g_7313.pdf
- Shahak, Y., Gussakovsky, E. E., Gal, E., & Ganelevin, R. (2004). Color nets: crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Horticulturae*, 659, 143–151. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.17>
- Seleguini, A., De Araujo, F. M. J., Silva, B. K., Lemos, O. L., & Seno, S. (2013). Strategies for tomato seedlings production using paclobutrazol. *Semina: Ciências Agrarias*, 34(2), 539-548. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n2p539>
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). <https://www.gob.mx/siap/documentos/boletin-mensual-de-avances-de-laproduccion-de-tomate-rojo-jitomate>.
- Sonneveled, C. & Voogt, W. (2009). *Substrates: Chemical characteristics and preparation*. In: Plant Nutrition of Greenhouse Crops. (Eds. C. Sonnevled & W. Voogt) Springer. pp. 227-252.

- Taiz, L. & Zeiger, E. (2002). *Plant physiology* (3rd ed). Sinauer Associates. Sunderland.
- Ucán, Ch. I., Sánchez, Del C. F., Contreras, M. E., & Corona, S. T. (2005). Efecto de la densidad de población y raleo de frutos sobre el rendimiento y tamaño del fruto en jitomate. *Fitotecnia Mexicana*, 28(1), 33-38.
- Vázquez, R. J. C., Sánchez, del C. F., & Moreno, P. E. (2007). Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 55-62.
- Wang, C., Ruan, R., Yuan, X., Hu, D., Yang, H., Li, Y., & Yi, Z. (2014). Relationship between lignin metabolism and lodging resistance of culm in buckwheat. *Journal of Agricultural Science*, 6(9), 29. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n9p29>
- Wang, C.; Hu, D.; Liu, X.; She, H.; Ruan, R.; Yang, H.; Yi, Z.; & Wu, D. (2015). Effects of uniconazole on the lignin metabolism and lodging resistance of culm in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). *Field Crops Research*, 180:46–53. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.009>
- Wien, H. C. (1999). Transplanting. In H. C. Wein. *The Physiology of Vegetable Crops*. CABI Publishing. New York.
- Xia, X., Tang, Y., Wei, M., & Zhao, D. (2018). Effect of Paclobutrazol Application on Plant Photosynthetic Performance and Leaf Greenness of Herbaceous Peony. *Journal of Horticulturae*, 4, 5. <http://dx.doi.org/10.3390/horticulturae4010005>
- Xu, C., Gao, Y., Tian, B., Ren, J., Meng, Q., & Wang, P. (2017). Effects of EDAH, a novel plant growth regulator, on mechanical strength, stalk vascular bundles and grain yield of summer maize at high densities. *Field Crops Research*, 200, 71–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.011>