

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA PROTEGIDA



TESIS:
INTEGRAL DE LUZ DIARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE
PLÁNTULA DE CHILE MORRÓN CON SISTEMA DE
ILUMINACIÓN LED

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRO EN
AGRICULTURA PROTEGIDA

PRESENTA:
JESÚS WILFREDO FÉLIX VEGA

DIRECTOR:
DR. FELIPE AYALA TAFOYA

CODIRECTOR:
DR. AZAREEL ANGULO CASTRO

CULIACÁN, SINALOA. NOVIEMBRE DE 2023



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



DEDICATORIAS

Dedicado a mi madre Sonia y a mi tío Onorio, a quienes agradezco el siempre apoyarme y motivarme para salir y conseguir lo que me propusiera, no me alcanzaría una vida para agradecer lo que gracias a su ayuda estoy logrando y lo que voy a lograr. Dedicado a todas aquellas personas que sin importar no tener lazos de sangre conmigo, me ayudaron en este largo camino llamado vida a fortalecerme durante todas las pruebas que se me han puesto, agradezco los consejos y regaños los cuales recordaré por siempre y los llevaré en mi mente a donde me lleve el destino y lo que Dios disponga para mí y cada uno de nosotros, espero algún día poder devolverles algo de lo que ustedes influyeron en mí para lograr mis metas, de todo corazón muchas gracias. De igual manera, a esas personas que me cuidan desde el cielo o en el lugar donde se encuentren, créanme que he sentido su presencia al momento de sentirme sin salida cuando la situación se pone casi imposible, sus recuerdos me hacen fuerte y me dan la calma suficiente para ser resiliente ante esta vida que está increíblemente llena de retos y oportunidades.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la manutención otorgada durante estos dos años la cual sirvió de gran manera para realizar esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Facultad de Agronomía, que me brindaron sus instalaciones para poder realizar esta investigación.

A Dios por seguirme dando salud y sabiduría en los momentos difíciles.

A mi madre porque desde que nací ha estado dándome ánimos y consejos, no terminaría jamás de agradecer todo lo que ha hecho por mí.

Agradecido eternamente con mi tío Onorio, un extraordinario ser humano y sin duda un gran ejemplo a seguir.

A las familias Félix Ortiz y Vega Mendoza, agradecido por sus consejos y enseñanzas.

Al Doctor Felipe Ayala Tafoya, a quien le agradezco de manera eterna todos sus consejos y, sin lugar a duda, su paciencia para explicarme y enseñarme la importancia que tiene formarse como un buen investigador durante este proceso académico para la obtención del grado de Maestro en Agricultura Protegida.

Agradecer a los maestros: Dr. Azareel Angulo Castro, Dr. Moisés Gilberto Yáñez Juárez, Dr. Juan Martín Parra Delgado, Dr. Leonardo Román Román y al MC. Luis Ángel Serrano López, por sus consejos, enseñanzas y su disponibilidad de tiempo cuando solicité ayuda durante mi proceso de formación.

Agradecimiento a mis compadres y a todas las personas que formaron parte de esta investigación, maestros de clase, compañeros, amigos, familiares, etc., quienes me brindaron su apoyo y sus buenas vibras durante estos dos años de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Página |
|--|--------|
| ÍNDICE DE CUADROS..... | i |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ii |
| RESUMEN..... | iii |
| ABSTRACT..... | vi |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. HIPÓTESIS..... | 3 |
| III. OBJETIVOS..... | 3 |
| 3.1. Objetivo general..... | 3 |
| 3.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| IV. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| 4.1. Taxonomía del chile morrón..... | 4 |
| 4.2. Importancia económica..... | 4 |
| 4.3. Manejo agronómico de la plántula..... | 5 |
| 4.3.1. Siembra..... | 5 |
| 4.3.2. Riegos..... | 6 |
| 4.3.3. Fertilización..... | 6 |
| 4.4. Luz..... | 6 |
| 4.5. Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)..... | 7 |
| 4.6. Fotoperíodo..... | 7 |
| 4.7. Integral de luz diaria (DLI)..... | 8 |
| 4.8. Sistema de iluminación LED..... | 10 |
| V. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 12 |
| 5.1. Ubicación del área de estudio..... | 12 |
| 5.2. Manejo agronómico..... | 12 |
| 5.3. Diseño experimental..... | 13 |
| 5.4. Variables de estudio..... | 16 |
| 5.5. Análisis estadístico..... | 18 |
| VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 19 |
| 6.1. Altura y diámetro de tallo..... | 19 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.2. | Área e índice de verdor foliares | 22 |
| 6.3. | Índice de área foliar y peso seco de plántula..... | 24 |
| 6.4. | Volumen de raíz y relación raíz-vástago..... | 27 |
| 6.5. | Compacidad e índice de calidad de plántula..... | 31 |
| VII. | CONCLUSIONES..... | 35 |
| VIII. | LITERATURA CITADA..... | 36 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 1. Principales países productores de chile morrón..... | 5 |
| Cuadro 2. Diseño de tratamientos, en función de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), el fotoperíodo y la integral de luz diaria (DLI) resultante, utilizados para la producción de plántula de chile morrón..... | 14 |
| Cuadro 3. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre la altura y diámetro de tallo de la plántula de chile de morrón cultivada con iluminación de LED blancos..... | 21 |
| Cuadro 4. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre el área e índice de verdor foliares de la plántula chile de morrón cultivada con iluminación de LED blancos..... | 23 |
| Cuadro 5. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre el índice de área foliar y peso seco de la plántula chile de morrón cultivada con iluminación de LED blancos..... | 27 |
| Cuadro 6. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre el volumen de raíz y relación raíz-vástago de la plántula chile de morrón cultivada con iluminación de LED blancos..... | 31 |
| Cuadro 7. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre la compacidad e índice de calidad de plántula de chile de morrón cultivada con iluminación de LED blancos..... | 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Área del experimento | 12 |
| Figura 2. Siembra de semillas de chile morrón. | 13 |
| Figura 3. Distribución espectral de los LEDs blancos utilizados en el sistema de iluminación para la producción de plántula de chile morrón..... | 15 |
| Figura 4. Comportamiento de la temperatura y la humedad relativa durante el período de estudio..... | 16 |
| Figura 5. Disposición de las plántulas de chile morrón en las charolas con sustrato..... | 17 |
| Figura 6. Evaluación de plántula de chile morrón. | 18 |

RESUMEN

La producción de plántula en sistemas protegidos es una práctica agrícola que busca, mediante el uso de un ambiente controlado, optimizar las condiciones de crecimiento de las plántulas, en este caso forjando un mejor uso del factor luz al poder adecuar una integral de luz diaria (DLI) específica, hacer un mejor aprovechamiento del espacio de producción, manejo de las condiciones ambientales, ciclos de producción más cortos para la producción de plántulas con mejores características agronómicas para el trasplante. El presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de determinar cómo la iluminación con LEDs blancos influye en la producción de plántula de chile morrón (*Capsicum annuum* L.) dentro de una gama de DLI (8.6 hasta 22.68 mol m⁻² d⁻¹), obtenida mediante la combinación de una densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y un fotoperíodo. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 2x4, donde los factores y niveles de estudio fueron: PPFD de 200 y 350 μmol m⁻² s⁻¹ y fotoperíodo de 12, 14, 16 y 18 h d⁻¹. Se evaluaron un total de ocho tratamientos (DLI) con cuatro repeticiones cada uno. La siembra de chile morrón se llevó a cabo en charolas de poliestireno de 128 cavidades, con turba como sustrato, las cuales se colocaron dentro de cámaras de crecimiento con leds blancos, a partir de la emergencia de las plántulas. Las variables de estudio: altura de plántula, área foliar e índice de área foliar fueron más grandes con la interacción de la PPFD de 200 μmol m⁻² s⁻¹ y fotoperíodo de 14 h d⁻¹. El diámetro de tallo más grueso se logró con la PPFD de 200 μmol m⁻² s⁻¹, independientemente del fotoperíodo. La mayor acumulación de peso seco por plántula se obtuvo con la interacción de la PPFD de 350 o 200 μmol m⁻² s⁻¹ y el fotoperíodo de 14 h d⁻¹. La interacción de la PPFD de 350 μmol m⁻² s⁻¹ y fotoperíodo de 14 o 16 h d⁻¹ causó el más grande volumen radicular de las plántulas. Mientras que, relación raíz-vástago, compacidad e índice de calidad de plántula, fueron características que destacaron cuando la PPFD de 350 μmol m⁻² s⁻¹ se combinó con el fotoperíodo de 12 h d⁻¹.

ABSTRACT

The production of seedlings in protected systems is an agricultural practice that seeks, through the use of a controlled environment, to optimize the growth conditions of the seedlings, in this case making better use of the light factor by being able to adapt a daily light integral (DLI) specific, make better use of production space, management of environmental conditions, shorter production cycles for the production of seedlings with better agronomic characteristics for transplanting. The present study was carried out with the objective of determining how lighting with white LEDs influences the production of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings within a range of DLI (8.6 to 22.68 mol m⁻² d⁻¹), obtained by combining a photosynthetic photon flux density (PPFD) and a photoperiod. A completely randomized experimental design with a 2x4 factorial arrangement was used, where the study factors and levels were: PPFD of 200 and 350 μmol m⁻² s⁻¹ and photoperiod of 12, 14, 16 and 18 h d⁻¹. A total of eight treatments (DLI) with four repetitions each were evaluated. The sowing of bell pepper was carried out in 128-cavity polystyrene trays, with peat as a substrate, which were placed inside growth chambers with white LEDs, from the emergence of the seedlings. The study variables: seedling height, leaf area and leaf area index were larger with the interaction of the PPFD of 200 μmol m⁻² s⁻¹ and photoperiod of 14 h d⁻¹. The thickest stem diameter was achieved with the PPFD of 200 μmol m⁻² s⁻¹, regardless of the photoperiod. The greatest accumulation of dry weight per seedling was obtained with the interaction of the PPFD of 350 or 200 μmol m⁻² s⁻¹ and the photoperiod of 14 h d⁻¹. The interaction of the PPFD of 350 μmol m⁻² s⁻¹ and photoperiod of 14 or 16 h d⁻¹ caused the largest root volume of the seedlings. While root-shoot ratio, compactness and seedling quality index were characteristics that stood out when the PPFD of 350 μmol m⁻² s⁻¹ was combined with the photoperiod of 12 h d⁻¹.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial México es reconocido como uno de los principales productores de chile morrón (*Capsicum annuum* L.), el cual cuenta con una producción anual de 1.16 millones de toneladas obtenidas en 15,742 ha (SIAP, 2020).

La etapa de plántula y su posterior etapa de crecimiento en los cultivos hortícolas a menudo se separan debido a las diferencias en la densidad de plantas, las condiciones ambientales y las estrategias de control en la agricultura moderna (Johkan *et al.*, 2010; He *et al.*, 2020). Estudios previos han documentado que las plántulas compactas han dado lugar a plantas maduras vigorosas (Nakano *et al.*, 2017) y mayor rendimiento (Chang y Chang, 2014) en comparación con las plántulas débiles después del trasplante.

La luz juega un papel importante en la regulación de la fisiología de las plantas como fuente de energía para la fotosíntesis y como señal externa para activar y regular el crecimiento y desarrollo de las plantas (Paradiso y Proietti, 2022). Varios estudios han investigado la influencia de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD, por sus siglas en inglés) o el fotoperíodo en el crecimiento y desarrollo de plántulas de hortalizas cultivadas en agricultura vertical o en un invernadero (Yan *et al.*, 2019; Aguirre-Becerra *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021); sin embargo, estas dos variables no pueden reflejar de forma independiente las respuestas de la planta al entorno de luz. La integral de luz diaria (DLI, por sus siglas en inglés) representa la cantidad total de fotones fotosintéticos recibidos por la superficie de la planta durante un día, que puede aplicarse para predecir el rendimiento o ajustarse según las estrategias de manejo de los productores. Muchos estudios han evaluado un aumento en DLI, ya sea extendiendo el fotoperíodo al mismo PPFD (Pennisi *et al.*, 2020a) o aumentando el PPFD al mismo fotoperíodo (Dou *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2020; Pennisi *et al.*, 2020b). Se observaron relaciones lineales o funciones cuadráticas entre DLI y acumulación de biomasa (Ji *et al.*, 2020; Pennisi *et al.*, 2020a; Gao *et al.*, 2020) en plantas cultivadas en un sistema de producción cerrado. Sin embargo, la relación entre DLI y el crecimiento de las plántulas de chile morrón aún no está clara. Además, el

impacto de una amplia gama de DLI creados por varias combinaciones de PPFD y fotoperíodo en la calidad de las plántulas también requiere más estudio.

Las plantas que crecen bajo un ambiente de luz natural se han adaptado a utilizar un amplio espectro de luz solar mediante una evolución a largo plazo (Yan *et al.*, 2020). Chen *et al.* (2016) informaron que la influencia de la calidad de la luz monocromática en los cultivos hortícolas podría demostrarse de manera más objetiva y suficiente cuando se proporciona un espectro relativamente amplio, por ejemplo, mediante el uso de diodos emisores de luz (LED) blancos, que de acuerdo con Yan *et al.* (2019) presentan una mejor eficiencia de vida útil, la radiación fotosintéticamente activa que es generada es de mejor calidad dando resultados muy favorables a la agricultura moderna sobre la agricultura convencional. Además, estudios anteriores documentaron que el LED blanco tuvo un impacto similar en el crecimiento de las plantas asociado con una mayor eficiencia en el uso de energía y mejor evaluación visual en comparación con el LED rojo más azul (Runkle, 2018; Park y Yan *et al.*, 2020).

Debido al reducido número de estudios centrados en la DLI, es importante conocer cómo diferentes tipos de DLI interfieren en el crecimiento de la planta, la respuesta fisiológica y la eficiencia de los recursos en plántulas de hortalizas en diferentes etapas bajo LED blancos.

II. HIPÓTESIS

Es posible producir plántula de chile morrón de alta calidad con sistemas de iluminación LED de amplio espectro, si se conoce PPF, fotoperíodo y DLI específicos.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar cómo la iluminación con LEDs blancos influye la producción de plántula de chile morrón, dentro de una gama de DLI (8.6 hasta 22.68 mol m⁻² d⁻¹) obtenida con diferentes combinaciones de PPF y fotoperíodo.

3.2. Objetivos específicos

Conocer la influencia de PPF, fotoperíodo y DLI (interacción) sobre la altura y diámetro de tallo de la plántula de chile de morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

Determinar el efecto de PPF, fotoperíodo y DLI (interacción) sobre el área e índice de verdor foliares de la plántula chile de morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

Establecer el influjo de PPF, fotoperíodo y DLI (interacción) sobre el índice de área foliar y peso seco de la plántula chile de morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

Distinguir la influencia de PPF, fotoperíodo y DLI (interacción) sobre el volumen de raíz y relación raíz-vástago de la plántula chile de morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

Averiguar el efecto de PPF, fotoperíodo y DLI (interacción) sobre la compactidad e índice de calidad de plántula de chile de morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. El chile morrón

El chile morrón o pimiento (*Capsicum annum* L.) es una planta herbácea permanente, puede alcanzar aproximadamente una altura desde 0.5 m hasta 2 m. Dependiendo del tipo de variedad la raíz puede o no ser profunda alcanzado hasta los 40 cm de longitud, es una planta la cual posee un crecimiento en forma ascendente, con hojas de forma ovales o lanceoladas de color verde oscuro. Sus flores son pequeñas con corola de color blanco opaco, la polinización de la planta de chile morrón es autógama, el fruto puede ser de colores amarillo, verde, rojo, naranja, violeta y blanco, dependiendo de la variedad, su peso está en un intervalo entre 100 a 500 g (Parrales, 2015). A continuación, se describe la clasificación taxonómica del chile morrón.

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| Reino: | Plantae |
| Subreino | Traqueobionta (plantas vasculares) |
| Superdivisión: | Spermatophyta (plantas con semillas) |
| División: | Magnoliophyta (plantas con flor) |
| Clase: | Magnoliopsida (dicotiledóneas) |
| Subclase: | Asteridae |
| Orden: | Solanales |
| Familia: | Solanaceae |
| Subfamilia: | Solanoideae |
| Tribu: | Capsiceae |
| Género: | <i>Capsicum</i> |
| Especie: | <i>Capsicum annum</i> L., 1753 |

4.2. Importancia económica

El chile morron es una de las principales hortalizas dentro de la producción agrícola en el país mexicano. Según los datos de la División de Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT), se obtuvo

una superficie sembrada de chile morrón de aproximadamente de 29,604 hectáreas, donde la producción fue de 3,716,000 toneladas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Principales países productores de chile morrón.

| Posición | País | Área total (ha) | Producción total (t) |
|----------|----------------|-----------------|----------------------|
| 1 | China | 657,000 | 50,000,000 |
| 2 | México | 29,604 | 3,716,000 |
| 3 | Turquía | 21,206 | 2,740,000 |
| 4 | Indonesia | 20,000 | 2,500,000 |
| 5 | España | 14,000 | 1,130,000 |
| 6 | Estados unidos | 11,076 | 876,200 |
| 7 | Italia | 8,000 | 660,000 |
| 8 | Países Bajos | 4,000 | 540,000 |
| 9 | Egipto | 3,000 | 480,000 |
| 10 | Marruecos | 2,000 | 430,000 |

Fuente: FAOSTAT (2021).

4.3. Manejo agronómico de la plántula

El manejo agronómico adecuado de las plántulas de chile morrón, desde la siembra hasta la etapa de trasplante es fundamental para garantizar un buen crecimiento y una producción exitosa.

4.3.1. Siembra

Uno de los pasos fundamentales para el establecimiento del cultivo es realizar una siembra en charola de forma adecuada y algunos de los aspectos a tomar en consideración, de acuerdo con Granda (2023), son:

- **Selección de semillas.** Elige semillas de calidad, preferiblemente de variedades adaptadas a tu región y con buena germinación.
- **Preparación del sustrato.** Utilizar un sustrato liviano y bien drenado,

preferiblemente una mezcla de turba y perlita.

- **Siembra de las semillas.** Coloca las semillas a una profundidad de aproximadamente 1-2 cm en el sustrato.

4.3.2. Riegos

El riego adecuado de las plántulas es crucial para su crecimiento y desarrollo. *Cosíćet al.* (2015) encontraron que un riego adecuado cada 2-3 días causó un mejor crecimiento de las plántulas de chile pimiento. Además, se hace referencia a evitar el riego excesivo, ya que puede causar problemas de encharcamiento y afectar negativamente el crecimiento de las plántulas.

4.3.3. Fertilización

Realizar una fertilización balanceada, de acuerdo con las necesidades de la etapa de cualquier cultivo, genera una planta capaz de expresar mejor su potencial de adaptabilidad y producción. *Meneses-Lazo et al.* (2020) indican que el uso de las soluciones nutritivas de Steiner y Hoagland inducen un mejor crecimiento e indirectamente incrementan la actividad fotosintética.

4.4. Luz

Dentro de los factores ambientales que intervienen en la formación de las plantas, la luz se ha convertido en una variable objeto de estudio para comprender todos los procesos que regulan el crecimiento y el desarrollo de las plantas como fuente de energía para la fotosíntesis, proceso por el cual las plantas captan la luz solar y la convierten en energía química para llevar a cabo todos sus procesos (*Zhang et al.*, 2022). Para poder ser utilizada por la planta, la luz es captada y absorbida por las moléculas de clorofila, donde estas poseen estructuras captadoras de luz, denominadas fotosistemas (PS I y PS II), las cuales están constituidas por pigmentos unidos a proteínas que se encuentran en las células de las hojas y otras partes de la planta. Estos pigmentos fotosintéticos están diseñados para captar diferentes longitudes de onda de luz que provienen de lo que se conoce como luz PAR (radiación

fotosintéticamente activa, por sus siglas en inglés), la cual es la fracción de la luz que impacta el planeta tierra, que se encuentra en las longitudes de onda entre aproximadamente 400 y 700 nm y corresponde a la luz visible. Dentro de este intervalo de longitudes de onda existen varias clasificaciones debido a los efectos que generan sobre las plantas, en el caso de las longitud de onda de 400 a 500 nm, también llamada luz de color azul, la cual causa efectos como la inhibición del alargamiento del tallo y la promoción del crecimiento compacto; y la de 620 a 700 nm o luz de color rojo, la cual puede estimular la ruptura de la latencia de las semillas y promover la germinación, además de promover la elongación del tallo, la formación de hojas, la floración y la producción de compuestos bioactivos (Folta y Carvalho, 2015).

4.5. Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)

La densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD, por sus siglas en inglés) es una medida de la cantidad de luz fotosintéticamente activa que llega a una superficie determinada en un determinado período de tiempo. Es una métrica importante para comprender cómo la intensidad de la luz afecta la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas (Song *et al.*, 2022).

Diversas investigaciones científicas han demostrado la influencia significativa de la PPFD en el rendimiento y desarrollo de las plantas. En un estudio llevado a cabo por Chen *et al.* (2022), los datos mostraron que al utilizar una alta PPFD y una combinación de longitudes de onda de color rojo y azul se promovió significativamente la eficiencia en el uso de la radiación, lo que resultó en un mayor crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate. La información presentada en esta investigación nos muestra el camino hacia mejorar en la optimización de la iluminación en el cultivo de tomates, lo que puede ayudar a mejorar la productividad y la eficiencia del uso de la energía en la producción de alimentos.

4.6. Fotoperíodo

Se entiende por fotoperíodo a la duración del período de luz y oscuridad en un ciclo de 24 horas o en el caso de utilizar una fuente de luz complementaria este ciclo se puede

extender. Es un factor crucial que influye en el crecimiento, desarrollo y comportamiento de las plantas frente al impacto de las longitudes de ondas provenientes de la luz (Cruz *et al.*, 2022).

El fotoperíodo desencadena respuestas fisiológicas y morfológicas en las plantas, especialmente en relación con su etapa de floración y reproducción. Al percibir cambios en la duración del fotoperíodo las plantas pueden regular procesos como la floración, el desarrollo de brotes laterales, el crecimiento vegetativo y la formación de órganos reproductivos (Baruch y Fisher, 1991).

De acuerdo con Vásquez (2018), dependiendo de su respuesta frente al periodo que dure el fotoperíodo se puede clasificar en tres categorías: plantas de día largo (requieren un fotoperíodo más largo para florecer), plantas de día corto (florecen cuando el fotoperíodo es más corto) y plantas neutras al fotoperíodo (no dependen del fotoperíodo para florecer).

Según Ramos (2015), el fotoperíodo es un factor clave en la planificación y manejo de cultivos, en la actualidad las investigaciones están utilizando este factor para mejorar los sistemas de iluminación artificial para poder controlar y modificar la duración del fotoperíodo, permitiendo el cultivo de plantas fuera de su estación natural de crecimiento. Esto es especialmente relevante en la producción de cultivos de hojas verdes, flores y frutas, donde se busca maximizar el rendimiento y la calidad de los productos.

En una investigación realizada por Gent (2014), se obtuvo que el fotoperíodo, a través de la manipulación del DLI, influye en la composición nutricional y la calidad de las lechugas cultivadas hidropónicamente. Los resultados proporcionan información valiosa para optimizar las condiciones de cultivo y maximizar la calidad nutricional de los cultivos en sistemas hidropónicos.

4.7. Integral de luz diaria (DLI)

La integral de luz diaria (DLI, por sus siglas en inglés) se refiere a la cantidad total de

energía lumínica recibida por las plantas durante un período de 24 horas en un entorno de cultivo vertical. Se calcula sumando la cantidad de luz que las plantas reciben a lo largo del día, tomando en cuenta la intensidad de la luz y la duración de la exposición (Castro y Palomar, 2022). La DLI se expresa comúnmente en unidades de moléculas de fotones por metro cuadrado por día ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), la DLI es un parámetro clave en la planificación y manejo de la iluminación artificial en la agricultura vertical (Duarte, 2019). Permite determinar la cantidad de luz necesaria para proporcionar a las plantas en función de sus requerimientos específicos, teniendo en cuenta la especie vegetal, el estado de crecimiento y las etapas de desarrollo. Al mantener un DLI adecuado, se pueden optimizar la calidad, el rendimiento y el ciclo de crecimiento de las plantas en un sistema de agricultura vertical.

Es importante destacar que, en el ambiente luminoso natural, la DLI puede variar según la ubicación geográfica, la estación del año y las condiciones de cultivo específicas. Por lo tanto, es necesario monitorear y ajustar la iluminación de manera regular para asegurar que las plantas reciban la cantidad adecuada de luz durante todo el día.

La medición y control de la DLI en la agricultura vertical contribuye a maximizar la eficiencia de la producción, optimizar el uso de recursos y mejorar la calidad de los cultivos en este sistema de cultivo en crecimiento.

Una investigación, realizada por Warner *et al.* (2023), muestra el efecto de diferentes regímenes de iluminación en el cultivo de plantas en interiores. Se examinaron regímenes de luz con la misma calidad espectral y la misma integral de luz diaria (DLI), pero con horarios e intensidades de iluminación diferentes. Los datos de esta investigación concluyeron que al mantener constante la DLI y extender el fotoperíodo mientras se reduce la intensidad de la luz, se promovía una mayor acumulación de biomasa y una mayor captación de luz por parte de las plantas. Esto indica que la cantidad total de luz entregada a los cultivos es un factor importante para su crecimiento y desarrollo.

4.8. Sistema de iluminación LED

Los sistemas de iluminación LED consisten en una serie de diodos emisores de luz (LED) que se utilizan para generar luz (Bantis *et al.*, 2016), la iluminación LED utiliza diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) para generar luz eficientemente, en comparación con las fuentes de luz tradicionales, como las lámparas incandescentes o fluorescentes (Al-Murad *et al.*, 2021); los LEDs tienen una mayor eficiencia energética y duran más tiempo, lo que los convierte en una opción rentable a largo plazo (Lee *et al.*, 2014); un LED es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de él, está compuesto por capas de materiales semiconductores que, cuando se activan, liberan fotones y generan luz (Fillipo *et al.*, 2010).

En comparación con otras fuentes de luz, como las lámparas incandescentes o fluorescentes, los LEDs tienen numerosas ventajas:

- **Eficiencia energética.** Los LEDs son altamente eficientes en la conversión de energía eléctrica en luz. En lugar de perder energía en forma de calor, como ocurre con las lámparas tradicionales, los LEDs producen una cantidad mínima de calor, lo que reduce el consumo de energía y aumenta la eficiencia (Espinal, 2021).
- **Larga vida útil.** Los LEDs tienen una vida útil considerablemente más larga en comparación con otras fuentes de luz. Pueden durar hasta 50,000 horas o más, lo que significa que requieren menos reemplazos y reducen los costos de mantenimiento a largo plazo (Saavedra *et al.*, 2016).
- **Durabilidad.** Los LEDs son resistentes a golpes y vibraciones debido a su diseño sólido. No contienen filamentos frágiles ni componentes sensibles, lo que los hace más duraderos y adecuados para entornos exigentes (Rodríguez *et al.*, 2019).

Dentro de los tipos de luces más eficientes para utilizar en la agricultura, la luz blanca de los LEDs es considerada superior a otros colores de luz, en algunos casos por las siguientes razones:

- **Espectro completo.** La luz blanca de los LEDs abarca una amplia gama de

colores, lo que proporciona un espectro completo similar a la luz solar. Esto es crucial para el crecimiento saludable de las plantas, ya que diferentes longitudes de onda son necesarias en diferentes etapas de crecimiento (Avendaño-Abarca *et al.*, 2020).

- **Control del espectro.** Los LEDs blancos permiten ajustar el espectro de luz emitido mediante el uso de diferentes combinaciones de colores primarios. Esto proporciona un mayor control sobre las necesidades específicas de las plantas, permitiendo optimizar la calidad y la cantidad de luz proporcionada (Calzado, 2022).
- **Menor estrés térmico.** Algunas fuentes de luz, como las lámparas de sodio de alta presión, emiten luz con altas cantidades de radiación infrarroja y calor. En comparación, los LEDs blancos generan una cantidad mínima de calor, lo que reduce el estrés térmico en las plantas y evita posibles daños (Fraile y Gago, 2012). En el estudio presentado por Lin *et al.* (2013), se realizaron experimentos utilizando diferentes combinaciones de LEDs rojos, azules y blancos para iluminar las plantas de lechuga en un sistema hidropónico. Se evaluaron varios parámetros, como el crecimiento de las plantas, la tasa de fotosíntesis, la acumulación de biomasa y la calidad comestible de las hojas de lechuga. Los resultados mostraron que la luz blanca tuvo efectos significativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas de lechuga en comparación con las luces roja y azul. La luz blanca promovió un mayor crecimiento de las plantas, un aumento en la tasa de fotosíntesis y una mayor acumulación de biomasa en comparación con las otras luces. Además, se observó que la luz blanca mejoró la calidad comestible de las hojas de lechuga. Las hojas expuestas a la luz blanca presentaron niveles más altos de compuestos antioxidantes y una mayor actividad antioxidante en comparación con las hojas expuestas a las luces roja y azul.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del área de estudio

El estudio se realizó, dos veces, dentro del Laboratorio de Fisiología y Anatomía Vegetal de la Facultad de Agronomía (Universidad Autónoma de Sinaloa), sito en km 17.5 de la maxi pista Culiacán-Mazatlán, y geográficamente localizado a 24° 37' 29" LN, 107° 24' 30" LO y 38 m de altitud.



Figura 1. Área del experimento en el laboratorio de Fisiología vegetal.

5.2. Manejo agronómico

La siembra de chile morrón cv. DiCaprio (Rijk Zwaan) se llevó a cabo en charolas de poliestireno de 128 cavidades, con turba como sustrato. A partir de la emergencia, se colocaron dentro de cámaras de crecimiento de 1.72 m³ de espacio útil (1.65 x 1.14 x

0.71 m), cada una de las cuales cuenta con nueve lámparas de leds blancos (LS01, 40 W, Igoto Electric, Zhejiang, China). Para la nutrición de las plántulas se utilizó la solución de Steiner (1984) al 30% de la concentración original, la cual se aplicó por aspersión en forma manual.



Figura 2. Siembra de semillas de chile morrón en el laboratorio de Fisiología vegetal.

El primer experimento se llevó a cabo del 22 de marzo (fecha de siembra) al 06 de mayo de 2022 (6to muestreo semanal) y el segundo experimento se realizó del 14 de octubre (fecha de siembra) al 28 de noviembre (6to muestreo semanal) del mismo año. Por lo que, para su evaluación, la plántula fue cosechada a los 45 días después de la siembra en ambos experimentos.

5.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 2x4, donde los factores y niveles de estudio fueron: PPFD de 200 y 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y

fotoperíodo de 12, 14, 16 y 18 h d⁻¹. Se evaluaron un total de ocho tratamientos (DLI) con cuatro repeticiones cada uno (Cuadro 2). Para obtener la distribución espectral de los LEDs (Figura 3) se utilizó un espectro radiómetro (Field SpecPro®VNIR, ASD) y para mantener constante la PPFD se usó un ceptómetro (LP-80, Decagon), para ajustar la distancia con la fuente de luz conforme las plántulas crecieron. Para conseguir cada fotoperíodo se usó un temporizador analógico de 24 h (15119, GE).

Cuadro 2. Diseño de tratamientos en función de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), el fotoperíodo y la integral de luz diaria (DLI) resultante, utilizados para la producción de plántula de chile morrón.

| Tratamiento | PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | Fotoperíodo (h d ⁻¹) | DLI ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) |
|-------------|--|-------------------------------------|--|
| T1 | 200 | 12 | 8.64 |
| T2 | 200 | 14 | 10.08 |
| T3 | 200 | 16 | 11.52 |
| T4 | 200 | 18 | 12.96 |
| T5 | 350 | 12 | 15.12 |
| T6 | 350 | 14 | 17.64 |
| T7 | 350 | 16 | 20.16 |
| T8 | 350 | 18 | 22.68 |

DLI= PPFD x fotoperíodo x 3600 x 10⁻⁶.

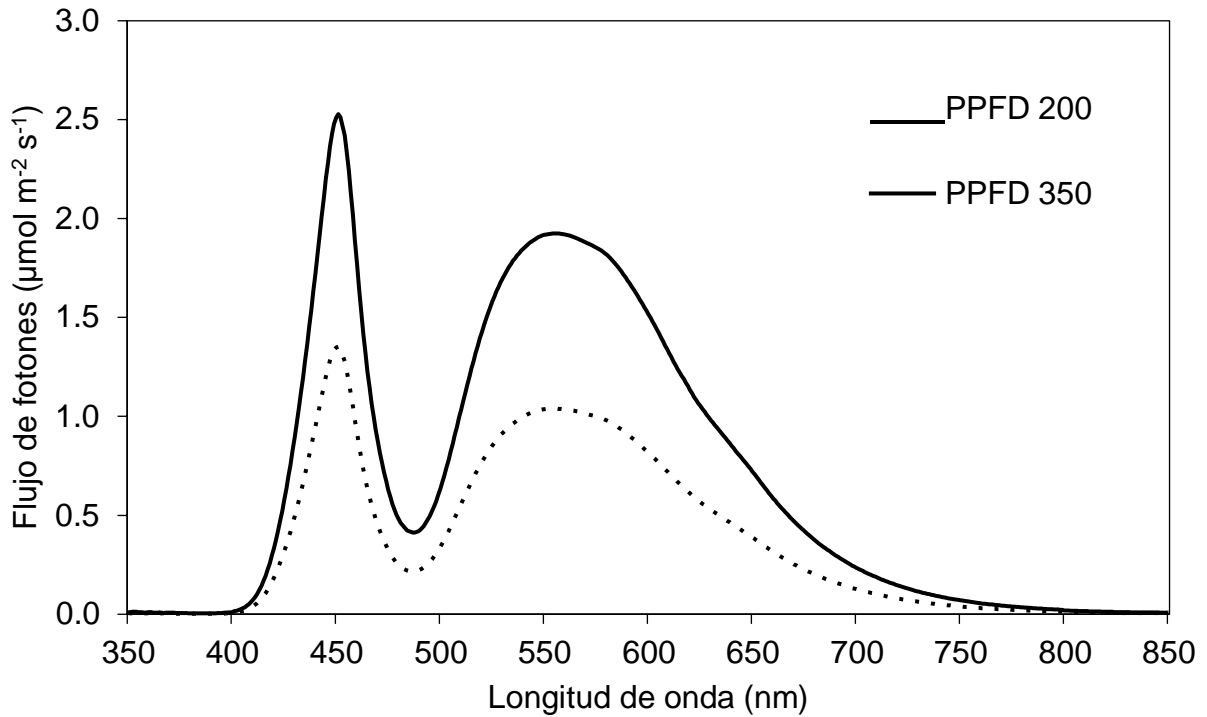


Figura 3. Distribución espectral de los LEDs blancos utilizados en el sistema de iluminación para la producción de plántula de chile morrón.

La temperatura y humedad relativa fueron registradas mediante higrotermómetros, cada uno de los cuales fue colocado en el ambiente de cada tratamiento. En la Figura 4 se presenta el comportamiento de dichas variables climáticas durante el periodo de estudio. La temperatura media fue de 25.9 °C, con una máxima y mínima de 32.5 y 18.8 °C, respectivamente. Mientras que la correspondiente humedad relativa media, máxima y mínima fue de 56.9, 79.9 y 39.1%. Aunque, sin diferencias de temperatura ($p = 0.353075$) y humedad relativa ($p = 0.506937$) entre tratamientos por causa de PPFD y/o fotoperíodo, debido a que el sistema de aire acondicionado del laboratorio permaneció en operación todo el tiempo.

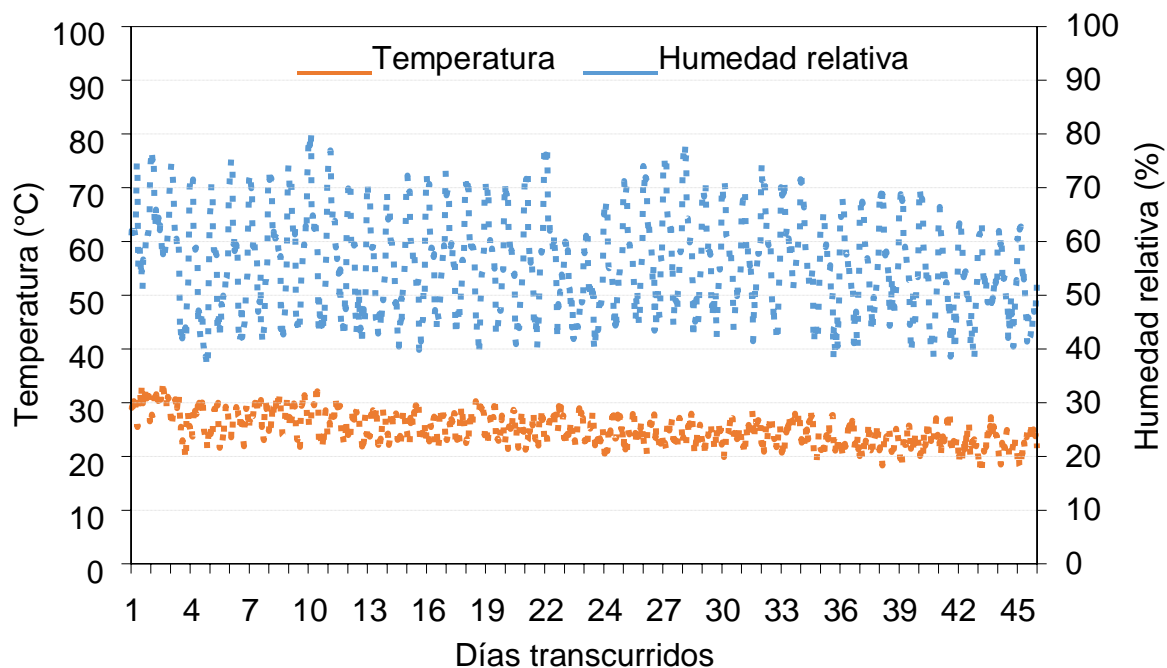


Figura 4. Comportamiento de la temperatura y la humedad relativa durante el período de estudio.

5.4. Variables de estudio

Para evaluar el crecimiento vegetal se midieron, en cuatro plántulas por repetición, las siguientes variables: a) longitud y diámetro de tallo, mediante un vernier digital (CALDI-6MP, Truper); b) se registró el largo (L) y ancho (A) de cada hoja con vernier digital (CALDI-6MP, Truper), para estimar el área foliar mediante la ecuación $AF = 0.649 (L \times A) + 0.000365 (L \times A)^2$, propuesta por De Swart *et al.* (2004); c) índice de verdor foliar, con un medidor de clorofila (SPAD-502, Minolta); d) volumen de raíz, que se obtuvo al colocar cada raíz dentro de una probeta graduada con una cantidad de agua conocida y luego se midió el desplazamiento de agua; e) peso seco de hojas, tallo y raíz, que se obtuvo al secar el material vegetal en horno eléctrico (292, Felisa) a 70 °C por 72 h y posterior pesado en una balanza analítica (SA120, Scientech).



Figura 5. Disposición de las plántulas de chile morrón en las charolas con sustrato en el laboratorio de Fisiología vegetal.

Para evaluar la calidad de plántula, se consideraron las siguientes variables: la relación raíz-vástago (RRV: $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), mediante la ecuación $\text{RRV} = \text{peso seco de la raíz (PSR)} / \text{peso seco del vástago (PSV)}$ (Cui *et al.*, 2021); el índice de área foliar (IAF: $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$), por medio de la ecuación $\text{IAF} = \text{área foliar} / \text{área del cepellón}$ (Hwang *et al.*, 2020); la compacidad (COM: g cm^{-1}), expresada mediante la ecuación $\text{COM} = \text{PSV} / \text{altura de planta (AP)}$ (Hernández *et al.*, 2016); y el índice de calidad de plántula (ICP), a través de la ecuación $\text{ICP} = (\text{diámetro de tallo} / \text{AP}) + (\text{PSR} / \text{PSV}) \times \text{peso seco total}$ (Yan *et al.*, 2021).



Figura 6. Evaluación de plántula de chile morrón en el laboratorio de Fisiología vegetal.

5.5. Análisis estadístico

Los datos analizados estadísticamente, para cada variable evaluada, corresponden al promedio de los resultados obtenidos en los dos experimentos, los cuales fueron sometidos al análisis de varianza y prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el paquete STATISTICA versión 7.0 (StatSoft, 2004).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Altura y diámetro de tallo

Los resultados obtenidos indican que la exposición de las plántulas de chile morrón a la PPFD de 200 $\mu\text{mol } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ incrementó (Tukey, $p \leq 0.05$) la respuesta de la variable altura de plántula en 24.64%, en comparación con las plántulas que fueron sometidas a la PPFD de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Cuadro 3). La captación de menos luz induce en las plántulas una redistribución de hormonas vegetales como las auxinas, las cuales promueven la dominancia apical en el crecimiento del tallo, como consecuencia del incremento en la plasticidad de las paredes celulares y a que el tejido donde la auxina se encuentra en concentración suficientemente alta se convierte en punto de atracción de nutrimentos y de otras sustancias hormonales como las giberelinas (Jankiewics y Acosta-Zamudio, 2003; Ayala-Tafoya *et al.*, 2020). El resultado obtenido concuerda con Hwang *et al.* (2020), quienes encontraron que PPFD de 100 a 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ influyeron en la altura de plántulas de tomate y chile morrón. En ambos casos, la altura de plántula fue mayor con 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y disminuyó con PPFD más altos.

En cuanto al efecto del fotoperíodo sobre el crecimiento de las plántulas de chile morrón se observó que, con 14 h d^{-1} aumentaron en 76.27% la altura que lograron con 12 h d^{-1} , aunque, al aumentar las horas luz a 16 y 18 h d^{-1} , la altura disminuyó en 21.83 y 45.11%, respectivamente (Cuadro 3). De acuerdo con un estudio realizado por Osnato *et al.* (2022), plantas como las de *Arabidopsis thaliana* modifican diferentes aspectos morfológicos como la longitud del tallo, de acuerdo con el fotoperíodo al que están expuestas, lo cual provoca respuestas genéticas específicas, como es la producción de proteínas involucradas en la polaridad de las auxinas, la cual influye la redistribución de auxinas dentro de la planta que permite ajustar la dirección o zona de crecimiento de la planta hacia la que se mueven las auxinas.

Bajo la influencia de la PPFD de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y fotoperíodo de 14 h d^{-1} (T2, DLI=10.08), la altura de las plántulas de chile morrón superó desde 20.26% (T6: 350x14, DLI=17.64) hasta 117.65% (T5: 350x12, DLI=15.12) a la inducida por los

demás tratamientos (Cuadro 3). Estos hallazgos se alinean con la investigación previa de Liu *et al.* (2019), quienes también observaron efectos significativos en plántulas de pimiento en un sistema de producción bajo techo gracias a la utilización de luces LED rojas y azules. Además, el resultado de este estudio resalta que la variación en la integral de luz diaria (DLI) juega un papel fundamental en la morfología de las plántulas, un aspecto que también fue corroborado por Kelly *et al.* (2020) en su estudio con lechuga. Estos descubrimientos subrayan la importancia de la luz y su capacidad para influir en la calidad de las plántulas, lo que tiene implicaciones significativas en la producción de trasplantes de alta calidad y en el rendimiento de los cultivos.

Con respecto al diámetro de tallo, las plántulas de chile morrón tratadas con la PPFD de $200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ superó (Tukey, $p \leq 0.05$) en 6.53% al grosor de tallo manifestado por las plántulas que crecieron con la PPFD de $350 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Cuadro 3). Las horas de luz que se aplicaron a las plántulas (fotoperíodo de 12, 14, 16 y 18 h d^{-1}) no afectaron la variable de diámetro de tallo (Cuadro 3). Sin embargo, la interacción de este factor con la PPFD tuvo un efecto significativo (Tukey, $p \leq 0.05$), ya que, con la PPFD de $200 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, independientemente del fotoperíodo, se indujo mayor diámetro de tallo en las plántulas de chile morrón, aunque estadísticamente igual al efecto ocasionado por la combinación de 12 h d^{-1} y PPFD de $350 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, con esta PPFD durante fotoperíodos más largos, de 14, 16 o 18 h d^{-1} , el grosor de tallo disminuyó alrededor de 11.22%.

Estos resultados concuerdan con Hwang *et al.* (2020), quienes informaron que un aumento en la PPFD de 100 a $250 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ promovió el diámetro de tallo de plántulas de tomate entre todos los fotoperíodos probados, pero no hubo diferencias significativas entre 250 y $300 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El diámetro de tallo de plántulas de pimiento rojo fue mayor con $200 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, independientemente del fotoperíodo, mientras que los de 12 y 20 h d^{-1} no tuvieron diferencias significativas si la PPFD era mayor a 200 y $150 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Vásquez (2018) cultivó crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat) con el uso de un sistema de iluminación LED y obtuvo tallos más gruesos mediante una mayor proporción de luz azul, señalando que la luz azul puede controlar el alargamiento excesivo del tallo, lo que resulta en tallos

más compactos y robustos, esto puede resultar en un crecimiento más saludable y un desarrollo adecuado del tallo. Lo anterior tiene relación con la calidad de luz del sistema de iluminación LED utilizado en esta investigación, el cual emite una proporción de luz azul: luz roja de 1.22, debido al tipo de lámparas de luz blanca fría (6500 K).

Cuadro 3. Influencia del PPF, fotoperíodo e interacción sobre la altura y diámetro de tallo de la plántula de chile morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

| Factor de variación | Altura de planta (cm) | Diámetro de tallo (mm) |
|---|--------------------------|---------------------------|
| PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | ** | ** |
| 200 | 8.65 a | 3.59 a |
| 350 | 6.91 b | 3.37 b |
| Fotoperíodo (h d^{-1}) | *** | ns |
| 12 | 5.73 d | 3.59 a |
| 14 | 10.13 a | 3.43 a |
| 16 | 8.29 b | 3.39 a |
| 18 | 6.96 c | 3.51 a |
| PPFD x fotoperíodo (DLI) | *** | *** |
| T1: 200 x 12 (8.64) | 6.35 d | 3.45 ab |
| T2: 200 x 14 (10.08) | 11.05 a | 3.73 a |
| T3: 200 x 16 (11.52) | 9.20 b | 3.43 ab |
| T4: 200 x 18 (12.96) | 8.00 c | 3.75 a |
| T5: 350 x 12 (15.12) | 5.10 e | 3.73 a |
| T6: 350 x 14 (17.64) | 9.23 b | 3.13 c |
| T7: 350 x 16 (20.16) | 7.38 c | 3.35 b |
| T8: 350 x 18 (22.68) | 5.93 d | 3.28 b |

PPFD= densidad de flujo de fotones fotosintéticos. DLI= integral de luz diaria. Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, *, **, ***= no significativo a $p \leq 0.05$, significativo a $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.001$, respectivamente.

6.2. Área e índice de verdor foliares

El Cuadro 4 muestra que la PPFd de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ indujo un mayor crecimiento del aparato fotosintético de las plántulas de chile morrón, ya que el área foliar fue 16.80% más grande en comparación con las plántulas expuestas a la PPFd de $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Por otra parte, el área foliar creció alrededor de 13.52% cuando el fotoperíodo aumentó de 12 a 14 o 16 h d^{-1} , pero disminuyó en 14.98% cuando el fotoperíodo se extendió a 18 h d^{-1} . En cuanto al efecto de la interacción de PPFd y fotoperíodo sobre el área foliar de las plántulas (Cuadro 4), la PPFd de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodo de 14 h d^{-1} (T2, DLI=10.08) ocasionó un área foliar 19% más grande que con la misma PPFd y 12 h d^{-1} (T1, DLI=8.64), aunque estadísticamente igual con 16 (T3, DLI=11.52) y 18 h d^{-1} (T4, DLI=12.96). Mientras que, con la PPFd de $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, independientemente del fotoperíodo, el área foliar fue menor hasta en 48.94% con la mayor exposición, de 18 h d^{-1} (T8, DLI=22.68).

Con relación a lo anterior, Ke *et al.* (2022) explica que las plantas cultivadas con baja PPFd deben adaptarse para capturar la luz de manera eficiente. Para lo cual producen cutículas menos gruesas, mayor área foliar específica y concentraciones más altas de clorofila que las cultivadas en condiciones de PPFd alto. Estas características disminuyen la reflectancia de las hojas y aumentan la transmitancia (mayor absorbancia). Además, las hojas inferiores comparten más luz debido a la reflectancia y absorción significativamente bajas de las hojas de la capa superior con PPFd bajo, y podrían tener una distribución vertical de PPFd más uniforme, lo que podría contribuir al uso eficiente de la radiación por parte del dosel. Así que, para capturar más luz con un PPFd bajo, las hojas deben distribuir más biomasa para producir más clorofila. Mientras que, bajo una PPFd excesiva o alta a largo plazo, la clorofila puede dañarse o destruirse, lo que resultaría en una concentración baja de clorofila. Adams y Langton (2005) señalan que el aumento del área foliar suele ir acompañado de un aumento del área foliar específica, el cual se asocia frecuentemente con una tasa de asimilación neta reducida, pero que se compensa con la mayor área foliar, los aumentos en el tamaño de las hojas están asociados con aumentos tanto en el tamaño como en el número de células, y se ha demostrado que un estímulo de crecimiento fotoperiódico

es transmisible de las hojas maduras a las hojas en desarrollo.

Cuadro 4. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre el área e índice de verdor foliares de la plántula de chile morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

| Factor de variación | Área foliar (cm ²) | Índice de verdor foliar (valores Spad) |
|---|-----------------------------------|---|
| PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | *** | ns |
| 200 | 45.18 a | 34.50 a |
| 350 | 38.68 b | 34.29 a |
| Fotoperíodo (h d ⁻¹) | *** | ns |
| 12 | 39.39 b | 34.12 a |
| 14 | 45.17 a | 34.65 a |
| 16 | 44.26 a | 34.48 a |
| 18 | 38.89 b | 34.40 a |
| PPFD x Fotoperíodo (DLI) | *** | ns |
| T1: 200 x 12 (8.64) | 40.64 cd | 33.91 a |
| T2: 200 x 14 (10.08) | 48.36 a | 34.82 a |
| T3: 200 x 16 (11.52) | 46.40 a | 34.77 a |
| T4: 200 x 18 (12.96) | 45.31 ab | 34.44 a |
| T5: 350 x 12 (15.12) | 38.15 d | 33.96 a |
| T6: 350 x 14 (17.64) | 41.98 bc | 34.20 a |
| T7: 350 x 16 (20.16) | 42.11 bc | 34.17 a |
| T8: 350 x 18 (22.68) | 32.47 e | 34.38 a |

PPFD= densidad de flujo de fotones fotosintéticos. DLI= integral de luz diaria. Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, *, **, ***= no significativo a $p \leq 0.05$, significativo a $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.001$, respectivamente.

A su vez, Wang *et al.* (2015) descubrieron que el componente de luz azul del sistema de iluminación LED fue esencial para el desarrollo del aparato fotosintético en condiciones de baja irradiancia. Las hojas cultivadas en condiciones de menor contenido de clorofila, sin embargo, tenían cloroplastos bien desarrollados con el

mayor grado de laminillas apiladas y la menor acumulación de almidón. Lo cual explicaría en gran medida la tasa fotosintética neta más alta por unidad de clorofila. Los resultados demostraron que la luz azul optimizó el rendimiento fotosintético al mejorar la tasa fotosintética, aumentar el área foliar y prolongar la duración de la fotosíntesis activa en condiciones de baja irradiancia.

No obstante, en este trabajo, el índice de verdor foliar de las plántulas de chile morrón no fue afectado por la PPF, el fotoperíodo o la interacción de estos factores (Cuadro 4).

6.3. Índice de área foliar y peso seco de plántula

Con la PPF de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se indujo que las plántulas de chile morrón produjeran 17.14% más índice de área foliar, con respecto a la PPF de $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 5). Este resultado concuerda con lo encontrado por Hwang *et al.* (2020), quienes registraron efectos similares en el índice de área foliar de plántulas de tomate y pimiento rojo bajo la influencia de la PPF de 250 y $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente; el cual disminuyó cuando la PPF fue igual o mayor a $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

El resultado de mayor índice de área foliar por la exposición a diferentes fotoperíodos se obtuvo con los de 14 y 16 h d^{-1} (Cuadro 5), cuyo valor promedio superó en 13.52 y 15.17% al índice de área foliar de las plántulas bajo los efectos del fotoperíodo de 12 y 18 h d^{-1} , respectivamente. El resultado es similar al encontrado por Iqbal *et al.* (2022), quienes observaron que al extender el fotoperíodo de 11 a 14 o 17 h d^{-1} , las plantas de lechuga fueron más eficientes en el uso de la energía luminosa, debido a que fotoperíodos más largos proporcionaron más tiempo para la fotosíntesis, lo que a su vez condujo a una mayor eficiencia en la captura y conversión de la energía luminosa en carbohidratos. Esto se traduce en un crecimiento más saludable de las plantas debido a una mayor disponibilidad de energía para el metabolismo.

La interacción entre la PPF de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y el fotoperíodo de 14 h d^{-1} (T2, DLI=10.08) indujo un índice de área foliar que superó (Tukey, $p \leq 0.05$) en 19% al

ocasionado por la misma PPDF y fotoperíodo de 12 h d⁻¹ (T1, DLI=8.64), aunque estadísticamente igual con el resultado obtenido cuando el fotoperíodo se alargó a 16 o 18 h d⁻¹ (T3, DLI=11.52 y T4, DLI=12.96). La máxima respuesta obtenida con T2 también superó, desde 14.85 hasta 49.43%, a la causada por la PPDF de 350 μmol m⁻² s⁻¹ por 14 o 18 h d⁻¹ (T6, DLI=17.64 y T8, DLI=22.68), respectivamente (Cuadro5). Al respecto, Yan *et al.* (2019), encontraron que la intensidad de la luz, el fotoperíodo y la calidad de la luz influyeron en el área foliar de plántulas de lechuga y, de acuerdo con los resultados obtenidos en relación con la calidad de las plántulas, su posterior desarrollo y los valores nutricionales de la lechuga, recomiendan la PPDF de 200 μmol m⁻² s⁻¹ junto con un fotoperíodo de 16 h d⁻¹, proporcionados por una fuente de iluminación LED, para la producción de plántulas de lechuga en sistemas hidropónicos. De manera parecida, Hwang *et al.* (2020) observaron los mayores valores de número de hojas, área foliar e índice de área foliar de plántulas de tomate y pimiento rojo con 250 y 200 μmol m⁻² s⁻¹, respectivamente, entre todos los fotoperíodos que probaron (12, 16 y 20 h d⁻¹). En ese estudio, los DLI de 14.40 y 11.52 mol m⁻² d⁻¹ fueron suficientemente altos para que las hojas individuales se expandieran en respuesta al área de cultivo determinada.

La PPDF no causó diferencia significativa (Tukey, $p \leq 0.05$) sobre el peso seco de las plántulas de chile morrón, no obstante, el fotoperíodo de 14 h d⁻¹ indujo una acumulación de peso seco que superó en 22.05, 7.71 y 14.08% al producido por las plántulas tratadas con el fotoperíodo de 12, 16 y 18 h d⁻¹, respectivamente (Cuadro 5). Yamamoto *et al.* (2008), con respecto a los efectos del fotoperíodo en el crecimiento vegetativo, la floración y la fructificación de *Capsicum frutescens* L. y *C. annuum* L., encontraron que el alargamiento gradual del fotoperíodo resultó en un aumento significativo del peso seco de las plantas, el cual se mostró, en primer lugar, que al aumentar el fotoperíodo permitió una mayor captura de luz, lo que, a su vez, impulsó la fotosíntesis y la producción de carbohidratos, estos carbohidratos adicionales se utilizaron para el crecimiento de la planta, lo que se reflejó en un mayor peso seco tanto en la parte aérea como en la zona radicular, también se encontró que al alargar gradualmente el fotoperíodo, se facilitó una distribución más eficiente de nutrientes y energía dentro de la planta, lo que contribuyó a un crecimiento más equilibrado y

robusto.

El peso seco producido por las plántulas de chile morrón con la interacción de una PPF_D de 350 o 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y el fotoperíodo de 14 h d^{-1} (T6, DLI=17.64 o T2, DLI=10.08), estadísticamente iguales entre sí, superó en 19.67 y 24.89% al peso seco obtenido por las plántulas bajo el efecto del fotoperíodo de 12 h d^{-1} y ambas PPF_D (T5, DLI=15.12 y T1, DLI=8.64), respectivamente (Cuadro 5). Los resultados anteriores muestran que el fotoperíodo y la PPF_D, generan diferentes respuestas con relación al peso seco de plántulas. Al respecto, Hwang *et al.* (2020) encontraron que el peso seco de plántulas de tomate y pimiento rojo aumentó más con una PPF_D relativamente baja y un fotoperíodo largo que con una PPF_D más alta y un fotoperíodo más corto. Kelly *et al.* (2020) informaron un patrón similar de estos resultados en la lechuga, lo que se explica como eficiencia de la fotosíntesis. A una PPF_D más alta por encima de un umbral, la eficiencia de la fotosíntesis disminuyó al aumentar la PPF_D, donde mayores aumentos de la PPF_D no aumentaron la fotosíntesis. Después de alcanzar el punto de saturación de luz, sólo un aumento del fotoperíodo mejorará la fotosíntesis neta. Esto puede explicar por qué usar una PPF_D más baja con un fotoperíodo más largo, en las mismas condiciones de DLI, es más efectivo que usar una PPF_D más alta con un fotoperíodo más corto. Adams y Langton (2005) agregan que, los tratamientos de días largos frecuentemente promueven un aumento en el peso seco de las plantas debido al efecto directo sobre la expansión foliar, el área fotosintética total y la partición de fotoasimilados. La clorofila por unidad de área foliar ocasionalmente aumenta con el tratamiento con días largos, lo que puede aumentar la fotosíntesis y constituir un segundo mecanismo que aumenta el peso seco. Además, la iluminación con una irradiancia más baja durante un período más largo puede ser más eficiente que un tratamiento días cortos de alta irradiancia debido a la relación hiperbólica entre PPF_D y la fotosíntesis. La iluminación de baja intensidad con días largos puede, al menos en parte, compensar la respiración. El fenómeno del crecimiento de días largos aún no se ha explotado en la producción de cultivos comerciales, pero los beneficios potenciales son claros.

Cuadro 5. Influencia del PPFd, fotoperíodo e interacción sobre el índice de área foliar y peso seco de la plántula de chile morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

| Factor de variación | Índice de área foliar (cm ² cm ⁻²) | Peso seco (g) |
|--|--|------------------|
| PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹) | *** | ns |
| 200 | 2.46 a | 0.500 a |
| 350 | 2.10 b | 0.513 a |
| Fotoperíodo (h d ⁻¹) | *** | *** |
| 12 | 2.14 b | 0.458 c |
| 14 | 2.45 a | 0.5559 a |
| 16 | 2.41 a | 0.519 b |
| 18 | 2.11 b | 0.490 b |
| PPFD x Fotoperíodo (DLI) | *** | * |
| T1: 200 x 12 (8.64) | 2.21 cd | 0.438 d |
| T2: 200 x 14 (10.08) | 2.63 a | 0.547 ab |
| T3: 200 x 16 (11.52) | 2.52 a | 0.520 abc |
| T4: 200 x 18 (12.96) | 2.46 ab | 0.496 bc |
| T5: 350 x 12 (15.12) | 2.07 d | 0.478 cd |
| T6: 350 x 14 (17.64) | 2.29 bc | 0.572 a |
| T7: 350 x 16 (20.16) | 2.29 bc | 0.518 bc |
| T8: 350 x 18 (22.68) | 1.76 e | 0.484 cd |

PPFD= densidad de flujo de fotones fotosintéticos. DLI= integral de luz diaria. Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, *, **, ***= no significativo a $p \leq 0.05$, significativo a $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.001$, respectivamente.

6.4. Volumen de raíz y relación raíz-vástago

El volumen de raíz desarrollado por las plántulas de chile morrón cultivadas con la PPFd de 350 μmol m⁻² s⁻¹ fue 8.74% más grande que con 200 μmol m⁻² s⁻¹ (Cuadro 6). El resultado concuerda con Baligar *et al.* (2020), quienes informaron que el aumento de la intensidad de la luz de 100 a 450 μmol m⁻² s⁻¹ condujo a mejoras significativas

en los parámetros de crecimiento de los brotes, hojas y raíces de cultivos de cobertura de leguminosas tropicales. Este aumento sobre la PPFD resultó beneficioso debido a que la mayor intensidad de luz estimuló el desarrollo de un sistema de raíces más extenso y robusto. Lo cual proporcionó una mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo que a su vez promovió un crecimiento más saludable y vigoroso de las plantas. El aumento en la PPFD también contribuyó a una mayor fotosíntesis y producción de carbohidratos y, este aumento en la producción de energía favoreció una mayor disponibilidad de recursos para el crecimiento y el mantenimiento de las raíces.

Por su parte, el fotoperíodo de 14 a 16 h d⁻¹ indujo el mayor volumen de raíz, estadísticamente igual al desarrollado con 12 h d⁻¹, pero de 14.66 a 20.94% más grande que el de las plántulas de chile morrón bajo un fotoperíodo de 18 h d⁻¹. Al respecto, Guo *et al.* (2019) proporcionan una perspectiva sobre la influencia del fotoperíodo en la formación de raíces en el rábano cereza que, tradicionalmente, se ha asociado este cultivo con fotoperíodos cortos para estimular el desarrollo radicular. Sin embargo, los resultados de su estudio revelaron que la implementación de un fotoperíodo prolongado de 16 horas de luz, seguidas de 8 horas de oscuridad, condujo a un crecimiento más vigoroso y una mayor biomasa en los rábanos cereza. Este fenómeno se traduce en una formación de raíces más rápida, lo que, desde una perspectiva aplicada, podría tener significativas implicaciones en la agricultura. Un factor de consideración relevante podría ser el tiempo adicional disponible para que las plantas realicen procesos metabólicos clave durante un fotoperíodo más prolongado, como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes, procesos cruciales para el crecimiento de las raíces, las cuales podrían beneficiarse de un período de luz extendido, permitiendo a las plantas dedicar un mayor tiempo a estas actividades esenciales.

La interacción entre la PPFD de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodo de 14 y 16 h d⁻¹ (T6, DLI=16.64 y T7, DLI=20.16) causó el mayor volumen radicular de las plántulas de chile morrón, 27.84% mayor en comparación con las plántulas bajo los efectos de la PPFD de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodo de 18 h d⁻¹ (T4, DLI=12.98), pero estadísticamente

igual al efecto del resto de tratamientos. Los resultados, aunque parcialmente, concuerdan con los obtenidos por Iqbal *et al.* (2022), quienes informaron que las plantas de lechuga que se cultivaron con 200-250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 14-17 h d^{-1} tuvieron una mayor longitud de raíz, sin embargo, el efecto del fotoperíodo y la intensidad de la luz sobre el peso seco de las raíces no fue significativo. Al subrayar la importancia en el desarrollo de un buen volumen radicular, Hernández (2003) describe que las plantas logran captar de manera más eficiente agua y nutrientes, lo cual tiene un impacto significativo en la fotosíntesis, un proceso crucial para la vida de las plantas, lo promueve un sistema radical robusto el cual proporciona un acceso más efectivo al xilema y floema, los tejidos conductores de las plantas que transportan agua y nutrientes, así como fotoasimilados, a través de la planta, por el contrario, un volumen radical de baja calidad induce una serie de aspectos fisiológicos en las plantas, que se ven reflejados en una reducción en el contenido de agua de las hojas y la degradación de las membranas celulares; lo cual tiene un impacto crítico en múltiples procesos bioquímicos, debido a que están relacionadas con la integridad celular, mantenimiento de la estructura y la liberación de componentes celulares esenciales.

La relación raíz-vástago de las plántulas de chile morrón bajo la intensidad de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fue estadísticamente superior (Tukey, $p \leq 0.05$) en 10.83% a la de las plántulas bajo la influencia de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 6). En un estudio realizado por Zha y Liu en 2018, se obtuvo que, al utilizar una intensidad de luz entre 240 y 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ produjeron un crecimiento apropiado del rábano cereza en entornos de fábrica de plantas utilizando una fuente de luz LED y, se concluyó que una buena relación raíz-vástago, depende principalmente de la intensidad de la luz, seguida de la localización de la luz y el fotoperíodo. Asimismo, Wu *et al.* (2022), en un estudio llevado a cabo en el cultivo de *Miscanthus sinensis*, observaron que cuando las plantas fueron expuestas a niveles PPF, que oscilaban entre 300 y 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, obtuvieron como resultado el fortalecimiento de las raíces y un crecimiento vigoroso en la parte aérea de la planta. Debido a que los resultados evidencian efectos positivos y estadísticamente significativos de la iluminación en la acumulación de biomasa en la zona radical, esto pudo contribuir a mejorar la capacidad de las plantas para absorber tanto agua como nutrientes, al mismo tiempo que les permitieron mantener tasas de

transpiración más elevadas en diversos entornos ambientales.

El mayor efecto positivo del fotoperíodo sobre la relación raíz-vástago se observó en las plántulas con 12 h d⁻¹, el cual superó en 16.59% al efecto ocasionado por el fotoperíodo de 14 h d⁻¹, pero estadísticamente igual (Tukey, p≤0.05), al efecto generado bajo un fotoperíodo de 16 y 18 h d⁻¹ (Cuadro 6). El resultado es similar al obtenido por Legnani y Miller (2001), quienes observaron que el fotoperíodo influyó significativamente en el desarrollo de la zona radicular de plántulas de dalia, donde un fotoperíodo de 10 h d⁻¹, es decir, un día más corto, impulsó el crecimiento de las raíces.

Al comparar los resultados obtenidos, de la interacción de los factores sobre la relación raíz-vástago de las plántulas de chile morrón (Cuadro 6), se observó que con la PPFd de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodo de 12 h d⁻¹ (T5, DLI = 15.12) fue superior desde 21 hasta 30.24% al efecto causado por la interacción de la PPFd de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con cualquier fotoperíodo, aunque, estadísticamente igual a la respuesta obtenida con PPFd de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodo de 16 (T7, DLI=20.16) y 18 h d⁻¹ (T8, DLI = 22.68). Al respecto, Cui *et al.* (2021) investigaron los efectos de diferentes intensidades de luz y fotoperíodos en plántulas de pepino. Ellos encontraron que la biomasa de raíces, la relación raíz-vástago, el índice de plántula y la tasa de materia seca de las plántulas aumentaron a medida que la DLI aumentó de 5.41 a 11.26 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$; e indicaron que, las plántulas de hortalizas de alta calidad suelen ser trasplantes compactos y completamente enraizados con una relación raíz-vástago e índice de plántula más alta.

Cuadro 6. Influencia del PPFD, fotoperíodo e interacción sobre el volumen de raíz y relación raíz-vástago de la plántula de chile de morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

| Factor de variación | Volumen de raíz (mL) | Relación raíz-vástago (g g ⁻¹) |
|---|-------------------------|---|
| PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | * | ** |
| 200 | 2.06 b | 0.692 b |
| 350 | 2.24 a | 0.767 a |
| Fotoperíodo (h d ⁻¹) | ** | ** |
| 12 | 2.17 ab | 0.794 a |
| 14 | 2.31 a | 0.681 b |
| 16 | 2.19 a | 0.714 ab |
| 18 | 1.91 b | 0.728 ab |
| PPFD x Fotoperíodo (DLI) | * | * |
| T1: 200 x 12 (8.64) | 2.10 ab | 0.719 b |
| T2: 200 x 14 (10.08) | 2.25 ab | 0.692 b |
| T3: 200 x 16 (11.52) | 2.03 ab | 0.689 b |
| T4: 200 x 18 (12.96) | 1.85 b | 0.668 b |
| T5: 350 x 12 (15.12) | 2.25 ab | 0.870 a |
| T6: 350 x 14 (17.64) | 2.38 a | 0.671 b |
| T7: 350 x 16 (20.16) | 2.35 a | 0.739 ab |
| T8: 350 x 18 (22.68) | 1.98 ab | 0.787 ab |

PPFD= densidad de flujo de fotones fotosintéticos. DLI= integral de luz diaria. Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, *, **, ***= no significativo a $p \leq 0.05$, significativo a $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.001$, respectivamente.

6.5. Compacidad e índice de calidad de plántula

La PPFd de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ indujo una mayor compacidad de las plántulas de chile morrón, la cual superó (Tukey, $p \leq 0.05$) en 22.85% al efecto causado con la PPFd de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 7). Lo anterior concuerda con Bures *et al.* (2018), quienes en plantas de lechuga bajo efecto de lámparas LED observaron que una mayor

intensidad de luz produjo plantas más compactas. Esto puede deberse, según Sessa *et al.* (2018), a que diferentes intensidades de luz tienen un efecto directo en la compacidad, ya que al exponer el dosel vegetal a una intensidad lumínica alta, las plantas experimentan un fenómeno conocido como "efecto sombra", se conoce así al incremento que la luz intensa provoca en el proceso fotosintético en las hojas superiores de la planta, lo que a su vez estimula la producción de hormonas vegetales, como las auxinas, las cuales son promotoras de la elongación celular y el alargamiento de la zona área o vástago de la planta (Jordán y Casaretto, 2006). Cuando la intensidad de luz es alta y está bien distribuida, como cuando se utilizan lámparas LED en un sistema de producción de interiores, el efecto de sombreado se minimiza y por ende el crecimiento se vuelve más compacto (Sellaró *et al.*, 2011).

Por su parte, el fotoperíodo de 12 h d⁻¹ mostró ser suficiente para ocasionar la mayor compacidad de las plántulas de chile morrón (Cuadro 7), que superó desde 9.75% hasta 36.36% a la compacidad de las plántulas tratadas con 14 y 18 h d⁻¹, lo cual concuerda con Jeong *et al.* (2020), quienes en un estudio realizado con plántulas de pepino, obtuvieron que mediante el uso de un fotoperíodo corto de 12 h d⁻¹, se reguló el crecimiento de las plántulas de pepino, lo cual es importante para no producir plántulas con una elongación que afecte su posterior desarrollo en el ciclo de producción.

El efecto causado por la interacción de la PPFd y el fotoperíodo sobre la compacidad de las plántulas (Cuadro 7) mostró que 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 12 h d⁻¹ (T5, DLI=15.12) promovió las plántulas más compactas, estadísticamente igual a la compacidad lograda con la misma PPFd y un fotoperíodo de 18 h d⁻¹ (T8, DLI=22.68), pero que superó desde 24.35 hasta 71% a la compacidad de las plántulas obtenida bajo los efectos de T7 (DLI=20.16) y T2 (DLI=10.08), respectivamente. Hernández *et al.* (2016) señalan que la compacidad de la planta, que es la relación entre la masa seca y la altura de la planta, es otro parámetro importante para determinar la calidad de las plántulas. Un trasplante con alta masa seca y corta altura se considera una plántula de alta calidad (Currey *et al.*, 2012; Vu *et al.*, 2014).

Asimismo, el índice de calidad de plántula (ICP) obtenido con la PPFD de $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ superó (Tukey, $p \leq 0.05$) en 17.42% al ICP conseguido con la PPFD de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 7). Lo anterior, tiene relación con una investigación realizada en plantas de tomate por Fan *et al.* (2013), quienes observaron que la eficiencia energética alcanzaba su punto máximo dentro del rango de 300 a $450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, que se evidenció claramente al comparar con otros tratamientos de luz, que variaron entre 50 y $550 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante el experimento. Bajo estas condiciones de iluminación, se encontró que las plantas jóvenes exhibieron un mayor crecimiento en términos de biomasa y un índice de salud mejorado. Además, se notó un aumento en el espesor de las hojas, tanto en el parénquima en empalizada como en el parénquima esponjoso, junto con un incremento en la densidad de estomas y el área estomática por unidad de área foliar. Esto, de acuerdo con Chen *et al.* (2022), implica encontrar un equilibrio que proporcione la cantidad de luz óptima para el crecimiento sin causar daño por fotoinhibición. El control preciso de la intensidad lumínica es esencial para facilitar la adaptación de las plántulas a la luz y promover su desarrollo saludable.

El ICP alcanzado por las plántulas de chile morrón con el fotoperíodo de 12 h d^{-1} mostró superioridad desde 15.67% hasta 39.45%, con respecto al manifestado por las plántulas con los fotoperíodos de 18 y 14 h d^{-1} , respectivamente (Cuadro 7). Xia y Mattson (2022) realizaron una investigación en el cultivo de *Mesembryanthemum crystallinum* L., en el cual se amplió el fotoperíodo por encima de 12 h d^{-1} , y se observaron efectos negativos en la biomasa, altura de planta, la arquitectura de la zona radicular y el correcto desarrollo del aparato fotosintético, ya que al proporcionar una adecuada cantidad de horas luz se puede mantener estable la actividad fotosintética, lo que permite generar características morfológicas y fisiológicas de mejor calidad, sin embargo, un exceso de luz conduce a que se presenten fenómenos de foto-protección y foto-daño en los cultivos hortícolas.

La interacción entre la PPFD de $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y fotoperíodo de 12 h (T5, DLI=15.12) indujo el mayor ICP, el cual superó desde 22.92% (T8, DLI=22.68) hasta 60.70% (T2, DLI=10.08) al ICP producido por los demás tratamientos (Cuadro 7). Wang *et al.* (2021) también encontraron que, cuando la DLI se incrementó por encima de 14.40 mol m^{-2}

d^{-1} se produjeron plántulas de pepino más compactas, con mejor calibre de tallo y un eficiente desarrollo del sistema radicular, lo cual es un indicador de calidad de plántula. Estudios previos también sugieren que las plántulas de alta calidad deben exhibir hojas gruesas, tallos firmes y grandes raíces blancas (Yan *et al.*, 2019).

Cuadro 7. Influencia del PPF, fotoperíodo e interacción sobre la compactidad e índice de calidad de plántula de chile morrón cultivada con iluminación de LEDs blancos.

| Factor de variación | Compactidad (g cm ⁻¹) | Índice de calidad de plántula (cm ² g ⁻¹) |
|--|--------------------------------------|---|
| PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹) | ** | ** |
| 200 | 0.035 b | 0.77 b |
| 350 | 0.043 a | 0.91 a |
| Fotoperíodo (h d ⁻¹) | *** | *** |
| 12 | 0.045 a | 1.00 a |
| 14 | 0.033 d | 0.71 c |
| 16 | 0.036 c | 0.78 c |
| 18 | 0.041 b | 0.86 b |
| PPFD x Fotoperíodo (DLI) | *** | *** |
| T1: 200 x 12 (8.64) | 0.040 b | 0.85 bc |
| T2: 200 x 14 (10.08) | 0.029 d | 0.71 e |
| T3: 200 x 16 (11.52) | 0.033 cd | 0.73 de |
| T4: 200 x 18 (12.96) | 0.037 bc | 0.80 cde |
| T5: 350 x 12 (15.12) | 0.050 a | 1.14 a |
| T6: 350 x 14 (17.64) | 0.037 bc | 0.72 de |
| T7: 350 x 16 (20.16) | 0.040 b | 0.83 bcd |
| T8: 350 x 18 (22.68) | 0.045 a | 0.93 b |

PPFD= densidad de flujo de fotones fotosintéticos. DLI= integral de luz diaria. Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, *, **, ***= no significativo a $p \leq 0.05$, significativo a $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$ y $p \leq 0.001$, respectivamente.

VII. CONCLUSIONES

Las variables de crecimiento evaluadas en las plántulas de chile morrón, con excepción del índice de verdor foliar, mostraron requerimientos particulares de intensidad y duración de la luz o DLI.

La PPF_D de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un fotoperíodo de 14 h d^{-1} (DLI = 10.08) promovió mayor altura de plántula, área foliar e índice de área foliar.

La PPF_D de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ocasionó el mayor diámetro de tallo, independientemente del fotoperíodo.

El peso seco de las plántulas fue significativamente mayor cuando se aplicó la PPF_D de 350 o 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en combinación con un fotoperíodo de 14 h d^{-1} (DLI = 17.64 o 10.08, respectivamente).

La PPF_D de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un fotoperíodo de 12 h d^{-1} (DLI = 15.12), además de aumentar el volumen radicular, ocasionó los mejores resultados en las variables de calidad de plántula: relación raíz-vástago, compacidad e índice de calidad general de las plántulas.

VIII. LITERATURA CITADA

- Adams S.R. and Langton F.A. 2005. Photoperiod and plant growth: a review. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology 80(1): 2-10. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511882>
- Aguirre-Becerra H., García-Trejo J.F., Vázquez-Hernández C., Alvarado A.M., Feregrino-Pérez A.A., Contreras-Medina L.M. and Guevara-González R.G. 2020. Effect of extended photoperiod with a fixed mixture of light wavelengths on tomato seedlings. HortScience 55(11): 1832-1839. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15342-20>
- Al-Murad M., Razi K., Jeong B.R., Samy P.M.A. and Muneer S. 2021. Light emitting diodes (LEDs) as agricultural lighting: impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. Sustainability 13(4): 1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
- Avendaño-Abarca V.H., González-Sandoval D.C., Munguía-López J.P., Hernández-Cuevas R., Luna-Maldonado A.I., Vidales-Contreras J.A., Niño-Medina G. y Rodríguez-Fuentes H. 2020. Crecimiento y absorción total nutrimental de lechuga romana tipo baby cultivada con iluminación led bajo sistema fábrica de plantas. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 116(4): 280-293. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.011>
- Ayala-Tafoya F., López-Urquidez G.A., Parra-Delgado J.M., Retes-Manjarrez J.E., López-Orona C.A. y Yáñez-Juárez M.G. 2020. Vermicomposta, auxinas sintéticas y producción de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) en invernadero. Terra Latinoamericana 38: 257-265. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.620>
- Baligar V.C., Elson M.K., He Z., Li Y., Paiva A. de Q., Almeida A.A.F. and Ahnert D. 2020. Effects of light intensity on growth, physiological and nutritional parameters of perennial tropical legume cover crops. Agronomy 10(10): 1515. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101515>

- Bantis F., Ouzounis T. and Radoglou K. 2016. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Scientia Horticulturae* 198: 277-283. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
- Baruch Z. and Fisher M. 1991. Factores climáticos y de competencia que afectan el desarrollo de la planta en el establecimiento de una pastura. *Establecimiento y renovación de pasturas*. CIAT. Cali, Colombia. pp. 103-142.
- Bures S., Gavilán M.U. y Kotiranta S. 2018. Iluminación artificial en agricultura. *Biblioteca Horticultura*. Editorial SPE3, S.L. Valencia, España. 46 p. Disponible en <http://publicaciones.poscosecha.com/es/cultivo/395-iluminacion-artificial-en-agricultura.html>
- Calzado P.J.E. 2022. Diseño y control de un huerto urbano con herramientas de software libre. *Máster Universitario en Ingeniería Industrial*. Universidad de Sevilla, España. 116p.
- Castro F.M. y Palomar R.X. 2022. Generación de herramientas para la predicción de cosechas en variedad comercial de rosa de jardín basados en las acumulaciones de grados día y radiación acumulada (DLI). *Especialización tecnológica en Horticultura protegida*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/31187>
- Chang C.-L. and Chang K.-P. 2014. The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting. *Scientia Horticulturae* 179: 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.013>
- Chen D., Yuan K., Zhang J., Wang Z., Sun Z., Zhang H. and Hu J. 2022. Response analysis of fluorescence parameters of tomato seedlings oriented to vertical light environment adaptation. *Plant Science* 314: 111118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111118>

- Chen X.-L., Xue X.-Z., Guo W.-Z., Wang L.-C. and Qiao X. J. 2016. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. *Scientia Horticulturae* 200: 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.007>
- Ćosić M., Djurović N., Todorović M., Maletić R., Zečević B. and Stričević R. 2015. Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of sweet pepper. *Agricultural Water Management* 159: 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.014>
- Cruz S. and Gómez C. 2022. Effects of daily light integral on compact tomato plants grown for indoor gardening. *Agronomy* 12(7): 1704. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071704>
- Cui J., Song S., Yu J. and Liu H. 2021. Effect of daily light integral on cucumber plug seedlings in artificial light plant factory. *Horticulturae* 7(6): 139. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060139>
- Currey C.J., Hutchinson V.A. and Lopez R.G. 2012. Growth, morphology, and quality of rooted cuttings of several herbaceous annual bedding plants are influenced by photosynthetic daily light integral during root development. *HortScience* 47: 25-30.
- De Swart E.A.M., Groenwold R., Kanne H.J., Stam P., Marcelis L.F.M. and Voorrips R.E. 2004. Non-destructive estimation of leaf area for different plant ages and accessions of *Capsicum annuum* L. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79(5): 764-770. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511840>
- Dou H.J., Niu G., Gu M.M. and Masabni J.G. 2018. Responses of sweet basil to different daily light integrals in photosynthesis, morphology, yield, and nutritional quality. *HortScience* 53(4): 496-503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12785-17>

- Duarte M.J.C. 2019. Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. <https://hdl.handle.net/10669/85371>
- Espinal C.J.A. 2021. Efecto de la iluminación led en un sistema vertical de producción con lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo ambiente controlado. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/26650>
- Fan X.X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W. and 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>
- FAOSTAT. 2021. Índices de producción. Sitio web de la FAO. Recuperado 2 de mayo de 2022, de <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QI/visualize>.
- Fillipo R.V.H., Cano G.H.B. y Chaves O.J.A. 2010. Aplicaciones de iluminación con leds. *Scientia et Technica* 16(45): 13-18.
- Folta K.M. and Carvalho S.D. 2015. Photoreceptors and control of horticultural plant traits. *HortScience* 50(9): 1274-1280. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.9.1274>
- Fraile V.J. y Gago C.A. 2012. Iluminación con tecnología LED. Ediciones Paraninfo, SA. Madrid, España. 210p.
- Gao W., He D., Ji F., Zhang S. and Zheng J. 2020. Effects of daily light integral and LED spectrum on growth and nutritional quality of hydroponic spinach. *Agronomy* 10(8): 1082. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081082>
- Gent M.P. 2014. Effect of daily light integral on composition of hydroponic lettuce. *HortScience* 49(2): 173-179. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.2.173>

- Granda C.S.L. 2023. Manejo agronómico para obtener semillas híbridas de pimiento (*Capsicum annum* L.) en el Valle de Cañete, región Lima. Perú. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Piura. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/4358>
- Guo R., Li W., Wang X., Chen B., Huang Z., Liu T., Chen X., XuHan X. and Lai Z. 2019. Effect of photoperiod on the formation of cherry radish root. *Scientia Horticulturae* 244: 193-199.
- He D., Yan Z., Sun X. and Yang P. 2020. Leaf development and energy yield of hydroponic sweetpotato seedlings using single-node cutting as influenced by light intensity and LED spectrum. *Journal of Plant Physiology* 254: 153274. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153274>
- Hernández D.J. 2003. Crecimiento y desarrollo del cilantro *Coriandrum sativum* L. por efecto del fotoperíodo y la temperatura y su control con fitoreguladores. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/5784>
- Hernández R., Eguchi T., Deveci M. and 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>
- Hwang H., An S., Pham M.D., Cui M. and Chun C. 2020. The combined conditions of photoperiod, light intensity, and air temperature control the growth and development of tomato and red pepper seedlings in a closed transplant production system. *Sustainability* 12(23): 9939. <https://doi.org/10.3390/su12239939>
- Iqbal Z., Munir M. and Sattar M.N. 2022. Morphological, biochemical, and physiological response of butterhead lettuce to photothermal environments. *Horticulturae* 8: 515. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060515>

- Jankiewicz L.S. y Acosta-Zamudio C. 2003. Auxinas. pp. 21-66. En: Jankiewicz L.S. (Coord.). Reguladores de crecimiento, desarrollo y resistencia en plantas. Vol. 1. Propiedades y acción. Mundi-Prensa-Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Jeong H.W., Lee R.H., Kim H.M., Kim H.M., Hwang S.A. and Hwang S.J. 2020. Using light quality for cucumber seedling growth control in a closed-type plant production system. *Plants* 9: 639. <https://doi.org/10.3390/plants9050639>
- Ji F., Wei S.Q., Liu N., Xu L.J. and Yang P. 2020. Growth of cucumber seedlings in different varieties as affected by light environment. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(5): 73-78. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201305.5566>
- Johkan M., Shoji K., Goto F., Hashida S. and Yoshihara T. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience* 45(12): 1809-1814. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1809>
- Jordán M. y Casaretto J. 2006. Hormonas y reguladores del crecimiento: auxinas, giberelinas y citocininas. In: Squeo F.A. y Cardemil L. (eds.). *Fisiología Vegetal*. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile. 15:1-28.
- Ke X., Yoshida H., Hikosaka S. and Goto E. 2022. Optimization of photosynthetic photon flux density and light quality for increasing radiation-use efficiency in dwarf tomato under LED light at the vegetative growth stage. *Plants* 11(1): 121. <https://doi.org/10.3390/plants11010121>
- Kelly N., Choe D., Meng Q. and 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>

- Lee S.W., Seo J.M., Lee M.K., Chun J.-H., Antonisamy P., Arasu M.V., Suzuki T., AIDhabi N.A and Kim S.J. 2014. Influence of different LED lamps on the production of phenolic compounds in common and Tartary buckwheat sprouts. *Industrial Crops and Products* 54: 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.024>
- Legnani G. and Miller W.B. 2001. Short photoperiods induce fructan accumulation and tuberous root development in *Dahlia* seedlings. *New Phytologist* 149(3): 449-454. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00055.x>
- Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D., Hsu M.H., Yang Z.W. and Yang C.M. 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Scientia Horticulturae* 150: 86-91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>
- Liu N., Ji F., Xu L. and He D. 2019. Effects of LED light quality on the growth of pepper seedling in plant factory. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 12(5): 44-50. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.4847>
- Meneses-Lazo R., Garruña R., Echevarría-Machado I., Alvarado-López C., Villanueva-Couoh E., García-Maldonado J.Q. and Cristóbal-Alejo J. 2020. Growth, chlorophyll fluorescence and gas exchange of pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) plants in response to uptake and partitioning of nutrients. *Chilean Journal of Agricultural Research* 80(4): 585-597. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000400585>
- Nakano A., Ohtake N., Yoneda T. and Shinoda A. 2017. Effects of LED alternating irradiation on tomato seedling quality and root development after transplanting. *Root Research* 26(1): 3-9.

- Osnato M., Cota I., Nebhnani P., Cereijo U. and Pelaz S. 2022. Photoperiod control of plant growth: flowering time genes beyond flowering. *Frontiers in Plant Science* 12: 805635. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.805635>
- Paradiso R. and Proietti S. 2022. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems. *Journal of Plant Growth Regulation* 41: 742-780. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
- Park S.W., An S. and Kwack Y. 2020. Changes in transpiration rates and growth of cucumber and tomato scions and rootstocks grown under different light intensity conditions in a closed transplant production system. *Protected Horticulture and Plant Factory* 29(4): 399-405. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2020.29.4.399>
- Park Y. and 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>
- Parrales V.D.A. 2015. Comportamiento agronómico del cultivo de pimiento (*Capsicum annum* L.) con diferentes abonos orgánicos en la Unidad Educativa Calazacón de Santo Domingo de los Tsáchilas, año 2014. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1982>
- Pennisi G., Orsini F., Landolfo M., Pistillo A., Crepaldi A., Nicola S., Fernández J.A., Marcelis L.F.M. and Gianquinto G. 2020a. Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. *European Journal of Horticultural Science* 85(5): 329-338. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.4>

- Pennisi G., Pistillo A., Orsini F., Cellini A., Spinelli F., Nicola S., Fernandez J.A., Crepaldi A., Gianquinto G. and Marcelis L.F.M. 2020b. Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Scientia Horticulturae* 272: 109508. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>
- Ramos G.Y.F. 2015. Diseño e implementación de un sistema de control para maximizar la capacidad productiva de las plantas en granjas verticales por medio de luz artificial. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. Colombia. 119p.
- Rodríguez M.J. 2019. Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED. Tesis de licenciatura. Universidad de Almería. Repositorio <http://hdl.handle.net/10835/8021>
- Saavedra E., Rey F.J. and Luyo J. 2016. Sistemas de Iluminación, situación actual y perspectivas. *Revista TECNIA* 26(2): 44-62.
- Sellaro R., Yanovsky M.J. and Casal J.J. 2011. Repression of shade-avoidance reactions by sunfleck induction of HY5 expression in *Arabidopsis*. *The Plant Journal* 68: 919-928.
- Sessa G., Carabelli M., Possenti M., Morelli G. and Ruberti I. 2018. Multiple pathways in the control of the shade avoidance response. *Plants* 7(4): 102. <https://doi.org/10.3390/plants7040102>
- SIAP. 2020. Anuario estadístico de la producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>. Consulta: enero de 2022.

- Song J., Chen Z., Zhang A., Wang M., Jahan M.S., Wen Y. and Liu X. 2022. The positive effects of increased light intensity on growth and photosynthetic performance of tomato seedlings in relation to night temperature level. *Agronomy* 12(2): 343. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020343>
- StatSoft, Inc. 2004. STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com.
- Steiner A.A. 1984. The universal nutrient solution. In: Proceeding of the 6th International Congress on Soilless Culture. International Society for Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. pp.633-649.
- Vásquez S.P. 2018. Efecto de tecnologías de iluminación e intensidades de luz sobre el crecimiento vegetativo de cuatro cultivares de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat) para la obtención de varas florales de longitud comercial en la región Lambayeque. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque, Perú. Repositorio <https://hdl.handle.net/20.500.12893/2691>
- Vu N.T., Kim Y.S., Kang H.M. and Kim I.S. 2014. Influence of short-term irradiation during pre- and post-grafting period on the graft-take ratio and quality of tomato seedlings. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 55: 27-35. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0115-5>
- Wang S., Fang H., Xie J., Wu Y., Tang Z., Liu Z., Lv J. and Yu J. 2021. Physiological responses of cucumber seedlings to different supplemental light duration of red and blue LED. *Frontiers in Plant Science* 12: 709313. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.709313>
- Wang X.Y., Xu X.M. and Cui J. 2015. The importance of blue light for leaf area expansion, development of photosynthetic apparatus, and chloroplast ultrastructure of *Cucumis sativus* grown under weak light. *Photosynthetica* 53: 213-222. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0083-8>

- Wang Y., Chu Y., Wan Z., Zhang G., Liu L. and Yan Z. 2021. Root architecture, growth and photon yield of cucumber seedlings as influenced by daily light integral at different stages in the closed transplant production system. *Horticulturae* 7(9): 328. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090328>
- Warner R., Wu B.-S., MacPherson S. and Lefsrud M. 2023. How the distribution of photon delivery impacts crops in indoor plant environments: a review. *Sustainability*15(5): 4645. <https://doi.org/10.3390/su15054645>
- Wu P.C., Ashman C., Awty-Carroll D., Robson P. and Clifton-Brown J. 2022. Optimizing seed-based *Miscanthus* plug plant production with supplemental heat and light, compost type and volume. *GCB Bioenergy* 14(6): 624-638. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12920>
- Xia J. and Mattson N. 2022. Response of common ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) to photoperiod/daily light integral in vertical hydroponic production. *Horticulturae* 8(7): 653. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070653>
- Yamamoto S., Misumi M. and Nawata E. 2008. Effects of photoperiod on vegetative growth, flowering and fruiting of *Capsicum frutescens* L. and *C. annuum* L. in Japan. *Environmental Control in Biology* 46(1): 39-47. <https://doi.org/10.2525/ecb.46.39>
- Yan Z., He D., Niu G. and Zhai H. 2019. Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage. *Scientia Horticulturae* 248: 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.002>
- Yan Z., He D., Niu G., Zhou Q. and Qu Y. 2020. Growth, nutritional quality, and energy use efficiency in two lettuce cultivars as influenced by white plus red versus red plus blue LEDs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2): 33-40. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.5135>

- Yan Z., Wang L., Wang Y., Chu Y., Lin D. and Yang Y. 2021. Morphological and physiological properties of greenhouse-grown cucumber seedlings as influenced by supplementary light-emitting diodes with same daily light integral. *Horticulturae* 7: 361. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100361>
- Zha L. and Liu W. 2018. Effects of light quality, light intensity, and photoperiod on growth and yield of cherry radish grown under red plus blue LEDs. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 59: 511-518. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0048-5>
- Zhang G., Li Z., Cheng J., Cai X., Cheng F., Yang Y. and Yan Z. 2022. Morphological and physiological traits of greenhouse-grown tomato seedlings as influenced by supplemental white plus red versus red plus blue LEDs. *Agronomy* 12(10): 2450. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102450>