

EFFECTOS DE LUZ SUPLEMENTARIA APLICADA EN PLÁNTULAS DE TOMATE

EFFECTS OF SUPPLEMENTARY LIGHT APPLIED IN TOMATO SEEDLINGS

Esaú del Carmen Moreno-Pérez, Felipe Sánchez-Del Castillo*,
Lázaro Portillo-Márquez y José Cutberto Vázquez-Rodríguez¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Texcoco, Estado de México. México.

*Autor de correspondencia (fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx)

RESUMEN

En la Universidad Autónoma Chapingo se ha trabajado en el desarrollo de un sistema especial de producción de tomate en invernadero capaz de acortar el ciclo de cultivo de trasplante a fin de la cosecha a menos de 90 días y así lograr hasta cuatro ciclos de producción por año. Este sistema implica prolongar la edad al trasplante hasta los 60 días después de la siembra (dds) y despuntar las plantas por encima de la tercera inflorescencia. El objetivo de la presente investigación fue evaluar los efectos de la aplicación de luz suplementaria sobre plántulas de tomate creciendo en charolas con cavidades de 250 cm³ sobre aspectos morfológicos que ayuden a prolongar la edad al trasplante hasta los 60 dds sin efectos negativos posteriores en el rendimiento de las plantas. Se compararon 10 tratamientos que resultaron de la combinación de tres ubicaciones de lámparas de luz (arriba, abajo y en ambas posiciones del dosel) y de tres periodos de aplicación (diurno, nocturno y diurno más nocturno), más un testigo sin aplicación. La luz suplementaria se suministró con lámparas LED de luz blanca fría con un flujo fotónico fotosintético de 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 20 cm de distancia. Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y un arreglo factorial de tratamientos, usando un grupo de 16 plántulas como unidad experimental. Se encontró que la luz suplementaria, aplicada durante el día y desde el interior del dosel, redujo la altura y área foliar de las plántulas, pero no incrementó el número de flores ni el rendimiento por planta con respecto al testigo. Con el trasplante a los 60 dds el cultivo en el invernadero duró sólo 85 días, lo que hace posible establecer cuatro ciclos de producción al año e incrementar el rendimiento con respecto a otros sistemas intensivos de producción de tomate en invernadero.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., calidad de plántula, luz suplementaria, trasplante tardío.

SUMMARY

At Chapingo Autonomous University research has been done to develop a special greenhouse tomato production system capable of shortening the crop cycle from transplant to final harvest to less than 90 days; thus, achieving up to four production cycles per year. This system implies to delay the transplant age until 60 days after sowing (das) and decapitation of plants just above the third inflorescence. The objective of this study was to evaluate the effects of the application of supplementary light on tomato seedlings growing in trays with cavities of 250 cm³ on morphological traits that help to delay the transplant age until 60 das without subsequent negative effects on plant yield. Ten treatments that resulted from the combination of three light lamps

locations (top, bottom and in both canopy positions) and three application periods (day, night and day plus night), plus a control without application were compared. Supplementary light was supplied with cool white-light LED lamps with a photosynthetic photon flux of 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ at a distance of 20 cm. A randomized complete block design with four replications was used with a factorial arrangement of treatments, using a group of 16 seedlings as the experimental unit. It was found that supplementary light, applied during the day and from inside the canopy, reduced plant height and leaf area of seedlings, but did not increase the number of flowers or the yield per plant relative to the control. With transplant at 60 das, the cultivation in the greenhouse took only 85 days, which makes it possible to grow four cycles per year and increase the yield compared to other intensive greenhouse tomato production systems.

Index words: *Solanum lycopersicum* L., delayed transplant, seedling quality, supplementary light.

INTRODUCCIÓN

En México, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza que más se cultiva bajo invernadero. Durante 2020, México exportó 3,371,000 toneladas de fruto con un valor de 2,372,000 miles de dólares estadounidenses, de las cuales 54.6 % proviene de invernaderos (SIAP, 2021).

El manejo convencional del cultivo, practicado por las grandes empresas en México y el mundo, consiste en establecer una densidad de población entre 2.5 y 3 plantas m⁻² y dejar que las plantas crezcan más de 7 m de longitud para cosechar al menos 20 racimos por planta en un solo ciclo de cultivo al año. Normalmente se utilizan invernaderos tecnificados y sistemas hidropónicos sofisticados, con costos de producción muy elevados, pero gracias al control ambiental que se logra con ambas tecnologías, se obtienen rendimientos anuales que superan las 300 t ha⁻¹, e incluso las 500 t ha⁻¹ en países como Holanda y Canadá, que utilizan mayor tecnología (Heuvelink *et al.*, 2018; Kubota *et al.*, 2018).

La mayoría de productores de tomate en invernadero

en México poseen poca superficie (menos de 0.5 ha) y utilizan invernaderos con tecnología baja, y por lo tanto, con poco control ambiental y sanitario, lo que se refleja en un bajo rendimiento y rentabilidad económica (Sánchez-del Castillo *et al.*, 2012).

En la Universidad Autónoma Chapingo, México se ha desarrollado y validado comercialmente un sistema alternativo de producción de tomate, que consiste en lograr un ciclo de cultivo desde el trasplante hasta fin de cosecha en solamente 120 días; para ello, se utilizan técnicas para retrasar el trasplante hasta los 40 a 45 días después de la siembra, conjuntamente con el despunte de las plantas inmediatamente después de la tercera inflorescencia, para cosechar sólo tres racimos de cada planta. Para compensar parcialmente el menor rendimiento de cada planta se establecen densidades de población de 7 a 8 plantas m^{-2} , lo cual es posible debido a la menor área foliar que desarrolla cada planta a la altura del despunte. Dado que se pueden obtener tres ciclos de cultivo por año, cada uno con un rendimiento de 16 a 17 $kg\ m^{-2}$, el potencial anual está cercano a las 500 $t\ ha^{-1}$ (Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Sánchez-del Castillo *et al.*, 2012; 2021), incluso usando invernaderos con tecnología relativamente sencilla y de bajo costo, pero agrónomicamente bien diseñados (Sánchez y Moreno, 2017).

El trasplante con plántulas de hasta 60 dds ha sido posible utilizando macetas individuales con volúmenes de 750 cm^3 de sustrato (Sánchez-del Castillo *et al.*, 2012; 2017), pero este tipo y tamaño de contenedor requiere mucho espacio en el semillero, y la labor del trasplante ha resultado difícil y costosa. Si el trasplante con plántulas de 60 días se pudiera lograr de manera práctica y sin efectos adversos posteriores, se lograrían cuatro ciclos de cultivo por año, y el rendimiento y rentabilidad económica anuales serían 25 % mayores al sistema de tres ciclos de cultivo por año.

El uso del espacio disponible y tiempo de ocupación del semillero son factores importantes en la eficiencia de la producción, por lo que recientemente se ha trabajado en la evaluación de densidades de población de plántulas, así como contenedores que ocupen menos espacio y menos volumen de sustrato para la producción de plántulas de 55 a 60 d de edad (Sánchez-del Castillo *et al.*, 2021); sin embargo, se ha observado que con altas densidades de plántula se genera mayor competencia por luz entre plantas, sobre todo los últimos días antes del trasplante, y una tendencia a desarrollarse en altura, con lo que se producen plántulas elongadas que resultan más débiles a la manipulación durante y después del trasplante (Moreno-Pérez *et al.*, 2021).

Los indicadores de calidad para trasplantes tan tardíos como 60 d después de la siembra (dds) incluyen plántulas compactas con entrenudos cortos, tallo grueso, hojas pequeñas pero con mayor espesor y mayor peso seco por unidad de altura (Sánchez-del Castillo *et al.*, 2012). Con este arquetipo de plántulas se busca reducir el estrés al trasplante que eventualmente conduce a un menor rendimiento final.

La radiación solar actúa como fuente de energía para la fotosíntesis, y como señal que controla el crecimiento, la floración y la morfogénesis (Momokawa *et al.*, 2011). Según Takahashi y Badger (2011), cuando se generan cambios en la calidad o intensidad de la radiación incidente, se producen modificaciones en las plantas que afectan su anatomía y fisiología, así como su crecimiento y desarrollo.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se plantea que el uso de luz LED blanca suplementaria, aplicada durante el día, o durante las primeras horas de la noche, o incluso abarcar horas del día y de la noche, puede contribuir a formar plántulas más compactas al disminuir la elongación de los entrenudos por el sombreado mutuo provocado por las altas densidades de población que se manejan en el semillero y que normalmente resulta en plántulas con menor calidad después del trasplante (Kozai, 2016), por lo que la fotosíntesis extra que promueve esta luz puede contribuir a formar plántulas con un mayor grosor de tallo y peso seco, y el incremento de la integral diaria de radiación fotosintéticamente activa incidente pueden favorecer efectos morfogenéticos encaminados hacia hojas más gruesas y compactas (Taiz *et al.*, 2018).

Por otro lado, como en este sistema de producción alternativo el rendimiento depende de la cosecha de muchos racimos por año, un pequeño incremento en el número de frutos por racimo o en el peso medio por fruto podría impactar de manera importante el rendimiento final.

Heuvelink y Okello (2018) mencionan que el número de flores formadas por inflorescencia en tomate, si bien tiene un componente genético, se puede incrementar mediante modificaciones temporales del ambiente (luz, temperatura, CO_2 y nutrición) durante el periodo de iniciación floral.

La aplicación de luz artificial suplementaria en la fase de semillero podría contribuir a obtener plántulas de hasta 60 días con más calidad al trasplante y permitir alargar la edad al trasplante e incrementar el número de flores por inflorescencia. Se espera que cada plántula reciba una mayor cantidad de radiación fotosintéticamente activa y sea más compacta, con tallos más gruesos y con mayor peso seco. Con el uso de luz suplementaria también se espera que cada plántula incremente su tasa

de fotosíntesis, dejando más azúcar disponible para los primordios florales en desarrollo, lo que daría lugar a más flores por inflorescencia (Heuvelink y Okello, 2018). Cabe señalar que el patrón de calidad que la luz suplementaria genera cuando es aplicada desde abajo del dosel es diferente a cuando se aplica desde arriba (Jishi, 2018); en el primer caso, se iluminan mejor las hojas de abajo del dosel que normalmente son las más desfavorecidas por la radiación natural (Tewolde *et al.*, 2018); no obstante, el efecto morfogénico y sobre la floración que puede tener esta forma de aplicación de luz en etapa de plántula se conoce poco. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de luz LED blanca suplementaria a plántulas de tomate creciendo en charolas con cavidades de 250 cm³ sobre caracteres morfológicos relacionados con calidad de plántulas para ser trasplantada a los 60 días después de la siembra, así como su efecto en el número de flores y frutos por inflorescencia de plantas despuntadas para cosechar solamente tres racimos por planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Se usó un invernadero ubicado en Texcoco, Estado de México, con coordenadas de 19° 20' de latitud N y 98° 53' de longitud O, a 2240 msnm, de finales de julio a mediados de diciembre de 2018. El invernadero estaba cubierto con polietileno térmico con 85 % de transmisión y 60 % de dispersión de luz, contaba con cortinas de polietileno y malla antiáfidos para cubrir las ventanas, sistema de calefacción directa a base de gas LP y sistema de enfriamiento evaporativo mediante muro húmedo y extractores, lo que permitía controlar la temperatura promedio del día entre 15 y 25 °C y de 10 a 18 °C durante la noche, con humedad relativa entre 50 y 80 %.

Manejo agronómico

Se trabajó con el híbrido comercial de tomate El Cid, que es de tipo saladette y hábito de crecimiento indeterminado. La semilla fue sembrada en charolas de poliestireno de 60 cavidades (250 cm³ por cavidad) con distancia entre cavidades de 5 cm, lo que resultó en una densidad de 200 plántulas m⁻². Como sustrato de siembra se utilizó una mezcla de turba, perlita y tezontle fino en igual proporción volumétrica. En los primeros 10 días después de la siembra (dds) el riego fue con agua sola; desde esa etapa y hasta el trasplante, las plántulas se irrigaron con una solución nutritiva que contenía los siguientes nutrientes y concentraciones (mg L⁻¹): N: 100, P: 25, K: 100, Ca: 125, Mg: 25, S: 75, Fe: 1, Mn: 0.5, Bo: 0.5, Cu: 0.1 y Zn: 0.1. Del trasplante a fin de cosecha la solución nutritiva con la que se regaban las plantas fue preparada

con el doble de concentración de macronutrientes y la misma concentración de micronutrientes. A los 60 dds las plántulas fueron trasplantadas a camas de cultivo que medían 1 m de ancho, rellenas con una capa de 25 cm de arena de tezontle rojo con partículas de 1 a 3 mm de diámetro; se establecieron pasillos de 0.5 m de ancho entre camas. En cada cama se establecieron tres hileras de plantas separadas a 33 cm entre hileras y 25 cm entre plantas para una densidad útil de 12 plantas m⁻². El sistema de riego fue a base de cintillas con goteros integrados cada 20 cm. La dosis diaria de riego varió según la etapa fenológica y condiciones climáticas prevalecientes, con un gasto aproximado de 4 L de solución nutritiva m⁻² diariamente.

Las plantas fueron tutoradas con el apoyo de anillos plásticos y rafia. A los 70 dds se realizó poda de brotes laterales conforme aparecían para dejar un solo tallo por planta. Una vez formada la tercera inflorescencia, se eliminó la yema terminal del tallo dos hojas por encima de la misma.

Tratamientos aplicados

Se probaron 10 tratamientos de luz LED blanca suplementaria que resultaron de la combinación de tres posiciones de las lámparas: iluminación desde arriba del dosel, iluminación desde abajo del dosel e iluminación simultánea desde ambas posiciones (Figura 1) y tres periodos de aplicación: durante 12 horas en el día (de 7:00 am a 7:00 pm), durante 6 h en la noche (de 7:00 pm a 1:00 am), y tanto durante el día como en la noche (de 7:00 am a 1:00 am del día siguiente), más un tratamiento testigo sin aplicación de luz suplementaria.

La aplicación de luz se realizó desde los 20 dds hasta el momento del trasplante (60 dds). Las lámparas usadas fueron de la marca Megaluz®, modelo LSS002, con un gasto energético de 36 W h⁻¹; dimensiones de 1.2 m de largo × 7 cm de ancho, producen una temperatura de color equivalente a entre 5000 y 7000 °K (luz fría). Cabe aclarar que el término temperatura de color no se refiere a la temperatura en grados Kelvin que alcanza la fuente de luz, sino a la temperatura media que un radiador de Plank (cuerpo negro) tiene que estar para que la tonalidad o color que emita sea igual a la de la lámpara considerada (Filipo *et al.*, 2010). A 20 cm de distancia de las hojas el flujo fotónico fotosintético de las lámparas era de 150 μmol m⁻² s⁻¹, por lo que la cantidad de luz suplementaria aportada a esa distancia varió según el tratamiento, desde 3.24 mol d⁻¹ en los tratamientos de luz por arriba o por abajo del dosel durante 6 h por la noche, hasta 9.72 mol d⁻¹ al aplicarse simultáneamente arriba y abajo del dosel durante 18 h al día.



Figura 1. Ubicación de lámparas para iluminar tanto desde arriba como desde abajo del dosel.

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, en un arreglo factorial de tratamiento con dos factores: posición de la fuente de luz y periodo de iluminación, cada uno con tres niveles más el testigo. Cada unidad experimental consistió de un grupo de 16 plántulas.

Variabes respuesta

Las variables evaluadas al final de la etapa de semillero (60 dds) fueron: 1) altura de plántula (cm), desde la base de la plántula hasta el meristemo apical, medida con una cinta métrica; 2) diámetro de tallo (mm), a la altura del entrenudo de la tercera y cuarta hoja con un vernier electrónico con precisión de 0.1 mm (Marca OBI, Modelo 215140, China); 3) área foliar por plántula (cm²) con un integrador de área foliar (LI-COR, Modelo LI-3100C, Lincoln, Nebraska, EUA) con una precisión de 0.1 a 1 mm², y 4) peso seco total por plántula (g) con una balanza granataria (Ohaus, Parsippany, New Jersey, EUA) con precisión de 0.01 g, se midieron en las mismas plántulas utilizadas para obtener el área foliar, colocándolas dentro de bolsas de papel y posteriormente en un horno de secado (Felisa, Modelo FE-294AD, Zapopan, Jalisco, México) a 70°C hasta peso constante. Para medir el área foliar y peso seco se hizo muestreo destructivo de tres

plántulas por unidad experimental.

Las variables evaluadas en la etapa reproductiva fueron número de flores por planta (de los 80 a 100 dds), número de frutos por planta, peso medio de fruto (g) y rendimiento por planta (g) cosechados de 12 plantas por repetición (de los 120 a 145 dds).

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el programa SAS, versión 9.1 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabes evaluadas en etapa de plántula

Se presentaron diferencias altamente significativas entre periodos de aplicación de luz suplementaria y entre posiciones de lámparas para altura de plántula y área foliar; además, la interacción periodo de aplicación \times posición de lámparas fue altamente significativa para altura de plántula (Cuadro 1). Las comparaciones de medias entre tratamientos con diferentes periodos de suplementación de luz muestran que, cuando la luz suplementaria fue proporcionada durante el día o simultáneamente durante el día y la noche, las plántulas redujeron su altura en 13.1

y 10.5 %, respectivamente, con respecto a las plántulas testigo, (Cuadro 2).

Por otro lado, cuando la luz suplementaria se aplicó durante el periodo nocturno o en periodo diurno más nocturno, el área foliar por plántula disminuyó en 6.7 y 9.7 % respectivamente, con respecto al tratamiento testigo.

Cuando las plántulas fueron iluminadas desde la parte inferior del dosel o simultáneamente de la parte inferior más superior, la altura fue 13.7 y 13.5 % menor con respecto al testigo. Similar comportamiento se observó en

el área foliar por plántula, ya que cuando la iluminación se hizo desde la parte inferior del dosel, o tanto desde la parte superior como inferior, el área se redujo en 7.3 y 10.2 % con respecto al testigo.

La interacción significativa para altura de plántula entre periodos de aplicación de luz y posición de lámparas (Figura 2) se debe a que con iluminación solamente por arriba del dosel y el testigo no hubo cambios importantes en altura para los distintos periodos de aplicación; en cambio, para los tratamientos de iluminación desde la parte inferior del dosel y simultáneamente desde arriba y abajo,

Cuadro 1. Cuadros medios de variables morfológicas y peso seco a los 60 días después de la siembra en plántulas de tomate crecidas en contenedores de 250 cm³ a una densidad de 200 plántulas m⁻² con luz LED blanca suplementaria en diferentes posiciones y periodos de aplicación.

FV	GL	Altura	Diámetro de tallo	Área foliar	Peso seco
Bloque	3	5.9 ^{NS}	0.20 ^{NS}	2661 ^{NS}	0.26 ^{NS}
Periodo de aplicación	3	176.2 ^{**}	0.08 ^{NS}	6315 ^{**}	0.04 ^{NS}
Posición de lámparas	3	294.5 ^{**}	0.01 ^{NS}	8139 ^{**}	0.25 ^{NS}
Periodo × Posición	9	72.8 ^{**}	0.21 ^{NS}	1672 ^{NS}	0.28 ^{NS}
Error	45	8.3	0.07	1060	0.19
CV (%)		5.7	4.49	7.39	8.1

** : Altamente significativo (P ≤ 0.01), NS: no significativo, FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación.

Cuadro 2. Comparación de medias de variables morfológicas y peso seco a los 60 dds en plántulas de tomate crecidas en contenedores de 250 cm³ a una densidad de 200 plántulas m⁻² con luz LED blanca suplementaria en diferentes ubicaciones y periodos de aplicación.

Tratamiento	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Área foliar (cm ²)	Peso seco (g)
Periodo de aplicación				
Testigo (sin aplicación)	54.1 a	6.2 a	462 a	5.39 a
Diurno	47.0 b	6.3 a	451 ab	5.49 a
Nocturno	52.2 a	6.2 a	431 bc	5.38 a
Diurno + nocturno	48.4 b	6.1 a	417 c	5.40 a
DSH (0.05)	2.72	0.26	30.7	0.41
Posición de lámparas				
Testigo (sin aplicación)	54.1 a	6.2 a	462 a	5.39 a
Superior	54.2 a	6.2 a	456 ab	5.60 a
Inferior	46.7 b	6.2 a	428 bc	5.34 a
Superior + inferior	46.8 b	6.2 a	415 c	5.33 a
DSH (0.05)	2.72	0.26	30.7	0.41

Medias con la misma letra dentro de la columna, dentro de cada factor de variación, son estadísticamente iguales (Tukey, P ≤ 0.05). DSH: diferencia significativa honesta, dds: días después de la siembra.

ocurrieron disminuciones importantes, observándose que las plántulas con menor altura fueron las que combinaron luz suplementaria diurna aplicada desde la parte inferior del dosel, o las sometidas a luz suplementaria diurna más nocturna aplicada simultáneamente desde la parte superior y desde el interior del dosel.

De acuerdo con Jishi (2018), en plantas establecidas en alta densidad de población, donde éstas se sombrean mutuamente, a medida que la radiación solar va penetrando al interior del dosel, su intensidad se va reduciendo exponencialmente, además de que se va tornando deficiente en luz azul y luz roja, ya que estas longitudes de onda son fácilmente absorbidas por las hojas superiores, no así la luz verde y la radiación en el rojo lejano, que son reflejadas y penetran más en el dosel. Las plantas usan los fitocromos y el criptocromo para detectar estos cambios en cantidad y calidad de luz, provocando respuestas morfogénicas como la elongación y adelgazamiento de los entrenudos e incrementos en el área de las hojas, pero con láminas foliares más delgadas.

Craver y López (2016) mencionaron que lámparas de luz LED blanca con temperatura de color equivalente a 5000 °K, como las usadas en el presente experimento, emiten aproximadamente el 23 % de su radiación en azul, 40 % en verde, 33 % en rojo y sólo 4 % en rojo lejano, y que cuando al interior del dosel de las plantas llega suficiente luz azul o roja, o cuando la proporción de luz roja en relación con roja lejana es alta, se reduce la elongación de los entrenudos, por lo que se disminuye la altura de las

plántulas; esto es lo que sucedió en el presente estudio, donde con la luz suplementaria aplicada desde abajo durante el día, o en el día y parte de la noche, las plántulas redujeron significativamente su altura. Seguramente la luz suplementaria blanca aplicada sobre todo durante el día y desde abajo del dosel cambió la calidad de luz incidente en las hojas del interior del dosel, dando una mayor proporción de luz azul y de rojo en relación con rojo lejano en esa zona, lo que evitó la elongación de los entrenudos; por la misma razón, con la luz suplementaria por debajo del dosel también disminuyó el área foliar por plántula con respecto al testigo sin aplicación de luz suplementaria.

Una reducción en altura y en área foliar en el proceso de producción de plántulas de tomate puede resultar de gran importancia para realizar trasplantes tardíos, como en el presente caso, donde se busca retrasar el trasplante hasta los 60 dds sin efectos que repercutan posteriormente de manera negativa en el rendimiento y calidad de fruto. De esta manera, se reduce el ciclo de trasplante a fin de cosecha a menos de 90 días para hacer posible el logro de cuatro ciclos en un año, lo que implica posibles incrementos en el rendimiento anual de hasta 25 % más con respecto al logrado hasta ahora con el sistema de producción de tomate a tres racimos y tres ciclos de producción al año (Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Sánchez-del Castillo *et al.*, 2021).

La interacción encontrada entre posiciones de las lámparas y periodos de aplicación sugiere que, para reducir la altura de las plántulas que se van a trasplantar a los

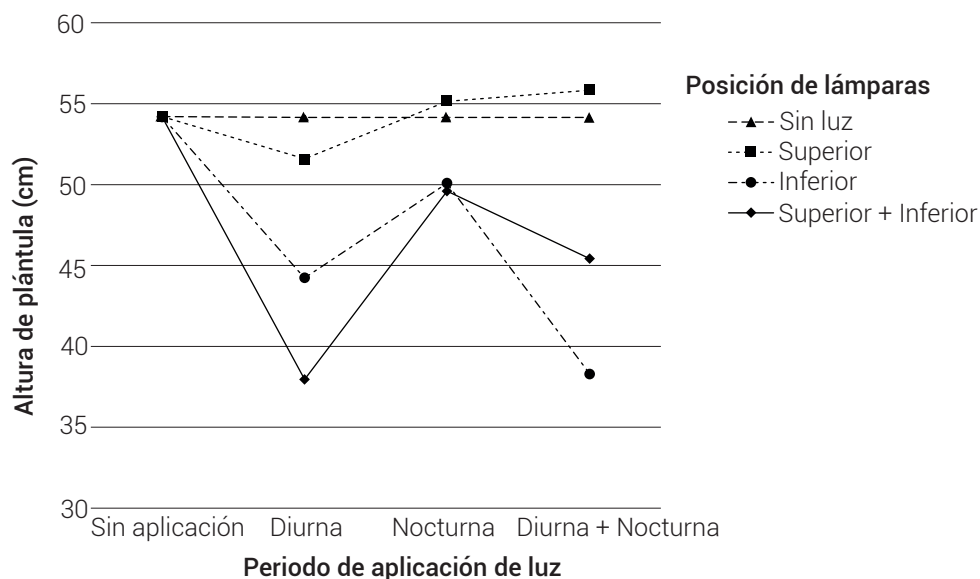


Figura 2. Interacción entre periodos de aplicación de luz y posición de lámparas para altura de plántula a los 60 días después de la siembra.

60 dds, lo más conveniente es aplicar luz suplementaria durante el periodo diurno y desde abajo del dosel. No se detectaron interacciones significativas para diámetro de tallo, peso seco y área foliar, posiblemente porque dichas variables mostraron menor sensibilidad a los cambios en la calidad de luz que la expresada por la elongación de los entrenudos.

Variabes del rendimiento y sus componentes

El análisis de varianza para rendimiento y sus componentes muestra que no hubo diferencias significativas para ninguna de las variables evaluadas entre tratamientos de periodos de aplicación de luz, pero entre tratamientos de posición de lámparas hubo diferencias altamente significativas para número de flores y significativas para número de frutos por planta. En ningún caso la interacción periodos de aplicación × posiciones de lámparas fue significativa (Cuadro 3).

En la comparación de medias (Cuadro 4) se encontró que cuando la luz suplementaria se proporcionó desde la parte superior del dosel se produjeron significativamente más flores y frutos por planta que al aplicarse desde abajo; sin embargo, dichas diferencias fueron de poca magnitud (una flor o un fruto más por planta), por lo que no se alcanzó a reflejar en el rendimiento, que fue estadísticamente igual entre todos los tratamientos. En peso de fruto tampoco hubo diferencias.

El número de flores en una inflorescencia de tomate depende del genotipo, pero también de las condiciones ambientales. De acuerdo con Heuvelink y Okello (2018), un incremento en la irradiancia diaria o en el espacio entre plántulas puede influir positivamente en la formación de

más flores por inflorescencia, al dejar más fotoasimilados disponibles para los primordios de flor en desarrollo, favoreciendo así la formación de más flores en cada inflorescencia; por ello, se esperaba que un efecto de la luz suplementaria aplicada en la etapa de iniciación floral pudiera inducir la formación de más flores en cada una de las tres inflorescencias, pero no ocurrió así. Posiblemente durante el periodo de aplicación de luz suplementaria en el semillero, coincidente con el periodo de iniciación floral de las tres primeras inflorescencias, se estimuló más el crecimiento vegetativo que el reproductivo, desviando más fotosimilados hacia las hojas, tallos y raíces para su crecimiento, dejando menos para la formación de flores; ésto pudo ocasionar que una mayor proporción de los primordios de flor iniciados abortaran, dando por resultado un número de flores y frutos por inflorescencia y por planta similar al testigo.

Aunque la aplicación de luz suplementaria no contribuyó a un mayor rendimiento, ya que el testigo se comportó de manera similar a los otros tratamientos en este aspecto, se lograron producir plántulas de buena calidad para el trasplante tardío, de menor altura y menor área foliar en el semillero, y extender el trasplante hasta los 60 dds, logrando completar el ciclo de trasplante a fin de la cosecha en sólo 85 días, con lo que potencialmente se pueden obtener cuatro ciclos de cultivo al año. El rendimiento promedio fue de 1750 g por planta, equivalente a 14 kg m⁻². En cuatro ciclos el rendimiento podría alcanzar 56 kg m⁻² equivalente a 560 t ha⁻¹ por año, casi el doble de lo que normalmente se obtiene en un ciclo anual con un sistema de producción comercial convencional bien manejado en México, e incluso un poco mayor al reportado en otros países como Holanda y Canadá, con invernaderos de alta tecnología (Heuvelink *et al.*, 2018).

Cuadro 3. Cuadros medios y niveles de significancia en rendimiento y sus componentes para plantas de tomate manejadas en semillero con contenedores de 250 cm³ y luz suplementaria desde los 20 hasta los 60 días después de la siembra.

FV	GL	Número de flores/planta	Número de frutos/planta	Peso de fruto	Rendimiento
Bloque	3	1.02 ^{NS}	4.66 ^{**}	281 [*]	96,052 ^{**}
Periodo de aplicación	3	0.35 ^{NS}	0.12 ^{NS}	93.8 ^{NS}	15,749 ^{NS}
Posición de lámparas	3	3.72 ^{**}	2.45 [*]	57.6 ^{NS}	28,256 ^{NS}
Periodo × Posición	9	1.52 ^{NS}	0.83 ^{NS}	98.4 ^{NS}	29,377 ^{NS}
Error	45	0.75	0.9	89.6	21,952
CV (%)		5.19	0.24	8.18	8.46
Media general		16.7	15.2	116 g	1751 g

*: significativo ($P \leq 0.05$), **: altamente significativo ($P \leq 0.01$), NS: no significativo, FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación.

Cuadro 4. Comparaciones de medias de rendimiento y sus componentes para plantas de tomate manejadas en semillero con contenedores de 250 cm³ y luz suplementaria desde los 20 hasta los 60 días después de la siembra.

Tratamiento	Número de flores/planta	Número de frutos/planta	Peso de fruto (g)	Rendimiento (g/planta)
Periodo de aplicación				
Testigo (sin aplicación)	16.7 a	15.2 a	113 a	1719 a
Diurno	16.8 a	15.2 a	114 a	1735 a
Nocturno	16.8 a	15.2 a	117 a	1791 a
Diurno + Nocturno	16.5 a	15.1 a	118 a	1759 a
DSH (0.05)	0.81	0.89	8.9	140
Posición de las lámparas				
Testigo (sin aplicación)	16.7 ab	15.2 ab	113 a	1719 a
Superior	17.4 a	15.7 a	116 a	1809 a
Inferior	16.5 b	14.8 b	117 a	1721 a
Superior + inferior	16.2 b	15.1 ab	117 a	1755 a
DSH (0.05)	0.81	0.89	8.9	140

Medias con la misma letra dentro de la columna, dentro de cada factor de variación, son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$), DSH: diferencia significativa honesta.

CONCLUSIONES

Con la luz LED blanca suplementaria, aplicada durante el día y bajo el dosel, se redujo la altura y el área foliar de plántulas de tomate, características que favorecieron la obtención de plantas de buena calidad para un trasplante tardío hasta los 60 días después de la siembra. En cuanto a su efecto en variables reproductivas, no se logró incrementar el número de flores por planta con respecto al testigo. La prolongación del trasplante hasta los 60 días después de la siembra redujo el periodo de cultivo en el invernadero a sólo 85 días, lo que potencialmente permite la obtención de hasta cuatro ciclos de producción por año con un incremento en el rendimiento anual por m².

BIBLIOGRAFÍA

- Craver J. K. and R. G. López (2016) Control of morphology by manipulating light quality and daily light integral using LEDs. *In: Led Lighting for Urban Agriculture*. T. Kozai, K. Fujiwara and E. Runkle (eds.). Springer. Singapore. pp:203-217, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_15
- Filipo R. V. H., H. B. Cano G. y J. A. Chaves O. (2010) Aplicaciones de iluminación con LEDs. *Scientia et Technica* 16:13-18.
- Heuvelink E., T. Li and M. Dorais (2018) Crop growth and yield. *In: Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:89-136, <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0089>
- Heuvelink E. and R. C. O. Okello (2018) Developmental processes. *In: Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:59-88, <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>
- Jishi T. (2018) LED lighting technique to control plant growth and morphology. *In: Smart Plant Factory* T. Kozai (ed.). Springer. Singapore. pp:211-222, https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_14
- Kozai T. (2016) Transplant production in closed systems. *In: Plant Factory*. T. Kozai, G. Niu and M. Takagaki (eds.). Elsevier. San Diego, California, USA. pp:237-250.
- Kubota C., A. de Gelder and M. M. Peet (2018) Greenhouse tomato production. *In: Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:276-313, <https://doi.org/https://doi.org/10.1079/9781780641935.0276>
- Momokawa N., Y. Kadono and H. Kudoh (2011) Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany* 108:1299-1306, <https://doi.org/10.1093/aob/mcr236>
- Moreno-Pérez E. C., F. Sánchez-del Castillo, M. Ruíz-Díaz y E. Contreras-Magaña (2021) Efecto de densidades de población y aplicaciones de paclobutrazol en calidad de plántula y rendimiento en jitomate. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 27:5-17, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>
- Sánchez C. F. y E. C. Moreno P. (2017) Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 405 p.
- Sánchez-del Castillo F., E. C. Moreno-Pérez, J. C. Vázquez-Rodríguez y M. A. González-Núñez (2017) Densidades de población y niveles de despunte para variedades contrastantes de jitomate en invernadero. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 23:163-174, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2017.01.003>
- Sánchez-del Castillo F., E. C. Moreno-Pérez and E. Contreras-Magaña (2012) Development of alternative commercial soilless production systems - I. Tomato. *Acta Horticulturae* 947:179-187, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.22>
- Sánchez-del Castillo F., L. Portillo-Márquez, E. C. Moreno-Pérez, J. J. Magdaleno-Villar y J. C. Vázquez-Rodríguez (2021) Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 27:71-84, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.016>

- SAS Institute (2002)** SAS/STAT® 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 5121 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021)** Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierre-agricola> (Noviembre 2021).
- Taiz L., E. Zeiger, I. M. Møller and A. Murphy (2018)** Fundamentals of Plant Physiology. Oxford University Press. New York, USA. 561 p.
- Takahashi S. and M. R. Badger (2011)** Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. *Trends in Plant Science* 16:53-60, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.001>
- Tewolde F. T., K. Shiina, T. Maruo, M. Takagaki, T. Kozai and W. Yamori (2018)** Supplemental LED inter-lighting compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine. *PLoS ONE* 13:e0206592, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206592>