

Efecto de diferentes espectros e intensidades luminosas de lámparas LED en el crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate

Effect of different spectra and light intensities of LED lamps on the growth and development of tomato seedlings

Germán Darío Aguado*

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Mendoza, Argentina

Mariano Iván Funes Pinter

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Mendoza, Argentina; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Federico Sebastián De Biazi

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Mendoza, Argentina

Gabriel Enrique Pisi

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Mendoza, Argentina

Ernesto Martín Uliarte

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Mendoza, Argentina

Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Continua

vol. 123, 2024

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 11 marzo 2024

Aprobación: 22 mayo 2024

Publicación: diciembre 2024

URL: <http://portal.amelica>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e147>

Autor de correspondencia: aguado.german@inta.gob.ar

Resumen

La calidad de las plántulas en especies hortícolas influye luego del trasplante en el rendimiento y calidad de los cultivos. La luz artificial generada por diodos emisores de luz, permite producir plántulas fuera de temporada y en sistemas de granjas verticales. La composición del espectro de radiación y la intensidad proporcionada, son factores determinantes durante el ciclo de producción. En el presente trabajo, se evaluó el efecto de tres composiciones lumínicas obtenidas por variación de las proporciones de longitudes de onda (rojo, azul, verde, violeta y rojo lejano); y tres niveles de intensidad de luz (240, 160, 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), en el crecimiento y calidad de plántulas de tomate, entre agosto y septiembre de 2021 en un módulo de cultivo sin luz externa ubicado en Luján de Cuyo, Mendoza. La biomasa de las plántulas no se diferenció frente a los distintos espectros evaluados, mientras que la intensidad lumínica más elevada generó un mayor rendimiento en peso fresco y seco total. La biomasa de raíces mostro una tendencia decreciente al disminuir la intensidad lumínica y se obtuvo mayor altura de plántulas en los tratamientos con 240 y 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Se verificó un incremento del Índice Relativo de Clorofila en los tratamientos con mayor proporción de luz azul, mientras que las intensidades de 240 y 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, generaron los valores significativamente superiores. Este estudio establece una base para futuras investigaciones enfocadas en la optimización del recurso lumínico en la producción de plántulas hortícolas.

Palabras clave: iluminación artificial, intensidad lumínica, espectro de radiación, producción de plántulas, *Solanum lycopersicum* L.

Abstract

Seedling quality in horticultural species influences crop yield and quality after transplanting. Artificial light generated by light-emitting diodes (LED) makes it possible to produce seedlings out of season and in vertical farm systems. The composition of the radiation spectrum and the intensity provided are determining factors during the production cycle. The trial conducted between August and September 2021 in a cultivation module without external light located in Luján de Cuyo, Mendoza, evaluated the effect of three light compositions obtained by varying the proportions of wavelengths (red, blue, green, violet, and far red); and three levels of light intensity (240, 160, 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), on the growth and quality of tomato seedlings. Seedling biomass did not differ for the different spectra evaluated, while the highest light intensity generated a higher yield in total fresh and dry weight. Root biomass showed a decreasing trend with decreasing light intensity and greater seedling height was obtained in the treatments with 240 and 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. An increase in the Relative Chlorophyll Index was verified in the treatments with a higher proportion of blue light, while the intensities of 240 and 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, generated significantly higher values. This study establishes a basis for future research focused on the optimization of light resources in seedling production.

Key words: artificial illumination, light intensity, radiation spectrum, seedling production, *Solanum lycopersicum* L.

INTRODUCCIÓN

La calidad de las plántulas constituye un factor esencial en la producción agrícola, particularmente en el contexto de los cultivos hortícolas, ya que incide de manera significativa en la calidad y el rendimiento de dichos cultivos tras el proceso de trasplante (Wei, 2018). El uso de luz artificial permite producir plántulas fuera de temporada en invernaderos de alta tecnología, y en sistemas de granjas verticales donde la intensidad o la duración de la luz natural son insuficientes (Vargas, 2014; Mendoza Paredes et al., 2021; Pérez y Morales Fonseca, 2021).

Durante las últimas décadas, la tecnología de iluminación ha experimentado un cambio significativo con la introducción y adopción de la iluminación con diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) en cultivos hortícolas. El uso de iluminación LED diseñada para la horticultura con alta eficiencia energética, ha despertado un gran interés debido a su potencial para influir en el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que permite la suplementación lumínica con distintos espectros en función de la especie cultivada, su estado fenológico y el manejo agronómico programado (Van Ieperen, 2012; Urrestarazu et al., 2016; Paucek et al., 2020).

La luz captada por las plantas genera diversas respuestas frente a la composición del espectro lumínico disponible (Schuerger et al., 1997). Estos espectros presentan distintas longitudes de onda que activan procesos fotosintéticos, donde las plantas logran la conversión de materia inorgánica en materia orgánica, y procesos de fotomorfogénesis, los cuales influyen sobre sus patrones de crecimiento (Abidi et al., 2013; Zheng et al., 2019).

La iluminación con LED permite adaptar el espectro de radiación, seleccionando longitudes de onda específicas a fin de obtener atributos deseables en la producción, con distintos patrones de respuestas morfológicas, acumulación de biomasa y contenido de pigmentos en las plantas (Yeh y Chung, 2009; Park y Runkle, 2018; Naznin et al., 2019).

En general, las matrices de LED comerciales destinadas a cultivos vegetales fueron diseñadas principalmente con LED azules y rojos debido a su mayor eficiencia de fotones fotosintéticos (Hogewoning et al., 2010). A su vez, esta combinación de colores se corresponde con los picos de absorción de los principales pigmentos fotosintéticos (Zheng et al., 2019), lo que generó una amplia investigación sobre los efectos de distintas proporciones de luz roja y azul en diversos cultivos de hortalizas y flores (Hernández y Kubota, 2016; Naznin et al., 2019). No obstante, un estudio llevado a cabo por Kaiser et al. (2019), reveló que el reemplazo parcial de luz roja por luz verde genera un incremento en el crecimiento de las plantas con alta densidad foliar. Este hallazgo sugiere que los impactos conjuntos de un espectro lumínico en el desarrollo de las plantas superan la simple suma de los efectos individuales de las longitudes de onda en la eficiencia fotosintética.

Por su parte, la intensidad de la luz se destaca como uno de los factores ambientales más cruciales que influyen en el crecimiento de las plantas (Fukuda et al., 2008). Mientras que la luz de alta intensidad es benéfica, la luz de baja intensidad a menudo se presenta como un factor que puede inhibir su desarrollo, con efectos negativos en el crecimiento y fotomorfogénesis de las plantas (Steinger et al., 2003; Fan et al., 2013).

Los estudios realizados de la intensidad y calidad de la luz sobre plántulas hortícolas y la mayor disponibilidad de fuentes de iluminación LED, generan una oportunidad para acrecentar el conocimiento de regímenes de luz personalizados, que optimicen las respuestas productivas en ambientes sin luz natural o con reducida incidencia solar. A escala local, existen escasas experiencias comerciales en la producción de plantines hortícolas con fuente única de iluminación. En este sentido, resulta necesario desarrollar y adaptar diversas tecnologías para la provisión y manejo lumínico, que optimicen los procesos fisiológicos y ambientales de estos sistemas de producción. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de tres espectros lumínicos (LED) y tres intensidades de luz, sobre el crecimiento de plántulas de tomate, bajo ambiente controlado y en ausencia de luz solar. Se buscó determinar, mediante distintos manejos de iluminación en la producción de plantines, la relación óptima entre el recurso luz (composición y cantidad) y la producción de biomasa vegetal.

METODOLOGÍA

AMBIENTE DE CULTIVO Y MATERIAL VEGETAL

El estudio se realizó en un invernadero ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria de Mendoza del INTA, Luján de Cuyo, Mendoza (33° 00' 20" S, 68° 51' 54" O, 929 msnm) durante agosto y septiembre de 2021. En el módulo de cultivo se suprimió la luz externa con cubierta de polietileno

negro de 100 μm . La temperatura ambiental se reguló mediante un equipo de aire acondicionado frío-calor, obteniendo temperaturas entre 20,52 °C y 25,78 °C.

La siembra de tomate (*Solanum lycopersicum* L. var. "Platense"), se realizó el 11 de agosto de 2021, en bandejas de cultivo plásticas con 40 celdas (17,15 cm^3 por celda) disponiendo una semilla por celda, extraídas de tomates cultivados durante la temporada 2019-2020, en el INTA Mendoza. El sustrato de cultivo utilizado fue Cocomix (línea profesional, Carluccio, Bs. As., Argentina), compuesto por turba parda sphagnum, perlita y fibra de coco. El ciclo de producción de plántulas alcanzó los 31 días.

MANEJO DEL RIEGO Y NUTRICIÓN

Los riegos se realizaron periódicamente por inmersión de las bandejas de cultivo en recipientes de polipropileno con las soluciones nutritivas, manteniendo el sustrato en condiciones próximas a capacidad de campo. La nutrición se proporcionó con complejos nutritivos Rootex (8-46-5.5, Cosmocel, México) y fertilizante iniciador (10-52-10, Plant-Prod, Canadá), ambos disueltos a 1,5 g.l^{-1} en el agua de riego, efectuando dos aplicaciones semanales a partir de los 9 días después de siembra (dds). Complementariamente se aplicó, con idéntica frecuencia, una solución foliar nutritiva (Maxi-Grow, Cosmocel, México), con una concentración de 1,5 $\text{cm}^3.\text{l}^{-1}$.

TRATAMIENTOS DE LUZ Y DISEÑO ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño de parcelas divididas, donde la parcela mayor (factor principal) fue el tipo de luces LED, donde se utilizaron tres diferentes composiciones espectrales (identificadas en esta investigación con letras A, B y C, modelo Symphony, Lumenar, Bs.As. Argentina, Figura 1 y tabla 1) y la parcela menor (factor secundario), la intensidad de iluminación expresada en densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD, *Photosynthetic Photon Flux Density*; 240, 160, 90 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Se dispusieron dos repeticiones por tratamiento. Las luminarias fueron colocadas a 50 cm por sobre las bandejas de cultivo para la mayor intensidad de estudio (240 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) ajustada por un regulador de intensidad (*dimmer*), a 60 cm para lograr la irradiación media (160 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) y a 80 cm para la menor intensidad de iluminación (90 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

A fin de evitar la contaminación lumínica entre parcelas, los tratamientos lumínicos fueron aislados mediante paneles divisorios con cubierta de polietileno negro de 100 μm .

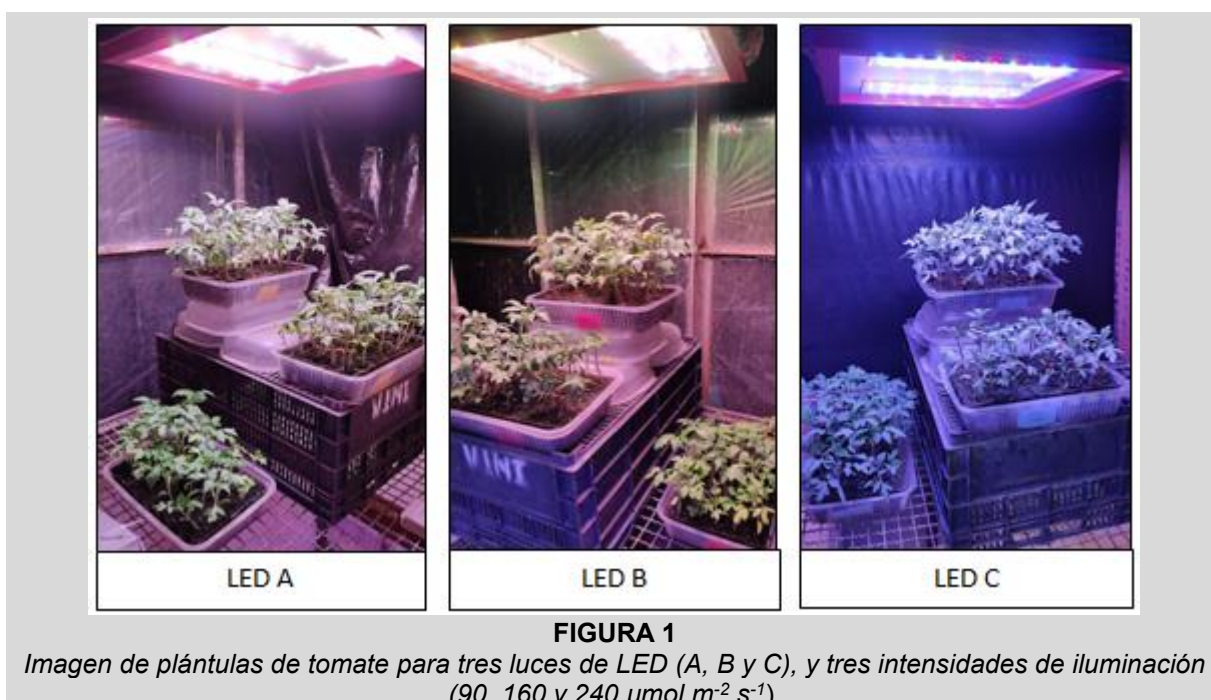


TABLA 1

Características de los paneles lumínicos. Porcentajes medidos respecto a la potencia emitida por cm² y relación A:V (azul: verde), R:RL (rojo: rojo lejano) y R:A (rojo: azul). Datos proporcionados por la empresa Desarrollo Especial SRL.

| | Rango (nm) | LED A | LED B | LED C |
|-------------|------------|--------|--------|--------|
| Violeta | 380-420 | 4,41% | 0,02% | 2,43% |
| Azul | 420-490 | 28,72% | 12,41% | 35,85% |
| Verde | 500-570 | 24,81% | 20,24% | 19,46% |
| Rojo | 620-700 | 33,80% | 60,54% | 31,74% |
| Rojo Lejano | 700-750 | 8,26% | 7,65% | 7,42% |
| | A:V | 1,16 | 0,61 | 1,84 |
| Relaciones | R:RL | 4,09 | 7,91 | 4,28 |
| | R:A | 1,18 | 4,88 | 0,89 |

RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA RECIBIDA POR LAS PLÁNTULAS

La radiación fotosintéticamente activa expresada en densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD, por sus siglas en inglés *Photosynthetic Photon Flux Density*) recibida por las plántulas se determinó mediante un sensor puntual equipado con un medidor instantáneo de radiación (modelos LI-190 Quantum sensor y LI-250A, LI-COR, Nebraska, USA). Se realizaron tres mediciones durante el ciclo de producción de las plantas: 0, 7 y 20 dds), ubicando el sensor en el centro de cada bandeja; 3,5 cm por encima de la superficie sembrada en la medición inicial; y a la misma distancia por encima del límite superior foliar, en las mediciones posteriores.

Al comenzar el experimento los emisores LED se regularon con PPFD cercanas a 240 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para la mayor intensidad, en tanto los tratamientos con intensidades intermedia y baja recibieron valores cercanos a 160 y 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. El fotoperiodo ofrecido desde la siembra hasta los 7 dds fue de 10 horas. Posteriormente, se continuó con 14 horas diarias hasta los 20 dds y luego 16 horas hasta fin de ciclo.

A partir de la PPFD elegida y de las horas de luz ofrecidas, se calculó la integral de luz diaria (DLI, Daily Light Integral) que describe moles de fotones fotosintéticamente activos (partículas individuales de luz en el rango de 400-700 nm) que se entregan a un área específica (m^2), durante un período de 24 horas según la Ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1: } DLI = PPFD * 3.600 * \text{horas de luz por día} / 1.000.000$$

En la Tabla 2 se presenta la densidad de flujo de fotones fotosintéticos y las integrales de luz diaria, para los diferentes tratamientos de intensidad y espectro lumínico durante el ciclo de producción de plántulas de tomate.

MONITOREO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN LA CÁMARA DE CRECIMIENTO

El seguimiento de temperatura y humedad relativa en el sitio de experimentación se realizó a través de un registrador de datos con sensores (modelo HOBO MX2301, marca ONSET, Massachusetts, USA), ubicado en el centro de la cámara de crecimiento a dos metros de altura. Se registraron datos cada media hora, obteniendo las temperaturas mínimas, medias y máximas diarias, como así también la humedad relativa promedio diaria (Figura 2). Las condiciones ambientales promedio en las cámaras se caracterizaron por temperaturas mínimas de 20,52 °C, máximas de 25,78 °C y medias de 22,50 °C. En tanto, la humedad relativa del aire fue de 30,31%.

DETERMINACIÓN DE BIOMASA Y ESTIMACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS

A fin de comprobar la biomasa producida a los 31 dds, se determinó el peso fresco y seco (estufa a 68°C hasta peso constante) de diez plantas de cada parcela experimental, diferenciando la porción radicular (previo lavado de raíces) y foliar. Además, se midió la altura de plántula desde el límite distal aéreo al ápice vegetativo y el Índice Relativo de Clorofila mediante un método no destructivo, utilizando un medidor de clorofila portable (modelo Clorofilio, marca Cavadevices, Bs.As., Argentina), el cual provee un índice expresado en unidades SPAD. La medición se realizó a los 30 días después

de la siembra, en las primeras hojas verdaderas de diez plantas, obteniendo un valor promedio por cada parcela experimental.

TABLA 2

Radiación fotosintéticamente activa expresada en PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density) al momento de la siembra, e integral de luz diaria (DLI; Daily Light Integral) calculada para tres periodos del ciclo de producción (dds; días después de siembra) y promedio del ciclo, para tres tipos de luminarias (ver Tabla 1) y tres intensidades de luz.

| Luminaria | Factor Intensidad | PPFD 0 | DLI 0-7 | DLI 7-20 | DLI 20-31 | DLI Promedio |
|-----------|-------------------|--|---|----------|-----------|--------------|
| | | dds | dds | dds | dds | |
| | | ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) | (mol.m ⁻² .dia ⁻¹) | | | |
| LED A | Alta | 240,5 | 8,7 | 14,4 | 23,0 | 15,4 |
| | Media | 159,5 | 5,7 | 9,0 | 13,1 | 9,3 |
| | Baja | 88,5 | 3,2 | 4,7 | 6,0 | 4,6 |
| LED B | Alta | 241,5 | 8,7 | 14,3 | 21,9 | 15,0 |
| | Media | 162,5 | 5,9 | 8,9 | 13,0 | 9,2 |
| | Baja | 90,0 | 3,2 | 4,5 | 6,1 | 4,6 |
| LED C | Alta | 240,5 | 8,7 | 13,2 | 23,0 | 15,0 |
| | Media | 155,5 | 5,6 | 8,4 | 12,3 | 8,8 |
| | Baja | 86,0 | 3,1 | 4,4 | 5,9 | 4,5 |

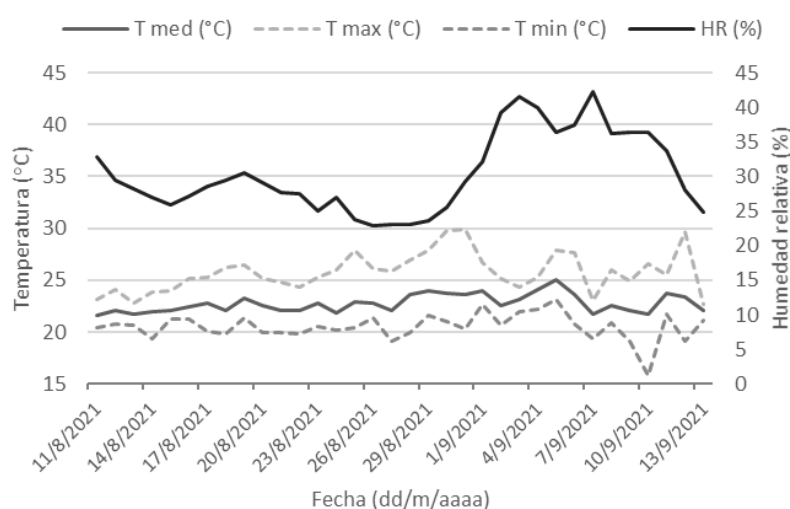


FIGURA 2

Evolución de la temperatura y humedad relativa durante el ciclo de producción de plántulas.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los datos se empleó el software INFOSTAT (2020e). Se realizó análisis de varianza y las diferencias entre valores medios se estudiaron mediante prueba de diferencia mínima significativa (LSD Fischer), considerando un nivel de significación de $\alpha=0,05$.

RESULTADOS

BIOMASA VEGETAL

En el presente estudio, no se presentó interacción entre las intensidades ensayadas y las diferentes distribuciones espectrales lumínicas de las lámparas LED estudiadas. Asimismo, no se obtuvieron diferencias significativas para el peso seco y el peso fresco de las plántulas cultivadas bajo una misma intensidad de luz, como tampoco en las porciones radical y foliar (Tabla 3). En tanto, se observaron tendencias de mayor desarrollo de biomasa total en las parcelas tratadas con el LED A, y para una misma intensidad de luz.

Por su parte, las intensidades de luz ofrecidas (PPFD), generaron diferencias estadísticas para la biomasa seca y fresca total, como también en el peso seco foliar dentro de cada tipo de luminaria. Las parcelas que recibieron mayor intensidad lumínica ($240 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) tuvieron el mejor desempeño, diferenciándose de las otras dos intensidades de luz. En tanto, el menor rendimiento se obtuvo en plantas con mínima oferta de luz ($90 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Tabla 3).

TABLA 3

Componentes de rendimiento en plántulas de tomate expresados en: peso fresco y seco de raíz, foliar y total (ciclo de producción de 31 días). Los valores medios con una letra común no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; LSD Fisher). Los valores +/- posteriores al promedio corresponden al error estándar.

| LED | Intensidad | Peso fresco total (mg) | Peso seco total (mg) | Peso seco raíz (mg) | Peso seco foliar (mg) |
|-----|------------|------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| A | Alta | 1899 ± 47 a | 226 ± 7 a | 44 ± 4 a | 182 ± 11 a |
| | Media | 1044 ± 281 b | 121 ± 18 b | 20 ± 3 bcd | 101 ± 15 b |
| | Baja | 809 ± 25 b | 77 ± 9 b | 14 ± 1 d | 63 ± 9 b |
| B | Alta | 1543 ± 341 a | 193 ± 53 a | 37 ± 3 abc | 156 ± 41 a |
| | Media | 891 ± 189 b | 113 ± 26 b | 24 ± 8 abcd | 89 ± 18 b |
| | Baja | 659 ± 53 b | 63 ± 1 b | 12 ± 2 d | 51 ± 2 b |
| C | Alta | 1590 ± 26 a | 197 ± 13 a | 39 ± 9 ab | 158 ± 3 a |
| | Media | 894 ± 111 b | 105 ± 12 b | 17 ± 4 cd | 88 ± 9 b |
| | Baja | 966 ± 161 b | 88 ± 10 b | 18 ± 2 cd | 70 ± 5 b |

La biomasa de raíces mostro una tendencia decreciente al disminuir la intensidad lumínica, con diferencias significativas para el tratamiento de mayor cantidad de luz y en las lámparas A y C (Tabla 2). Aquí se destaca la importancia que tiene la cantidad de luz dosificada a las plantas para su desarrollo radical, con un alveolo completamente ocupado por raíces, factor que determina un mayor potencial para el establecimiento del cultivo luego del trasplante.

ALTURA DE PLÁNTULAS

La altura de las plántulas no fue afectada por las lámparas diseñadas con diferentes espectros de luz ($p=0,4598$) (Figura 3). En tanto, las intensidades de luz generaron una respuesta diferencial en la altura de la planta ($p=0,0028$). En general, se obtuvo mayor altura en los tratamientos con 240 y $90 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, mientras que las plántulas sometidas a la intensidad intermedia alcanzaron menor longitud (Figura 3 y 4).

Las fuentes LED A y C generaron diferentes alturas entre las plántulas tratadas con intensidades alta y media, pero ello no ocurrió para la intensidad baja, cuyos resultados fueron estadísticamente similares a la mayor intensidad proporcionada.

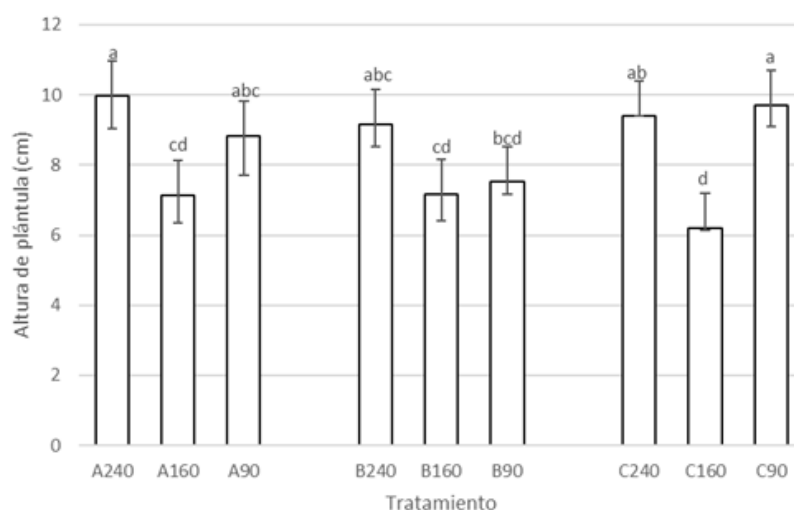


FIGURA 3

Altura plántulas de tomate (cm) para cada luminaria (A, B y C) para las distintas intensidades de luz estudiadas (90, 160 y 240 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Las barras representan los valores medios y el error estándar. Los valores medios con una letra común no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; LSD Fisher).

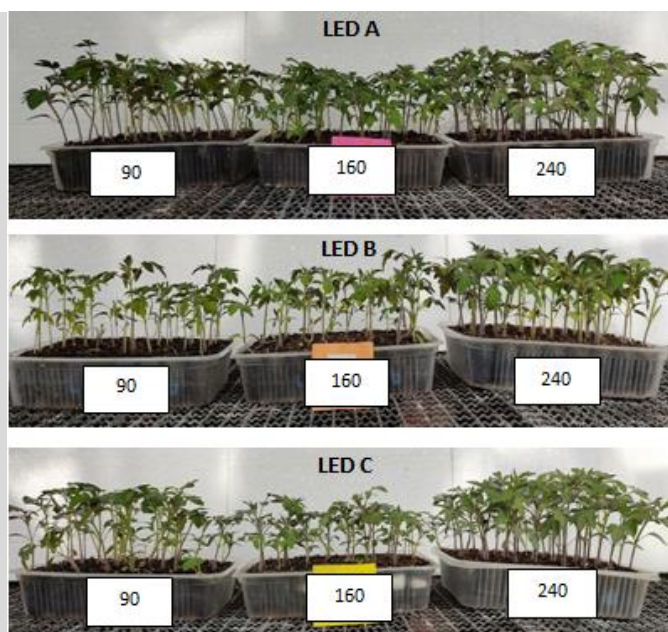


FIGURA 4

Imagen comparativa de altura de plántulas de tomate para tres tipos de LEDs (A, B y C), y tres intensidades de iluminación (90, 160 y 240 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (imágenes tomadas a los 30 dds).

ESTIMACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS

El Índice Relativo de Clorofila (IRC) fue afectado por el tipo de LED evaluado ($p=0,0213$) y por la intensidad de luz ($p=0,0005$). En tanto, la interacción no mostró diferencias significativas ($p=0,9224$).

En la Figura 5 a, se muestra un IRC superior al utilizar el LED C, cuyo diseño presenta una mayor proporción de luz azul (35,85%) respecto del LED A (28,72% de azul), aunque sin diferenciarse estadísticamente, y en LED B (12,41% de azul) cuyos valores de IRC fueron significativamente inferiores.

Por su parte, las plántulas que recibieron luz con intensidades de 240 y 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, alcanzaron valores de IRC significativamente superiores a las que recibieron menor intensidad de luz (Figura 5 b).

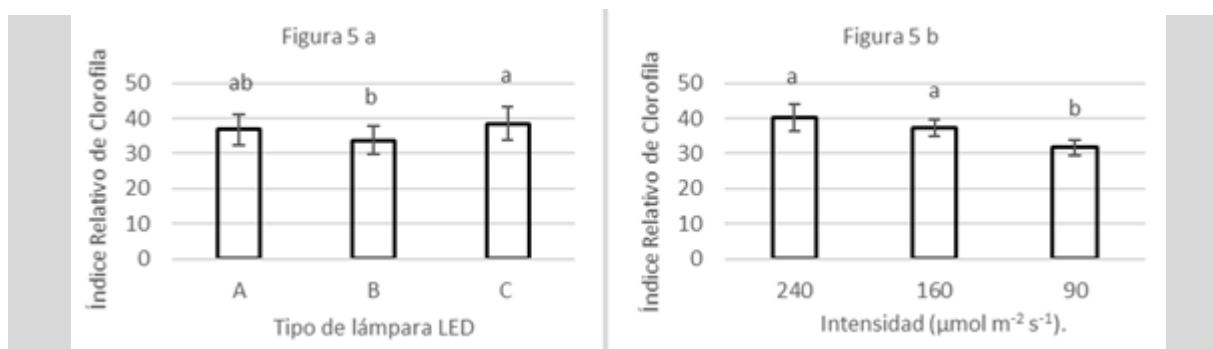


FIGURA 5

Índice Relativo de Clorofila en plántulas de tomate, obtenidos para tres tipos de lámparas (A, B y C) y tres intensidades de iluminación. Los valores medios con una letra común no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; LSD Fisher). 5 a. Tipo de lámpara LED. 5 b. Intensidad lumínica.

DISCUSIÓN

En el presente estudio, las mayores intensidades lumínicas tuvieron un efecto positivo sobre el crecimiento de los plantines de tomate, mientras que esta variable no fue afectada por los diferentes espectros ensayados. En este sentido, se ha demostrado que, a bajos niveles de radiación, la acumulación de biomasa y la tasa de asimilación de CO_2 son limitadas (Zavala y Ravetta, 2001), mientras que intensidades de 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ o más y 12 h de luz (DLI 12,96), generaron valores superiores de peso seco, consecuencia de una mayor tasa neta de fotosíntesis (Fan et al., 2013).

Por otra parte, los espectros ensayados no tuvieron efecto sobre la altura de las plántulas. Al respecto, distintos autores informaron una reducción de la longitud del tallo causada por el aumento del porcentaje de azul, cuando utilizaron matrices de LED rojo y azul, en plántulas de pepino (Hernández y Kubota, 2016), pimiento (Brown et al., 1995) y tomate (Hernández y Kubota, 2012; Nanya et al., 2012; Wollaeger y Runkle, 2014; Hernández et al., 2016); sin embargo, en el presente estudio, las proporciones de LED rojos y azules dispuestas en las luminarias, son inferiores a las utilizadas en aquellas investigaciones, situación generada por la incorporación de otras longitudes de onda no empleadas por los citados autores.

La intensidad lumínica mostró un efecto diferencial en la elongación de la plántula, siendo las intensidades menores y mayores, las que presentaron alturas superiores. Estos efectos podrían resultar de un ajuste fotomorfogénico que las plantas realizan como consecuencia de la falta de luz o "escape a la sombra" (Smith, 1982; Runkle y Heins, 2001), evento desencadenado con 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que en tratamientos con intensidades de 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, las plántulas no alcanzarían a activar este mecanismo de ajuste del crecimiento (Figura 3 y 4). Al respecto, en estudios que evaluaron distintas intensidades crecientes de 50 a 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ sobre tomates cherry (Fan et al., 2013), se comprobó un incremento significativo de la altura por debajo de 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y DLI de 8,6; mientras que sobre 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, las plantas presentaron una óptima estatura y mayor tasa neta de fotosíntesis.

En el presente trabajo las plantas sometidas a una intensidad de 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ no presentaron el fenotipo de "escape de la oscuridad", como sí lo presentaron las plantas de tomate cherry sometidas a 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en otros experimentos (Fan et al., 2013).

El incremento en las lecturas del índice de clorofila (IRC) detectado al disponer de mayor intensidad lumínica y con mayor proporción de luz azul (LED C), permite estimar un incremento en el contenido de clorofila presente en la hoja (Argenta et al., 2001). Estos resultados son similares a los reportados por Moreno Jiménez et al. (2017); quienes verificaron los beneficios de la luz LED azul en el desarrollo foliar de las plántulas y en el aumento de la producción de pigmentos fotosintéticos.

Todos los tratamientos se expusieron a la misma cantidad de horas de luz y las intensidades evaluadas modificaron la integral de luz diaria (Tabla 2), con un manifiesto incremento del IRC asociado a la mayor oferta lumínica. Esta respuesta, se debería a la aclimatación de las plantas frente a cambios en la cantidad de luz, modificando el desarrollo de las células de las hojas, la acumulación de componentes del cloroplasto, y un óptimo desarrollo de los tejidos del mesófilo (Weston et al., 2000; Fan et al., 2013). Resultados similares se encontraron en plantas de lechuga, donde el aumento en la integral de luz diaria generó incrementos en la concentración relativa de clorofila (Kelly et al., 2020).

CONCLUSIONES

Esta investigación reveló respuestas frente al uso de lámparas LED con diferentes espectros de luz y distintas intensidades luminosas, en el crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate, focalizadas en la producción de biomasa vegetal, la altura de las plantas y la estimación de pigmentos fotosintéticos.

En relación con la biomasa vegetal, las lámparas LED con distinto espectro evaluadas, no generaron diferencias en el peso seco y fresco de las plántulas, mientras que las intensidades de luz tuvieron un impacto en la biomasa seca y fresca total. Se evidenció que mayores intensidades lumínicas resultaron en un mayor rendimiento, destacando la importancia de una oferta adecuada de luz para la acumulación de biomasa.

En cuanto a la altura de las plantas, las lámparas con diferentes espectros no tuvieron un efecto, pero las diferentes intensidades de luz generaron respuestas diferenciadas. Las plántulas expuestas a mayores intensidades luminosas alcanzaron mayor altura, indicando una relación directa entre la intensidad de la luz y el desarrollo morfológico. Se destacó la importancia de la cantidad de luz para evitar ajustes morfológicos que podrían afectar el crecimiento de las plantas.

La estimación de pigmentos fotosintéticos reveló que el espectro (tipo de LED) y la intensidad de luz afectaron el Índice Relativo de Clorofila (IRC). Las lámparas con mayor proporción de luz azul resultaron en un mayor contenido de clorofila, y las plántulas expuestas a intensidades lumínicas más altas mostraron valores superiores de IRC. Estos resultados sugieren una adaptación positiva de las plantas a la cantidad de luz, afectando el desarrollo celular y la acumulación de componentes del cloroplasto.

En conjunto, estos hallazgos subrayan la importancia de la cantidad y calidad de la luz en el crecimiento y desarrollo de las plántulas. Estos resultados tienen implicancias prácticas significativas para la optimización de las condiciones de cultivo en ambientes controlados, destacando la necesidad de considerar la personalización del espectro al utilizar tecnologías LED en el diseño de estos sistemas.

Este estudio proporciona una base para futuras investigaciones centradas en la optimización de las condiciones lumínicas para la producción de plántulas. Es necesario profundizar los estudios relacionados al efecto de diseños espectrales en la producción de plántulas de tomate en particular, como horticolas en general asociada a cultivos de interior en modelos de agricultura vertical.

Agradecimientos

A la empresa Desarrollo Especial SRL por su aporte en el diseño y facilitación de las luminarias destinadas a la investigación. El ensayo fue financiado por los proyectos "Intensificación sostenible de la horticultura en Mendoza y San Juan" e "Intensificación sostenible de los sistemas bajo cubierta", ambos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

BIBLIOGRAFÍA

Abidi, F., Girault, T., Douillet, O., Guillemain, G., Sintès, G., Laffaire, M., Ben Ahmed, H., Smiti S., Huché-Thélier, L. y Leduc, N. (2013). Blue light effects on rose photosynthesis and photomorphogenesis. *Plant Biology*, 15(1), 67-74 <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00603.x>
Argenta, G., Silva, P. R. F. D., Bortolini, C. G., Forsthofer, E. L. y Strieder, M. L. (2001). Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho.

- Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 13(2), 158-167. <https://doi.org/10.1590/S0103-31312001000200005>
- Brown, C. S., Schuerger, A. C. y Sager, J. C. (1995). Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(5), 808-813. <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.5.808>
- Fan, X. X., Xu, Z. G., Liu, X. Y., Tang, C. M., Wang, L. W. y Han, X. L. (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*, 153, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.017>
- Fukuda, N., Fujita, M., Ohta, Y., Sase, S., Nishimura, S. y Ezura, H. (2008). Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *Scientia Horticulturae*, 115(2), 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.08.006>
- Hernández, R. y Kubota, C. (2012). Tomato seedling growth and morphological responses to supplemental LED lighting red: blue ratios under varied daily solar light integrals. *Acta Horticulturae*, 956, 187-194. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.19>
- Hernández, R. y Kubota, C. (2016). Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001>
- Hernández, R., Eguchi, T., Deveci, M. y Kubota, C. (2016). Tomato seedling physiological responses under different percentages of blue and red photon flux ratios using LEDs and cool white fluorescent lamps. *Scientia Horticulturae*, 213, 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.005>
- Hogewoning, S. W., Douwstra, P., Trouwborst, G., Van Ieperen, W. y Harbinson, J. (2010). An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of Experimental Botany*, 61(5), 1267-1276. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq005>
- Kaiser, E., Weerheim, K., Schipper, R. y Dieleman, J. A. (2019). Partial replacement of red and blue by green light increases biomass and yield in tomato. *Scientia Horticulturae*, 249, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.005>
- Kelly, N., Choe, D., Meng, Q. y Runkle, E. S. (2020). Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod. *Scientia Horticulturae*, 272, 109565. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109565>
- Mendoza-Paredes, J. E., Castillo-González, A. M., Avitia-García, E., García-Mateos, M. R. y Valdéz-Aguilar, L. A. (2021). Efecto de diferentes proporciones de luz LED azul:roja en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Biotecnía*, 23(1), 110-119. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i1.1288>
- Moreno-Jiménez, A. M., Loza-Cornejo, S. y Ortiz-Morales, M. (2017). Efecto de luz LED sobre semillas de *Capsicum annuum* L. var. serrano. *Biotecnología Vegetal*, 17(3), 145-151.
- Nanya, K., Ishigami, Y., Hikosaka, S. y Goto, E. (2012). Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Horticulturae*, 956, 261-266. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.29>
- Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V. y Azad, M. O. K. (2019). Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content, and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper in a controlled environment. *Plants*, 8(4), 93. <https://doi.org/10.3390/plants8040093>
- Park, Y. y Runkle, E. S. (2018). Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth, visual color quality, and photosynthetic photon efficacy: White versus blue plus red radiation. *PLoS One*, 13(8): e0202386. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202386>
- Paucek, I., Pennisi, G., Pistillo, A., Appolloni, E., Crepaldi, A., Calegari, B., Spinelli, F., Cellini, A., Gabarrell, X., Orsini, F. y Gianquinto, G. (2020). Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the Mediterranean. *Agronomy*, 10(7), 1002. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071002>
- Pérez, D. A. y Morales-Fonseca, D. (2021). Granjas verticales como modelo de negocios verdes y sostenibles. *Revista De Investigación*, 14(1), 29-45.
- Runkle, E. S. y Heins, R. D. (2001). Specific functions of red, far red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(3), 275-282. <https://doi.org/10.21273/JASHS.126.3.275>
- Schuerger, A. C., Brown, C. S. y Stryjewski, E. C. (1997). Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Annals of Botany*, 79(3), 273-282. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0341>

- Smith, H. (1982). Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology*, 33(1), 481-518. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.002405>
- Steinger, T., Roy, B. A. y Stanton, M. L. (2003). Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. *Journal of evolutionary biology*, 16(2), 313-323. <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2003.00518.x>
- Urrestarazu, M., Nájera, C. y del Mar Gea, M. (2016). Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience*, 51(3), 268-271. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.3.268>
- Van Ieperen, W. (2012). Plant morphological and developmental responses to light quality in a horticultural context. *Acta Horticulturae*, 956, 131-139. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.12>
- Vargas, C. G. (2014). *Light-emitting diodes as an alternative supplemental lighting source for greenhouse tomato propagation and production*. [Doctoral dissertation, Purdue University].
- Wei, H., Hu, J., Liu, C., Wang, M., Zhao, J., Kang, D. I. y Jeong, B. R. (2018). Effect of supplementary light source on quality of grafted tomato seedlings and expression of two photosynthetic genes. *Agronomy*, 8(10), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100207>
- Weston, E., Thorogood, K., Vinti, G. y López-Juez, E. (2000). Light quantity controls leaf-cell and chloroplast development in *Arabidopsis thaliana* wild type and blue-light-perception mutants. *Planta*, 211(6), 807-815. <https://doi.org/10.1007/s004250000392>
- Wollaeger, H. M. y Runkle, E. S. (2014). Growth of Impatiens, Petunia, Salvia, and tomato seedlings under blue, green, and red light-emitting diodes. *HortScience*, 49(6), 734-740. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.6.734>
- Yeh, N. y Chung, J. P. (2009) High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2175-2180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.027>
- Zavala, J. A. y Ravetta, D. A. (2001). Allocation of photoassimilates to biomass, resin and carbohydrates in *Grindelia chilensis* as affected by light intensity. *Field Crops Research*, 69(2), 143-149. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00136-2)
- Zheng, L., He, H. y Song, W. (2019). Application of light-emitting diodes and the effect of light quality on horticultural crops: A review. *HortScience*, 54(10), 1656-1661. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14109-19>