



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

ILUMINACIÓN LED EN EL DESARROLLO Y CALIDAD DE ESPECIES HORTÍCOLAS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

JORGE ENRIQUE MENDOZA PAREDES

Bajo la supervisión de: DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ



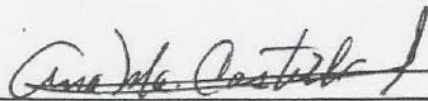
Chapingo, Estado de México, junio de 2020

**ILUMINACIÓN LED EN EL DESARROLLO Y CALIDAD DE ESPECIES
HORTÍCOLAS**

Tesis realizada por **JORGE ENRIQUE MENDOZA PAREDES** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



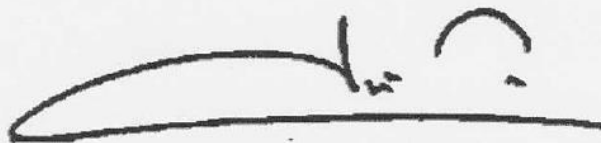
DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. EDILBERTO AVITIA GARCÍA

ASESOR:



Ph. D. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR

LECTOR EXTERNO:



DRA. LIBIA IRIS TREJO TÉLLEZ

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo General	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Contexto mundial	4
2.2 Características de diferentes sistemas de cultivo	4
2.3 La luz y su relación con las plantas	9
2.4 Cultivos hortícolas y su producción en ambiente controlado	15
2.5 Cultivos hortícolas con potencial para la producción en ambiente controlado	16
2.5.1 Cilantro (<i>Coriandrum sativum</i> L.).....	16
2.5.2 Chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.).....	17
2.6 Literatura citada	18
3. RESPUESTA DE CILANTRO (<i>Coriandrum sativum</i> L.) A LA LUZ LED AZUL Y ROJA.....	26
3.1 Resumen	27
3.2 Abstract.....	28
3.3 Introducción	29
3.4 Materiales y Métodos.....	30
3.4.1 Germinación	30
3.4.2 Cámara y gabinetes de crecimiento	30

3.4.3	Tratamientos con diferentes proporciones de luz complementaria LED roja y azul	31
3.4.4	Condiciones de crecimiento en la cámara de crecimiento	31
3.4.5	Variables de crecimiento de planta	34
3.4.6	Concentración de pigmentos fotosintéticos	34
3.4.7	Concentración nutrimental en la parte aérea	34
3.4.8	Diseño experimental y análisis estadístico	34
3.5	Resultados y discusión	35
3.5.1	Variables de crecimiento	35
3.5.2	Concentración de pigmentos fotosintéticos	37
3.5.3	Concentración nutrimental en la parte aérea	41
3.6	Conclusiones	48
3.7	Literatura citada	48
4.	EFFECTO DE DIFERENTES RELACIONES DE LUZ AZUL:ROJA EN LA CALIDAD DE PLÁNTULAS DE CHILE HABANERO <i>Capsicum chinense</i> Jacq.	53
4.1	Resumen	54
4.2	Abstract.....	55
4.3	Introducción	56
4.4	Materiales y métodos.....	57
4.4.1	Germinación.....	57
4.4.2	Cámara y gabinetes de crecimiento	57
4.4.3	Tratamientos con diferentes proporciones de luz complementaria LED roja y azul.	58
4.4.4	Condiciones de la cámara de crecimiento.....	60
4.4.5	Variables de crecimiento	60
4.4.6	Concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja	61
4.4.7	Diseño experimental y análisis estadístico	61
4.5	Resultados y discusión	61

4.5.1	Variables de crecimiento de la parte aérea	61
4.5.2	Concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja	71
4.6	Conclusiones	74
4.7	Literatura citada	75
5.	EFFECTO DE DIFERENTES PROPORCIONES DE LUZ LED AZUL:ROJA EN PLANTAS DE CHILE HABANERO (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.)	80
5.1	Resumen	81
5.2	Abstract.....	82
5.3	Introducción	83
5.4	Materiales y métodos.....	84
5.4.1	Cámara y gabinetes de crecimiento	84
5.4.2	Tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja	84
5.4.3	Material vegetal	85
5.4.4	Trasplante	87
5.4.5	Variables de crecimiento de la planta.....	88
5.4.6	Concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja	89
5.4.7	Compuestos fenólicos totales en hoja.....	89
5.4.8	Concentración nutrimental en hojas	90
5.4.9	Variables anatómicas y germinación de polen	90
5.4.10	Diseño experimental y análisis estadístico	91
5.5	Resultados y discusión	91
5.5.1	Variables de crecimiento de la planta.....	91
5.5.2	Concentración de pigmentos fotosintéticos y compuestos fenólicos en hoja	98
5.5.3	Concentración nutrimental en hoja.....	101
5.5.4	Variables anatómicas y viabilidad de polen.....	107
5.6	Conclusiones	110
5.7	Literatura citada	110

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de sistemas de producción de plantas en base al control y estabilidad de su manejo (Kozai y Niu, 2016b).	6
Cuadro 2. Componentes principales de un sistema de fábrica de plantas (Kozai y Niu, 2016b).....	7
Cuadro 3. Características y tipos de plantas para cultivo en un sistema de fábrica de plantas (Kozai y Niu, 2016b).	8
Cuadro 4. Propiedades físicas de los tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja en cilantro ‘Gladiador’ cultivado bajo condiciones controladas.	33
Cuadro 5. Propiedades físicas de tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja en plántulas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas.	59
Cuadro 6. Variables de crecimiento evaluadas en plántulas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.	70
Cuadro 7. Pigmentos fotosintéticos en hojas de plántulas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.	73
Cuadro 8. Propiedades físicas de los tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja en chile habanero cultivado bajo condiciones controladas.	87
Cuadro 9. Variables de crecimiento en chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja...	96
Cuadro 10. Pesos fresco y seco de plantas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja...	97

Cuadro 11. Pigmentos fotosintéticos y compuestos fenólicos en hojas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.	100
Cuadro 12. Concentración de macronutrientes (N, K, P, Ca, Mg) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, B, Cu) en hojas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.	106
Cuadro 13. Germinación de polen y grosor de hoja en chile habanero cultivado en condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución tecnológica de los sistemas de cultivo de plantas, A) cultivo en campo abierto (Eremeychuk, 2019), B) cultivo en campo abierto con uso eficiente de agua (Productos Químicos Andinos, 2011), C) cultivo bajo cubierta plástica (invernadero) (NOVAGRIC, 2016), D) cultivo en invernadero con control ambiental (Agrimont, 2019), E) sistema de producción cerrado de plantas (total control de condiciones ambientales) (Innoplex, 2014).	5
Figura 2. Características, beneficios y resultados del cultivo de plantas en FPLA (Kozai, 2016; Kozai y Niu, 2016b; Ting et al., 2016).	9
Figura 3. Funciones de la luz en la vida de la planta (Berkovich et al., 2017). .	10
Figura 4. Espectro electromagnético de luz, pigmentos fotosintéticos y fotorreceptores involucrados en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Viršilė et al., 2017).	11
Figura 5. Utilización de varias longitudes de onda de luz para la fotosíntesis por las clorofilas y para la foto morfogénesis por el fitocromo, criptocromo y fototropina (Gupta y Agarwal, 2017).	13
Figura 6. Espectros electromagnéticos de diversas fuentes de luz artificial (Gupta y Agarwal, 2017).	14
Figura 7. Espectro de diferentes colores de LEDs. Irradiancia relativa versus la máxima longitud de onda de 14 diferentes conjuntos de LED (Naznin y Lefsrud, 2017).....	14
Figura 8. Variables de crecimiento de plantas de cilantro ‘Gladiador’ cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.	37
Figura 9. Concentración de pigmentos fotosintéticos en hojas de plantas de cilantro ‘Gladiador’ cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.	40

Figura 10. Concentración mineral de macronutrientes en plantas de cilantro ‘Gladiator’ cultivadas bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.....	42
Figura 11. Concentración mineral de micronutrientes en plantas de cilantro ‘Gladiator’ cultivadas bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.....	44
Figura 12. Cortes anatómicos longitudinales de ovario y polen de anteras de flores en chile habanero cultivado en condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.	109

DEDICATORIAS

A mi padre Pedro Jorge Mendoza Cuatecontzi y a mi madre Blanca Estela Paredes Sánchez, que han sido, son y serán siempre la parte más importante de mi vida, los arquitectos de lo que soy ahora, el pilar que me ha mantenido firme para seguir adelante ante todas adversidades y retos. A ellos a los cuales les debo todo y por los que daré todo, gracias por sus consejos, por su sabiduría, por su paciencia, por su ayuda y por su amor incondicional que ha guiado durante todo lo llevo que vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por abrirme sus puertas para adquirir nuevos conocimientos.

Al comité asesor, a la Dra. Ana María Castillo González, Dr. Edilberto Avitia García, al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, a la Dra. María del Rosario García Mateos y a la Dra. Libia Iris Trejo Téllez por su disposición e importantes aportaciones realizadas al desarrollo del presente trabajo.

A la Q.F.B. Ángela Barrera por el apoyo brindado en el laboratorio de anatomía de frutales para la realización de este trabajo.

A los profesores del Instituto de Horticultura que brindaron sus conocimientos de manera desinteresada y amable.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de doctorado.

DATOS BIOGRAFICOS



Datos personales

El C. Jorge Enrique Mendoza Paredes (CURP: MEPJ891011HMCNRR02) es originario del Estado de México. Nació el 11 de octubre de 1989. Realizó sus estudios de licenciatura en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla cursando la carrera de Licenciatura en Químico Farmacobiólogo durante el periodo de 2007-2012, en el cual obtuvo el título y la cédula (8075080).

Posteriormente realizó la Maestría en Ciencias en Horticultura en la Universidad Autónoma Chapingo durante el periodo de 2013-2014, obteniendo el grado de Maestro en Ciencias con la tesis titulada: Valoración de sustratos en la producción hidropónica vertical de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), en el cual obtuvo el grado y la cédula (9944135).

En enero del 2016 ingresó al Instituto de Horticultura en la Universidad Autónoma Chapingo para realizar los estudios de Doctor en Ciencias en Horticultura en el Departamento de Fitotecnia.

RESUMEN GENERAL

ILUMINACIÓN LED EN EL DESARROLLO Y CALIDAD DE ESPECIES HORTÍCOLAS

El cilantro (*Coriandrum sativum* L.) es una planta con reconocidos usos culinarios y diversas propiedades medicinales, mientras el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es el cultivo hortícola de mayor importancia económica en la península de Yucatán en México. Estas características las hacen ser adecuadas para cultivarse en ambiente controlado con iluminación LED y permitiría tener una producción continua, lo que a su vez daría como resultado un mayor rendimiento, y en un cultivo libre de plagas y enfermedades. Los objetivos fueron evaluar el efecto de cinco tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul(A):roja(R) y luz fluorescente (testigo), en condiciones controladas de crecimiento en plantas de cilantro, plántulas y plantas de chile habanero, en parámetros de crecimiento, concentración de pigmentos fotosintéticos y de nutrimentos en plantas de cilantro y de habanero. Además, se evaluaron compuestos fenólicos en hoja, germinación de polen, grosor de hoja, anatomía de ovario y antera en plantas de chile habanero. En cilantro se observó que una proporción azul:roja de A37.7 %:R62.3 % promovió el crecimiento y la concentración de pigmentos fotosintéticos, mientras una proporción de A57.7 %:R42.3 % promovió la concentración de nutrimentos en plantas. En plántula de habanero, el testigo promovió el crecimiento de hoja, mientras la luz azul promovió el desarrollo del tallo; los pigmentos fotosintéticos no tuvieron efectos estadísticos, excepto para la clorofila a. En planta de habanero, la luz azul indujo el crecimiento vegetativo y concentración de compuestos fenólicos, pero tuvo un efecto negativo en el rendimiento del fruto; la luz roja promovió la concentración de pigmentos fotosintéticos y rendimiento de fruto. La mayor y/o menor concentración de macronutrimentos se registró con luces monocromáticas azul y roja, respectivamente, mientras la mayor concentración de micronutrimentos se observó con una proporción de A34.5 %:R65.5 % y A100 %:R0 %. El testigo incrementó la germinación de polen y grosor de hoja. La anatomía de los óvulos en los ovarios y el polen en las anteras no presentaron ningún efecto de los tratamientos.

Palabras clave: Cilantro, *Coriandrum sativum* L., habanero, *Capsicum chinense* Jacq., diodo emisor de luz

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Director de Tesis: Dra. Ana María Castillo González

GENERAL ABSTRACT

LED LIGHTING IN THE DEVELOPMENT AND QUALITY OF HORTICULTURAL SPECIES

Coriander (*Coriandrum sativum* L.) is a plant of widely accepted culinary use and several medicinal properties, while habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) is the most economically important horticultural crop in the Yucatan peninsula in México. These characteristics make them suitable for cultivation under controlled environment with LED lighting as it would allow continuous production, which in turn would result in increased yield, and in a pest and disease-free crop. The objectives were to evaluate the effect of five treatments with different ratios of blue(B):red(R) LED light and fluorescent light as control under controlled growth conditions in coriander plants and habanero pepper seedlings and plants, on growth parameters, photosynthetic pigments concentration, and nutrient status in coriander and habanero pepper plants. In addition, phenolic content in leaf, pollen germination, leaf thickness, anatomy of the ovary and anther in habanero pepper plant were studied. In coriander it was observed that a blue:red ratio of B37.7 %:R62.3 % promoted growth and photosynthetic pigment concentration, whereas a B57.7 %:R42.3 % ratio promoted nutrient accumulation in plants. In habanero seedlings, the control treatment promoted leaf growth, while blue light promoted stem development; photosynthetic pigments had no statistical effects except for chlorophyll a. In habanero pepper, blue light induced vegetative growth and, total phenols concentration, but has a negative effect on fruit yield; red light promoted the accumulation of photosynthetic pigments and fruit yield. The highest and/or lowest concentration of macronutrients was recorded with blue and red monochromatic lights, respectively, while the highest concentration of micronutrients was observed with a B34.5%:R65.5% and B100%:R0% ratio. The control treatment increased pollen germination and leaf thickness. The anatomy of the ovules in the ovaries and pollen in the anthers did not exhibit any effect by treatments.

Key words: Coriander, *Coriandrum sativum* L., habanero pepper, *Capsicum chinense* Jacq., light emitting diode

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Advisor: Dra. Ana María Castillo González

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente la producción de alimentos a nivel mundial está transitando por la problemática del cambio climático, reducción del agua para riego e insuficiente disponibilidad de superficie de cultivo para abastecer una demanda creciente de la población mundial que se estima de 9300 millones de personas para el año 2050 (Food and Agriculture Organization, 2009). Antes estas adversidades, la tecnología podría incidir en incrementar los rendimientos de los cultivos.

Una de las alternativas que se ha propuesto y se ha llevado a la práctica comercial actual, es la producción de ciertos cultivos en sistemas cerrados de producción con iluminación artificial. En este sistema de producción las variables ambientales de crecimiento y nutrición involucradas están controladas, con lo cual se tienen las condiciones adecuadas para que las plantas crezcan a su máximo potencial. La iluminación artificial LED en el sistema sustituye al sol como fuente de luz, y con las variables mencionadas las plantas crecen en un sistema multinivel aislado del exterior, asegurando la ausencia de plagas o enfermedades y, por ende, no hay aplicación de pesticidas. En un sistema multinivel el rendimiento aumenta en relación con la superficie por el número de niveles que se tiene, generando rendimientos, 10 veces superiores, como mínimo, respecto a un invernadero de alta tecnología (Kozai y Niu, 2016b). Estos sistemas de producción comercialmente son conocidos como fábricas de plantas con luz artificial (FPLA), actualmente diversas compañías en continentes como Asia, Europa y América (Norteamérica) han tenido éxito en su implementación y comercialización (Kozai, Fang, Chun, Yang, Tong, Cheng, ... y Lu, 2016; Fang, Inada, Shimamura, Kitagawa, Sasaki, Hagiya, ... y Yang, 2016).

En México existe un potencial para que ciertos cultivos tengan la posibilidad de ser cultivados en un sistema de producción en ambiente controlado. En el

cultivo de cilantro se podría implementar exitosamente, es una planta culinaria de gran tradición nacional por su consumo y exportación a EUA (SIAP, 2020). Sin embargo, en muchas regiones del mundo, al igual que en México, el cultivo del cilantro tiene poca sanidad para el consumo humano en fresco (Tibaduiza-Roa, Huerta-de la Peña, Morales-Jiménez, Hernández-Anguiano y Muñiz-Reyes, 2018), debido al suelo donde se cultiva, el agua de riego y al manejo que se le proporciona (da Silva, Soares, Gheyi, Oliveira, Filho y do Carmo, 2016b; da Silva, Oliveira, Soares, Gheyi, Santana y Pinho, 2018; Shashidhar, Pujari, Sharatbabu, Patil, Arif y Dharamatti, 2017). Esto ocasiona que pueda existir la acumulación de metales pesados en concentraciones tóxicas en la planta (Gola, Malik, Shaikh y Sreekrishnan, 2016), agentes biológicos patógenos, entre otros inconvenientes.

Por otra parte, el chile habanero en México es un producto hortícola con denominación de origen otorgada en el 2010 para la región de la península de Yucatán el cual es una de las especies hortícolas de mayor importancia en esta región, como también para otros centros de producción en el país (Ruiz-Lau, Medina y Martínez, 2011). Actualmente, la demanda de chile habanero para consumo nacional y para exportación es superior al abasto que ofrece la península de Yucatán, ya que cuenta con 100 ha de las 1200 ha que por denominación de origen se requiere para satisfacer la demanda (Orta, 2018). El Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), generaron 10 variedades mejoradas y certificadas, con niveles de pungencia superiores a las 500 000 unidades Scoville; con usos en la industria alimentaria, farmacológica, cosmética e inclusive militar (Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2016).

Dada esta información y tomando en cuenta la importancia que ha adquirido el cultivo de plantas en sistemas cerrados con ambiente controlado para producción comercial a nivel mundial, los objetivos de este trabajo fueron:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Conocer el efecto de diferentes proporciones de luz LED azul y roja en plantas de cilantro, plántula y planta de chile habanero en condiciones ambientales controladas.

1.1.2 Objetivos específicos

a) Determinar el efecto de luz LED roja, azul y sus combinaciones en el crecimiento, contenido de pigmentos fotosintéticos y estado nutrimental de plantas de cilantro.

b) Evaluar el efecto de luz LED roja, azul y sus combinaciones en la calidad de plántulas de chile habanero.

c) Determinar el efecto de luz LED roja, azul y sus combinaciones en las variables de crecimiento, rendimiento, frecuencia estomática, contenido de pigmentos fotosintéticos, contenido de compuestos fenólicos en hojas, contenido nutrimental foliar, estructura anatómica de las hojas y flores en antesis y viabilidad de los granos de polen en plantas de chile habanero.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Contexto mundial

La producción de cultivos hortícolas seguirá con una tendencia de aumento, pero enfrentando problemas como el cambio climático, menor disponibilidad de agua para el riego, insuficiente superficie de cultivo y salinización de suelos agrícolas. Además de estos problemas, enfrentará un incremento en la población, ya que para el año 2050, se tiene proyectado que existirán cerca de 9300 millones de personas a nivel mundial, lo que traerá consigo un aumento en la demanda de alimentos. Sin embargo, debido a que solo existe 10% más de superficie cultivable a la ya existente, solo se espera que se pueda abastecer esta nueva demanda con altos rendimientos en la superficie ya existente (FAO, 2009).

2.2 Características de diferentes sistemas de cultivo

Las formas de cultivo que a nivel mundial existen, pueden dividirse en cinco grupos (Figura 1), este tipo de técnicas se clasifican principalmente en torno al control de las variables ambientales y de crecimiento en las cuales las plantas crecen y se desarrollan; siendo el sistema en campo abierto (Figura 1A; Cuadro 1) el que tiene menos control en las variables ambientales, hasta llegar de manera progresiva al sistema de producción de plantas cerrado, donde todas las variables ambientales y de crecimiento son controladas y monitoreadas durante todo el ciclo de producción; en estos sistemas de producción la luz solar es reemplazada por iluminación artificial. Otra característica muy importante, es que no existe aparición de enfermedades o plagas, debido al control que se tiene del cultivo y que además se mantiene aislado del exterior (Figura 1E; Cuadro 1). Estos cinco grupos de técnicas de cultivo, es la evolución lógica de la agricultura para muchas especies comerciales que se muestran en la Figura 1A-E,

en donde se ha adaptado su ciclo de desarrollo para así tener un mejor rendimiento a través del control de variables que afectan su crecimiento y rendimiento, con lo cual también se aumenta el uso eficiente de los recursos (Kozai y Niu, 2016b; Ting, Lin y Davidson, 2016).



Figura 1. Evolución tecnológica de los sistemas de cultivo de plantas, A) cultivo en campo abierto (Eremeychuk, 2019), B) cultivo en campo abierto con uso eficiente de agua (Productos Químicos Andinos, 2011), C) cultivo bajo cubierta plástica (invernadero) (NOVAGRIC, 2016), D) cultivo en invernadero con control ambiental (Agrimont, 2019), E) sistema de producción cerrado de plantas (total control de condiciones ambientales) (Innoplex, 2014).

En el Cuadro 1, se pueden observar las diferencias en el comportamiento de la parte aérea y raíz en plantas cultivadas bajo cuatro diferentes formas de cultivo; el sistema en campo abierto es el de menor control e inversión monetaria, pero con menor rendimiento; por otro lado, el sistema de producción cerrado es la forma de mayor control e inversión, pero con mayor rendimiento (Kozai, 2016).

Cuadro 1. Clasificación de sistemas de producción de plantas en base al control y estabilidad de su manejo (Kozai y Niu, 2016b).

Características	Sistemas de producción			
	Campo abierto	Cultivo en suelo*	Cultivo con hidroponía *	Sistema de producción cerrado
EN parte aérea	MB	B	B	B
CA parte aérea	MB	M	M	M
EN raíz	A	A	B	B
CA raíz	B	B	A	A
V rendimiento y calidad	A	M	RB	B
Inv superficie	B	M	RA	EA
Rendimiento	B	M	RA	EA
Fuente de iluminación	Sol	Sol	Sol	IA

*Cultivo en invernadero; MB= Muy bajo; RB= Relativamente bajo; B= Bajo; M= Medio; RA= Relativamente alto; A= Alto; MA= Muy alto; EA= Extremadamente alto; EN parte aérea= Estabilidad natural de la parte aérea; CA parte aérea= Controlabilidad artificial de la parte aérea; EN raíz= Estabilidad natural de la zona de raíz; CA raíz= Controlabilidad artificial de la zona de raíz; V rendimiento y calidad= Vulnerabilidad de rendimiento y calidad; Inv superficie= Inversión inicial por unidad de superficie; IA= Iluminación artificial.

Existen tres parámetros para establecer una producción sostenible de alimentos:

- Eficiencia del uso de recursos (la relación de la cantidad de recursos invertidos en producir y los recursos aportados)
- Costo de producción
- Vulnerabilidad del rendimiento

La estabilidad de crecimiento de un cultivo que existe a campo abierto es muy baja, debido a las condiciones ambientales variables a las que está expuesta la parte aérea; en el caso de cultivos en invernadero es también baja su estabilidad porque continúa dependiendo de variables ambientales, en un sistema de cerrado de producción es aún menos baja porque enteramente depende su desarrollo del control ambiental artificial que se le brinda a la planta.

A pesar de lo anterior; a mayor control de las variables ambientales, la vulnerabilidad (pérdida o daños) de un cultivo se ve disminuida y se incrementa el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos.

En el sistema de producción cerrado, se tiene como principal característica, el uso de luz artificial que suple a la luz solar para hacer crecer a una planta; además de la capacidad del control de las variables ambientales y del crecimiento. Con estas características, se establece el nombre a este tipo de sistema de producción cerrado de plantas como: fábrica de plantas con luz artificial (FPLA), en la cual se maximiza la eficiencia del uso de recursos, costo de producción y se disminuye la vulnerabilidad del rendimiento; en el Cuadro 2 se especifican las características esenciales que una FPLA debe tener y en el Cuadro 3 el tipo de plantas que se pueden cultivar, respecto a las características físicas que poseen y además del uso comercial que se le dé (Kozai y Niu, 2016b).

Cuadro 2. Componentes principales de un sistema de fábrica de plantas (Kozai y Niu, 2016b).

Componentes
Estructura y condiciones herméticas
Aislamiento térmico estructural
Sistema de desinfección de personal humano
Sistema de multiniveles para cultivo
Sistema de aire acondicionado y circulación interna de aire
Sistema de fertilización con CO ₂ ambiental
Sistema de iluminación artificial
Sistema de recirculación y esterilización de la solución nutritiva

Cuadro 3. Características y tipos de plantas para cultivo en un sistema de fábrica de plantas (Kozai y Niu, 2016b).

Características de las plantas
Plantas de porte pequeño (> 30 cm)
Tasa de crecimiento rápido (10-30 días)
Bajo requerimiento de luz
Producto de alto valor
Capacidad de aumento de calidad del producto a mediante el control ambiental
Proporción comestible o comercializable (<85 %)
Tipos de plantas con futuro comercial (corto-mediano plazo)
Germinados
Hortalizas de hoja
Plántulas ornamentales y hortalizas
Plantas medicinales
Plantas aromáticas y culinarias
Plantas ornamentales
Hortalizas de raíz pequeñas
Plantas madre (fresa)
Fresa, arándanos, zarzamora

Dada las características que debe tener una FPLA al igual que las plantas que pueden ser cosechadas en este sistema de cultivo, en la Figura 2 se describe y se engloban las características, beneficios y resultados del uso de FPLA a nivel comercial, abarcando desde la parte de producción, el rendimiento, calidad y finalmente, el impacto en la economía y medio ambiente (Kozai, 2016; Kozai y Niu, 2016b; Ting *et al.*, 2016).

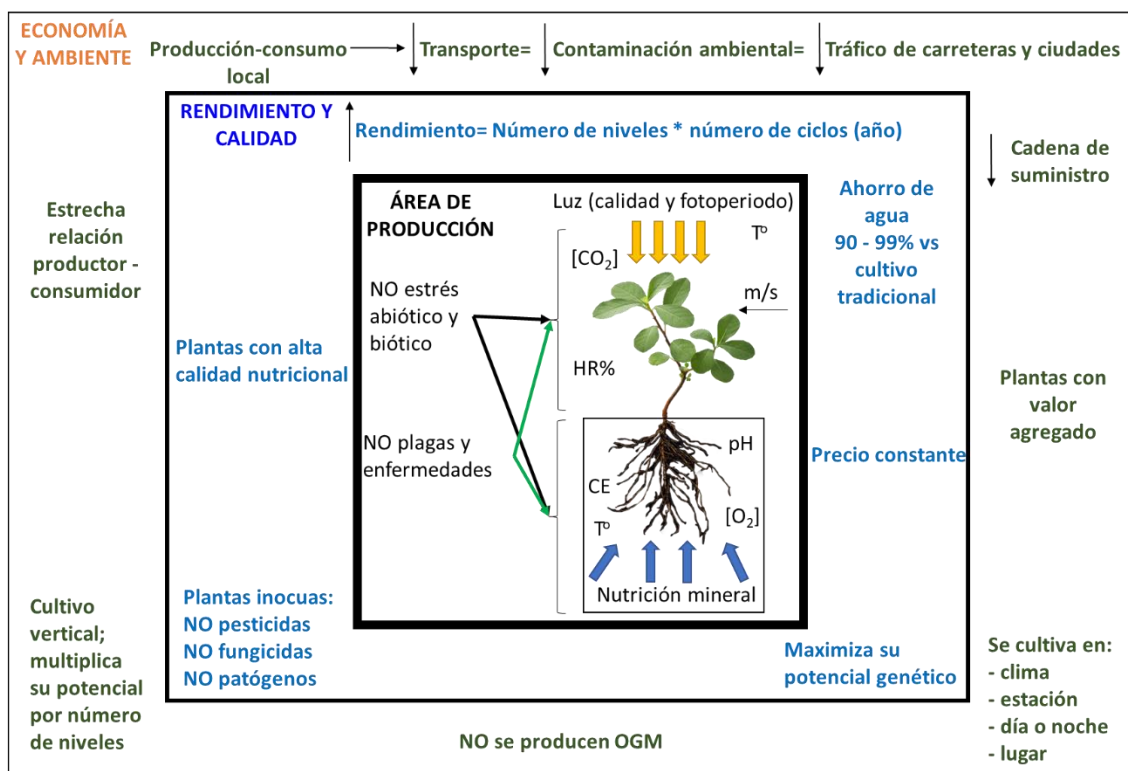


Figura 2. Características, beneficios y resultados del cultivo de plantas en FPLA (Kozai, 2016; Kozai y Niu, 2016b; Ting *et al.*, 2016).

2.3 La luz y su relación con las plantas

La luz que las plantas reciben para su crecimiento es la cuestión clave que juega la luz artificial en estos sistemas de producción cerrados, es además el punto de inflexión entre el control total de las variables ambientales y el cierto grado de regulación que se podría alcanzar en invernaderos de más alta tecnología o en sistemas de menor control (Figura 1). La luz entrega a la planta la energía necesaria para que pueda crecer y desarrollarse (Figura 3), ésta genera tres señales que tienen un efecto directo en el aparato fotosintético,

procesos bioquímicos dependientes de luz y fotorreceptores. Éstos, en conjunto generan al final a través de una cascada de procesos fisiológicos, genéticos y bioquímicos el crecimiento, desarrollo y productividad de la planta (Berkovich, Konovalova, Smolyanina, Erokhin, Avercheva, Bassarskaya, ... y Tarakanov, 2017).

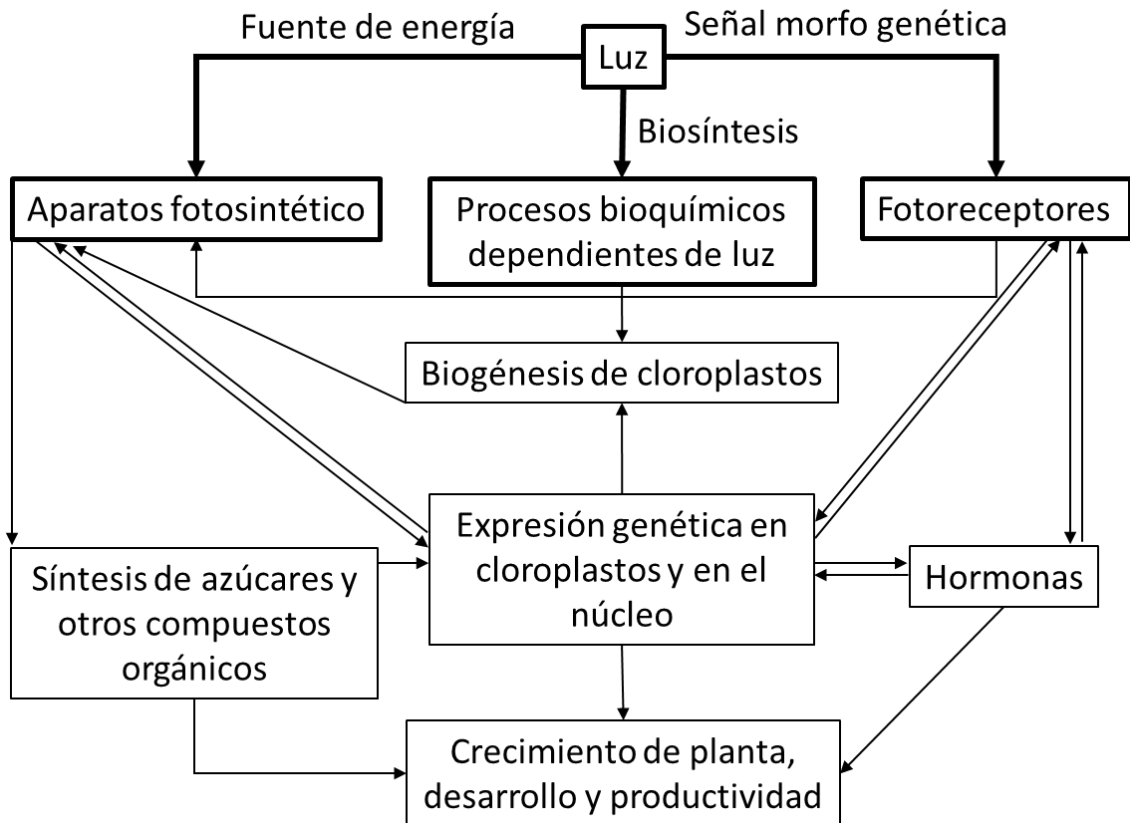


Figura 3. Funciones de la luz en la vida de la planta (Berkovich *et al.*, 2017).

El aparato fotosintético, está compuesto por un conjunto de fotosistemas, enzimas, proteínas y pigmentos fotosintéticos que tienen la función de absorber la luz; ésta posee una cierta longitud de onda específica asociada a la energía que posee, siendo más energética a menor longitud de onda. El intervalo del espectro electromagnético que la planta aprovecha para su desarrollo se clasifica en radiación fotosintéticamente activa (RFA) que abarca desde los 400 a 700 nm; sin embargo, existen regiones de mayor energía que van desde los 280 a 380 nm y pertenecen a la región UV; por el contrario, las regiones de menor energía, pero importantes para la planta abarcan de 700 a 740 nm, las cuales

pertenecen a la región del rojo lejano (Berkovich *et al.*, 2017; Viršilė, Olle y Duchovskis, 2017) (Figura 4).

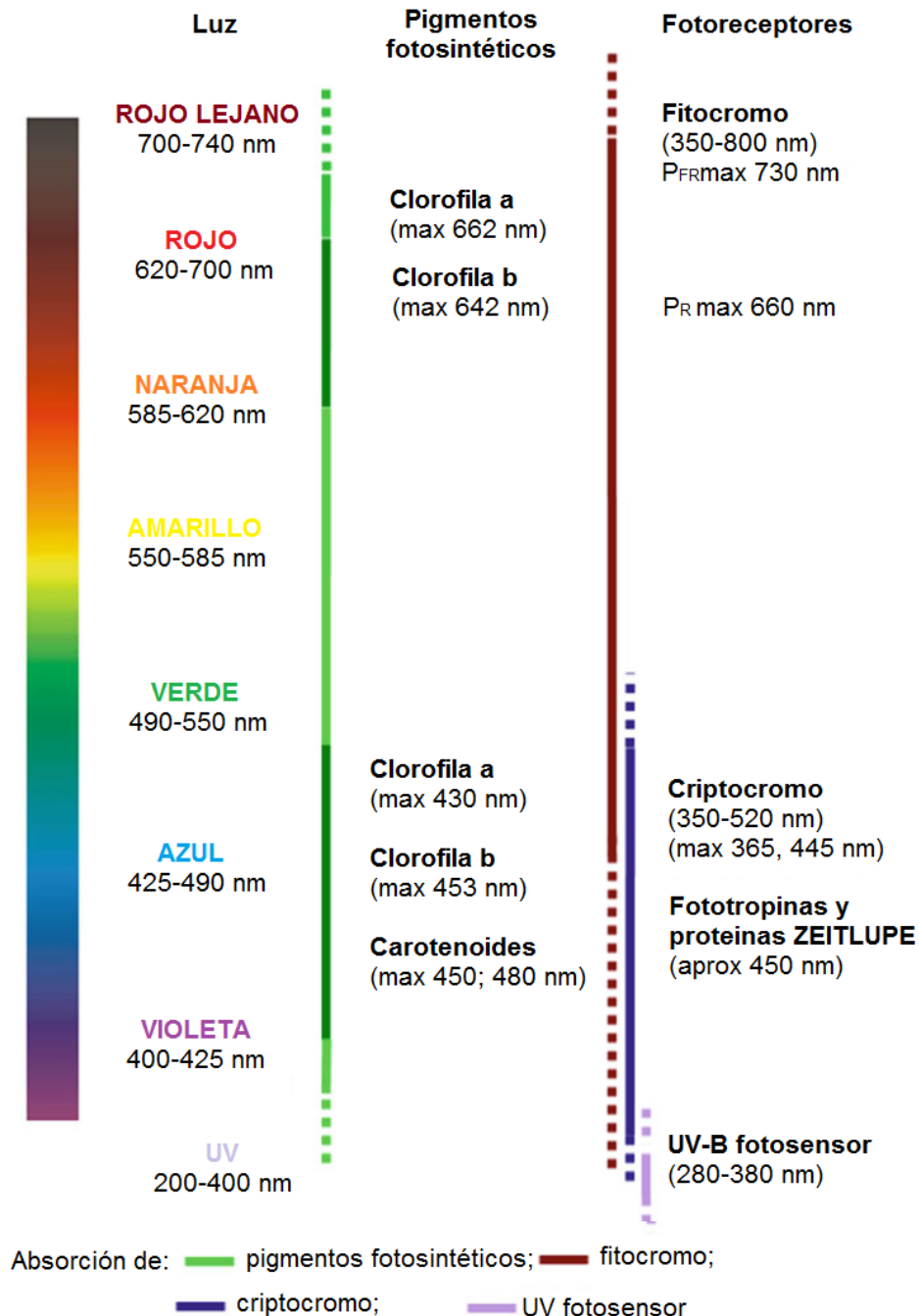


Figura 4. Espectro electromagnético de luz, pigmentos fotosintéticos y fotorreceptores involucrados en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Viršilė *et al.*, 2017).

Dentro del intervalo de longitudes de onda que van desde la luz UV hasta el rojo lejano, se encuentran los pigmentos fotosintéticos principales, que son las clorofilas a, b y carotenoides, estos absorben la energía de la luz en un cierto rango de longitud de onda dentro del intervalo del espectro electromagnético que corresponde a la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la cual es una función esencial dentro del aparato fotosintético (Figuras 3 y 4) (Berkovich *et al.*, 2017), esta capacidad está dada en función de la estructura química inherente de la molécula del pigmento, la cual tienen además un pico de máxima absorción de luz la cual corresponde a una cierta longitud de onda (Figuras 4 y 5); para la clorofila a el pico de máxima absorción de luz se tiene a los 430 y 662 nm, para la clorofila b a 453 y 642 nm, los carotenoides en 450 nm y 480 nm (Naznin y Lefsrud, 2017, Viršilė *et al.*, 2017).

Existen también cromoproteínas, llamadas fotorreceptores, que tienen la capacidad de absorber la luz a cierta longitud de onda y con ello desencadenan procesos bioquímicos dentro de la célula (Higuchi y Hisamatsu, 2016) (Figura 3). Los fotorreceptores se pueden clasificar en base al intervalo de longitud de onda que estos absorben. Los fitocromos son un tipo de fotorreceptores que poseen picos de absorción máxima de luz en los 660 y 730 nm que corresponden al pico de longitud de onda del color rojo y rojo lejano, respectivamente, los cuales poseen además un intervalo de absorción que abarca desde los 350 hasta los 800 nm (Figura 4 y 5). Por otra parte, los criptocromos son otro tipo de fotorreceptores que tienen sus picos de absorción máxima en los 365 y 445 nm ubicados en la región UV y azul (Figura 4 y 5). Existen también los fotorreceptores llamados fototropinas y la familia de proteínas ZEITLUPE que tienen su pico de absorción máximo a 450 nm, ubicados también en la región del color azul (Figura 4 y 5). Finalmente, en el intervalo de la radiación UV se encuentra el fotorreceptor UV-B que tiene su intervalo de absorción entre 280 y 380 nm (Figura 4) (Higuchi y Hisamatsu, 2016; Viršilė *et al.*, 2017).

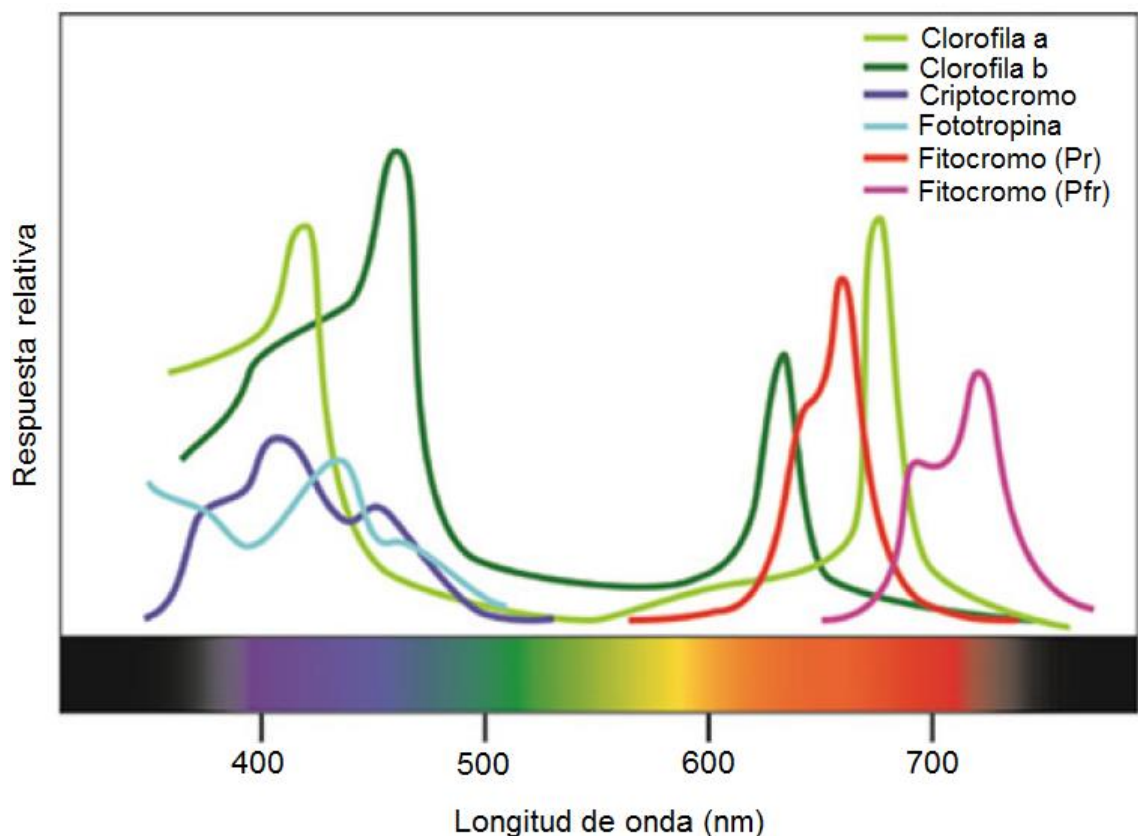


Figura 5. Utilización de varias longitudes de onda de luz para la fotosíntesis por las clorofilas y para la foto morfogénesis por el fitocromo, criptocromo y fototropina (Gupta y Agarwal, 2017).

Dado que los pigmentos fotosintéticos y los fotorreceptores tienen su pico de absorción máxima de luz en longitudes ubicadas en el intervalo de la región del UV-azul hasta el rojo-rojo lejano, los diodos emisores de luz (LED) se han usado en las FPLA como sustitución de la luz artificial. Existen también otras fuentes artificiales de luz (Figura 6), las que son del espectro continuo de luz; sin embargo, la luz emitida por las lámparas que no son LED posee varios picos de emisión de luz a lo largo del espectro electromagnético, pero en las regiones críticas de azul y rojo-rojo lejano su emisión es baja (Figura 6) (Gupta y Agarwal, 2017). Sin embargo, en la Figura 7, se pueden observar ejemplos de espectros de emisión de luz LED monocromáticos, los cuales, al tener un intervalo pequeño de emisión y un pico de longitud de onda definido, ha permitido su uso como luminarias en FPLA, ya que el tipo de luz que los LEDs emiten son adecuados para el desarrollo de la planta. Con este tipo de

iluminación los pigmentos fotosintéticos al igual que los fotorreceptores, pueden absorber en sus longitudes, la luz específica y la mayor cantidad de luz incidente posible, con lo cual se estimula el proceso de fotosíntesis volviéndose más eficiente de manera global (Viršilė *et al.*, 2017).

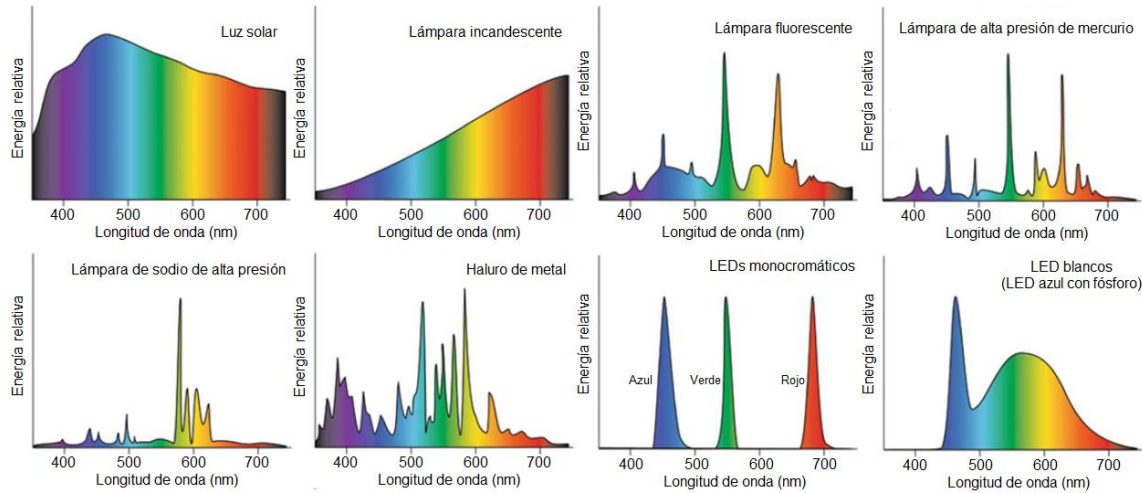


Figura 6. Espectros electromagnéticos de diversas fuentes de luz artificial (Gupta y Agarwal, 2017).

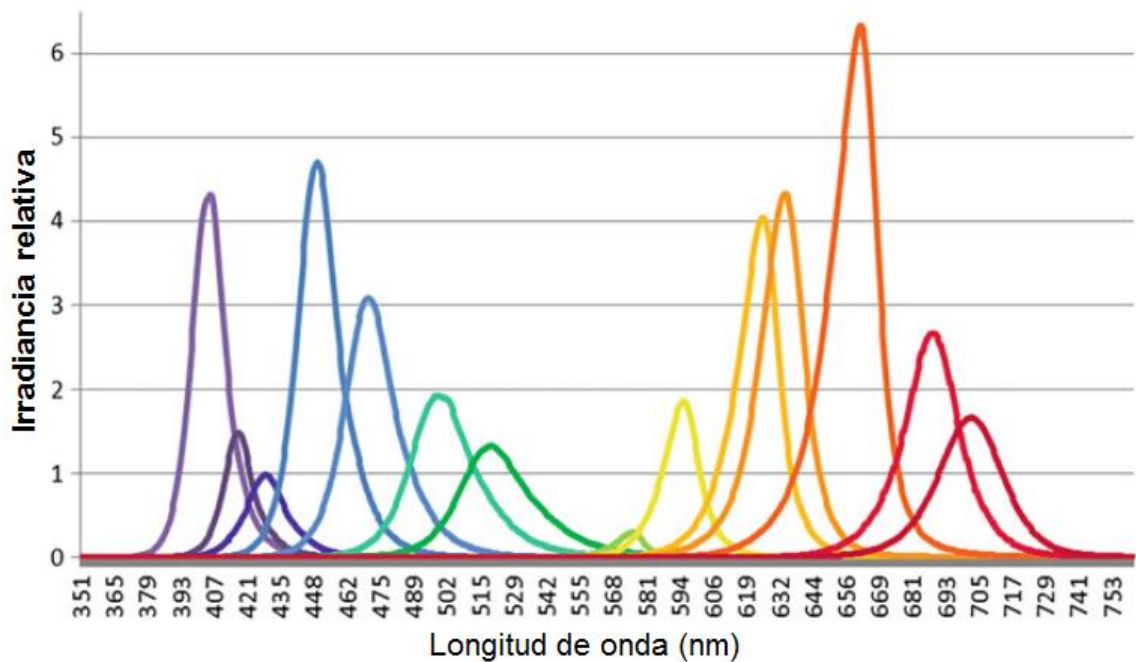


Figura 7. Espectro de diferentes colores de LEDs. Irradiancia relativa versus la máxima longitud de onda de 14 diferentes conjuntos de LED (Naznin y Lefsrud, 2017).

2.4 Cultivos hortícolas y su producción en ambiente controlado

Los principales cultivos que más se han investigado en producción en cultivo vertical con luz LED en ambiente controlado, han sido los que tienen un potencial comercial a corto y mediano plazo que van desde la primera etapa inicial de una planta como puede ser el caso de germinados o plántulas inmaduras “microgreens” (Samuolienė, Brazaitytė, Viršilė, Jankauskienė, Sakalauskienė y Duchovskis, 2016; Samuolienė, Viršile, Brazaityte, Jankauskiene, Sakalauskiene, Vaštakaite, ... y Duchovskis, 2017; Vaštakaitė, Viršilė, Brazaitytė, Samuolienė, Jankauskienė, Sirtautas, ... y Duchovskis, 2015), la siguiente etapa de desarrollo, corresponde a plántulas de hortalizas comerciales como es el caso de tomate (Chia y Kubota, 2010; Fujiwara, Sawada, Kimura y Kurata, 2005; Ohashi-Kaneko, Fujiwara, Kimura y Kurata, 2006), pepino (Hogewoning, Trouwborst, Maljaars, Poorter, van Ieperen y Harbinson, 2010; Shibuya, Endo, Kitamura, Kitaya y Hayashi, 2010) y pimiento (Jang, Mun, Seo, Lee, Oh y Chun, 2013; Hoffmann, Noga y Hunsche, 2015a; Hoffmann, Noga y Hunsche, 2015b). Por otro lado, el mayor avance que se tiene a nivel mundial es la producción de hortalizas de hoja de ciclo completo en sistemas de ambiente controlado, siendo el principal caso la lechuga; es además el cultivo más estudiado y fue el primero en ser comercialmente viable para su producción masiva (Bian, Cheng, Yang, Wang y Lu, 2016; Kim, Goins, Wheeler y Sager, 2004; Kim, Shang, Assefa, Keum y Saini, 2018; Kuno, Shimizu, Nakashima, Miyasaka y Ohdoi, 2017; Nagano, Moriyuki, Wakamori, Mineno y Fukuda, 2019; Son y Oh, 2015). Además de los anteriores cultivos existen otros como las plantas aromáticas o culinarias que tienen un gran potencial para ser desarrolladas en sistemas de producción de ambiente controlado, la investigación académica se ha centrado principalmente en la albahaca (Nelson y Bugbee, 2015; Piovene, Orsini, Sanoubar, Bregola, Dinelli y Gianquinto, 2015; Polyakova, Martirosyan, Dilovarova y Kosobryukhov, 2015; Taulavuori, Pyysalo, Taulavuori y Julkunen-Tiitto, 2018). Existen, otros tipos de plantas culinarias que han sido muy poco estudiadas como es el caso de perejil (Ascrizzi, Fraternale y Flamini, 2018; Rakutko, Rakutko, Kaposhko, Vaskin y

Tranchuk, 2017), toronjil (Frąszczak, Golcz, Zawirska-Wojtasiak y Janowska, 2014; Frąszczak, Gąsecka, Golcz y Zawirska-Wojtasiak, 2015) y el cilantro (Naznin, Lefsrud, Gravel y Hao, 2016; Nguyen, Lu, Kagawa y Takagaki, 2019). Por otro lado, cultivos hortícolas de mayor duración por ciclo, como puede ser el caso de tomate, pimiento, pepino y chile entre otros, son muy importantes económicamente en la región o país donde son cultivados. Lo anterior permite tener la posibilidad que en un futuro algunas variedades y especies puedan ser cultivados, su ciclo completo, en ambiente controlado para que de esta manera el rendimiento se pueda incrementar exponencialmente; además, de que la inocuidad del producto sea mejor y no perjudique la salud humana. En relación con el planteamiento anterior, existe muy poca investigación, salvo los resultados que se obtuvieron en las investigaciones en plantas con ciclo completo que se llevaron a cabo por Gangadhar, Mishra, Pandian y Park, (2012) en chile picante cv. Cheonyang y Naznin, Lefsrud, Gravel y Azad, (2019) en pimiento dulce enano cv. Redstart. En ambos experimentos se probaron tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja, en los cuales se obtuvo producción de frutos, además los resultados en relación con otras variables de crecimiento y concentración de pigmentos fotosintéticos variaron en base en la especie y el tratamiento de luz.

2.5 Cultivos hortícolas con potencial para la producción en ambiente controlado

2.5.1 Cilantro (*Coriandrum sativum* L.)

El cilantro es una planta culinaria de gran tradición en México y sumamente consumida; además, se exporta a EUA principalmente y genera varios millones de divisas anualmente (SIAP, 2020). En muchas regiones del mundo, igual que en México, el cultivo de cilantro tiene poca sanidad para el consumo humano (Tibaduiza-Roa, Huerta-de la Peña, Morales-Jiménez, Hernández-Anguiano y Muñoz-Reyes, 2018), por las características del suelo donde se cultiva, el agua de riego y el manejo cultural que se le da a lo largo de su ciclo de cultivo (da Silva, Soares, Gheyi, Oliveira, Filho y do Carmo, 2016b; da Silva, Oliveira,

Soares, Gheyi, Santana y Pinho, 2018; Shashidhar, Pujari, Sharatbabu, Patil, Arif y Dharamatti, 2017). Además, se ha reportado en el mundo que puede haber existir acumulación de metales pesados en concentraciones tóxicas en plantas de cilantro, como entre otros cultivos en diferentes regiones de Europa (Chizzola, Michitsch y Franz, 2003), Asia (Arora, Kiran, Rani, Rani, Kaur y Mittal, 2008; Kumar, 2013; Rahmana, Asaduzzamana y Naidua, 2013; Singh y Garg, 2006), África (Ebrahim, Eltayeb, Khalid, Mohamed, Abdalla, Grill y Michalke, 2012) y América (dos Santos-Araujo y Alleoni, 2016), los cuales tienen una repercusión negativa en la salud de los consumidores.

Con lo antes mencionado, el cilantro tiene el potencial suficiente para que pueda migrar de un sistema de producción ineficiente, como es el caso a campo abierto, a uno de alta tecnología, como un sistema de producción en ambiente controlado, con lo cual se mejorarían los beneficios para el consumo humano, se minimizarían los riesgos a la salud y se aumentaría exponencialmente su rendimiento.

2.5.2 Chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Por otra parte, el cultivo del chile habanero en México, específicamente en la región de la península de Yucatán, es una de las especies hortícolas de mayor importancia en esta región y otros centros de producción en el país (Ruiz-Lau, Medina y Martínez, 2011); además de poseer la declaratoria de denominación de origen de la península de Yucatán en 2010 (CICY, 2016). Actualmente la demanda de chile habanero para consumo nacional y para exportación es superior al abasto que ofrece la península de Yucatán, ya que cuenta con 100 ha de las 1200 ha por denominación de origen se requiere para satisfacer la demanda (Orta, 2018). El Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) ha tenido un papel destacado en este cultivo, ya que ha logrado establecer un vínculo con el Sistema-Producto Chile Habanero de la Península de Yucatán, por consiguiente el establecimiento de normas nacionales e internacionales para la certificación del chile habanero, además de generar 10 variedades mejoradas y certificadas que poseen un nivel de pungencia superior a las 500 000 unidades Scoville y además estas variedades están pensadas para

distintos usos comerciales, de acuerdo con sus características, por ejemplo, pueden usarse para consumo en fresco, en la industria alimentaria, pero también la farmacológica, de cosméticos e inclusive la militar (CICY, 2016). En este contexto y en relación con la producción de chile habanero y su situación de demanda a nivel mundial y nacional, la posibilidad de poderse cultivar en un sistema de producción en ambiente controlado podría permitir satisfacer la gran demanda para sus diversos usos; sin olvidar que los frutos gozarían de inocuidad sanitaria gracias a este sistema de producción.

2.6 Literatura citada

- Agrimont (2019). Anwendungsbereich GARTEN- & LANDSCHAFTSBAU. Consultada en <https://www.agrimont.de/garten-und-landschaftsbau/> (diciembre 2019).
- Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., & Mittal, N. (2008) Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chemistry*, 111, 811–815. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.049>
- Ascrizzi, R., Fraternale, D., & Flamini, G. (2018) Photochemical response of parsley (*Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss) grown under red light: The effect on the essential oil composition and yield. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, 185, 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.06.006>.
- Berkovich, Y. A., Konovalova, I. O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A.N., Avercheva, O.V., Bassarskaya, E. M., ... , & Tarakanov, I.G. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*, 6, 11-24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>.
- Bian, Z., Cheng, R., Yang, Q., Wang, J., & Lu, C. (2016). Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 141(2), 186-195. <https://doi.org/10.21273/JASHS.141.2.186>.
- Centro de Investigación Científica de Yucatán (2016) Ficha informativa unidad productora de semillas de chile habanero. Consultada en <https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/quienes-somos/2016/Ficha-UPS-Habanero.pdf>.

- Chia, P. L. & Kubota, C. (2010). End-of-day far-red light quality and dose requirements for tomato rootstock hypocotyl elongation. *HortScience*, 45(10):1501–1506. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.10.1501>
- Chizzola, R., Michitsch, H., & Franz, C. (2003). Monitoring of metallic micronutrients and heavy metals in herbs, spices and medicinal plants from Austria. *European Food Research and Technology*, 216, 407–411. <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0675-6>
- da Silva, M. G., Soares, T. M., Gheyi, H. R., Oliveira, I. de S., Filho, J. A. S., & do Carmo, F. F. (2016b). Frequency of recirculation of nutrient solution in hydroponic cultivation of coriander with brackish water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(5), 447-454. <https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p447-454>
- da Silva, M. G., Oliveira, I. de S., Soares, T. M., Gheyi, H. R., Santana, G. de O., & Pinho, J. de S. (2018). Growth, production and water consumption of coriander in hydroponic system using brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(8), 547-552. <https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p547-552>
- dos Santos-Araujo, S. N., & Alleoni, L. R. F. (2016). Concentrations of potentially toxic elements in soils and vegetables from the macroregion of São Paulo, Brazil: availability for plant uptake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 92. [10.1007/s10661-016-5100-2](https://doi.org/10.1007/s10661-016-5100-2).
- Ebrahim, A. M., Eltayeb, M. H., Khalid, H., Mohamed, H., Abdalla, W., Grill, P., & Michalke, B. (2012). Study on selected trace elements and heavy metals in some popular medicinal plants from Sudan. *Journal of Natural Medicines*, 66, 671–679. <https://doi.org/10.1007/s11418-012-0630-6>
- Eremeychuk, L. (2019). Cultivo de repollo en un campo abierto en el campo. Consultada en https://es.123rf.com/photo_42864611_campo-de-repollo-cultivo-de-repollo-en-un-campo-abierto-en-el-campo-el-mes-de-julio-el-repollo-a%C3%BAAn-es-jo.html (diciembre 2019).
- Fang, W., Inada, S., Shimamura, S., Kitagawa, K., Sasaki, Hagiya, Y., ... & Yang, C. (2016). Selected commercial PFALs in Japan and Taiwan. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*, (pp. 351-386). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00026-3>.
- Food and Agriculture Organization (2009). Global agriculture towards 2050, How to feed the world 2050. Consultada en

http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf.

- Frąszczak, B., Golcz, A., Zawirska-Wojtasiak, R., & Janowska, B. (2014). Growth rate of sweet basil and lemon balm plants grown under fluorescent lamps and led modules. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 13(2), 3-13.
- Frąszczak, B., Gąsecka, M., Golcz, A., & Zawirska-Wojtasiak, R. (2015). The chemical composition of lemon balm and basil plants grown under different light conditions. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 14(4), 93-104.
- Fujiwara, K., Sawada, T., Kimura, Y., & Kurata, K. (2005). Application of an automatic control system of photosynthetic photon flux density for LED-low light irradiation storage of green plants. *HortTechnology*, 15(4), 781-786. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.15.4.0781>
- Gangadhar, B. H., Mishra, R. K., Pandian, G., & Park, S. W. (2012). Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annuum*) under different light-emitting diode treatments. *HortScience*, 47(12), 1729–1735. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.12.1729>.
- Gola, D., Malik, A., Shaikh, Z. A., & Sreekrishnan, T. R. (2016). Impact of heavy metal containing wastewater on agricultural soil and produce: relevance of biological treatment. *Environmental Processes*, 3, 1063–1080. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0176-9>.
- Gupta, S. D. & Agarwal, A. (2017). Artificial lighting system for plant growth and development chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In Gupta, S. D. (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture*, (pp. 1-25). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_1.
- Higuchi, Y., & Hisamatsu, T. (2016). Light Acts as a Signal for Regulation of Growth and Development. In T. Kozai, K. Fujiwara & E.S. Runkle (Eds.), *LED Lighting for Urban Agriculture*, (pp. 57-73). Singapore: Springer Science+Business Media Singapore. https://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_5.
- Hoffmann, A. M., Noga, G., & Hunsche, M. (2015a). Acclimations to light quality on plant and leaf level affect the vulnerability of pepper (*Capsicum annuum* L.) to water deficit. *Journal of Plant Research*, 128, 295–306. <https://dx.doi.org/10.1007/s10265-014-0698-z>

- Hoffmann, A. M., Noga, G., & Hunsche, M. (2015b). High blue light improves acclimation and photosynthetic recovery of pepper plants exposed to UV stress. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 254–263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.017>.
- Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3107–3117. <https://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq132>
- Innoplex (2014). Vertical Farming, Plant Factory Market Shares 2014 To 2020. Consultada en <http://innoplex-agri.org/2014/05/vertical-farming-plant-factory-market-shares/> (diciembre 2019).
- Jang, Y., Mun, B., Seo, T., Lee, J., Oh, S., & Chun, C. (2013). Effects of light quality and intensity on the carbon dioxide exchange rate, growth, and morphogenesis of grafted pepper transplants during healing and acclimatization. *Korean Society for Horticultural Science*, 31(1), 14-23. <http://dx.doi.org/10.7235/hort.2013.12127>.
- Kim, H. H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2004). Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. *Annals of Botany*, 94, 691–697. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mch192>
- Kim, D., Shang, X., Assefa, A. D., Keum, Y., & Saini, R. K. (2018). Metabolite profiling of green, green/red, and red lettuce cultivars: Variation in health beneficial compounds and antioxidant potential. *Food Research International*, 105, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.028>.
- Kozai, T. (2016). Why LED lighting for urban agriculture? In: LED Lighting for Urban Agriculture. In T. Kozai, K. Fujiwara & E.S. Runkle (Eds.), *LED Lighting for Urban Agriculture*, (pp. 3-18). Singapore: Springer Science+Business Media Singapore. https://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_1.
- Kozai, T. & Niu, G. (2016a). Introduction. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*, (pp. 3-5). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00001-9>.
- Kozai, T. & Niu, G. (2016b). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban áreas. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*, (pp. 7-33). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00002-0>.

- Kozai, T., Fang, W., Chun, C., Yang, Q., Tong, Y., Cheng, R., ... , & Lu, C. (2016). PFAL business and R&D in the world: current status and perspectives. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*, (pp. 35-68). USA: Academic Press. [https:// dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00003-2](https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00003-2)
- Kumar, S. (2013). Appraisal of heavy metal concentration in selected vegetables exposed to different degrees of pollution in Agra, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 2683–2690. [https:// dx.doi.org/10.1007/s10661-012-2739-1](https://dx.doi.org/10.1007/s10661-012-2739-1)
- Kuno, Y., Shimizu, H., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2017). Effects of irradiation patterns and light quality of red and blue Light-emitting diodes on growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. “Greenwave”). *Environmental Control in Biology*, 55(3), 129-135. <https://doi.org/10.2525/ecb.55.129>
- Nagano, S., Moriyuki, S., Wakamori, K., Mineno, H., & Fukuda, H. (2019). Leaf-movement-based growth prediction model using optical flow analysis and machine learning in plant factory. *Frontiers in Plant Science*. 10:227. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00227>
- Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Hao, X. (2016). Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. *Acta Horticulturae*, 1134, 223-230. [https:// dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.30](https://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.30)
- Naznin, M. T., & Lefsrud, M. (2017). An Overview of LED Lighting and Spectral Quality on Plant Photosynthesis. In Gupta, S. D. (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture*, (pp. 101-111). Singapore: Springer Nature Singapore. [https://doi.org/ 10.1007/978-981-10-5807-3_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_6).
- Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Azad, M. O. K. (2019). Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content, and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper in a controlled environment. *Plants*, 8(4), 93, <https://doi.org/10.3390/plants8040093>.
- Nelson J. A., & Bugbee, B. (2015). Analysis of environmental effects on leaf temperature under sunlight, high pressure sodium and light emitting diodes. *PLoS ONE*, 10(10), e0138930. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138930>
- Nguyen, D. T. P., Lu, N., Kagawa, N., & Takagaki, M. (2019). Optimization of photosynthetic photon flux density and root-zone temperature for enhancing secondary metabolite accumulation and production of

coriander in plant factory. *Agronomy*, 9(5), 224.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9050224>.

NOVAGRIC (2016). Invernaderos KIT para Alta Producción. Consultada en <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-pequenos-kit> (diciembre 2019).

Ohashi-Kaneko, K., Fujiwara, K., Kimura, Y., & Kurata, K. (2006). Effect of blue-light PPFD percentage in red and blue led low-light irradiation during storage on the contents of chlorophyll and rubisco in grafted tomato plug seedlings. *Environmental Control in Biology*, 44(4), 309-314.
<https://doi.org/10.2525/ecb.44.309>

Orta, P (2018). Alta demanda de chile habanero a nivel mundial rebasa a productores. *El Financiero*, 20/12/2018,
<https://www.elfinanciero.com.mx/peninsula/alta-demanda-de-chile-habanero-a-nivel-mundial-rebasa-a-productores>. Consultado 12/02/2020.

Piovene, C., Orsini, F., Sanoubar, S. B. R., Bregola, V., Dinelli, G., & G. Gianquinto (2015). Optimal red:blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, 193, 202–208.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.015>

Polyakova, M. N., Martirosyan, Y. T., Dilovarova, T. A., & Kosobryukhov, A. A. (2015). Photosynthesis and productivity of basil plants (*Ocimum basilicum* L.) under different irradiation. *Agricultural Biology*, 50(1), 124-130.
<http://dx.doi.org/10.15389/agrobiology.2015.1.124eng>

Productos Químicos Andinos (2011). Acolchados. Consultada en <https://www.pqa.com.co/acolchados> (diciembre 2019).

Rahmana, M. M., Asaduzzamana, M., & Naidua, R. (2013). Consumption of arsenic and other elements from vegetables and drinking water from an arsenic-contaminated area of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 1056–1063.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.045>

Rakutko, S., Rakutko, E., Kaposhko, D., Vaskin, A., & Tranchuk, A. (2017). Influence of light quality on fluctuating asymmetry of bilateral traits of forced parsley leaves. *Engineering for rural development*, 24, 42-47.
<http://dx.doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N009>.

Ruiz-Lau, N., Medina, F., & Martínez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, julio-septiembre, 70-77.

Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Viršilė, A., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., & Duchovskis, P. (2016). Red light-dose or wavelength-dependent

- photoresponse of antioxidants in herb microgreens. *PLoS ONE*, 11(9), e0163405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163405>
- Samuolienė, G., Viršile, A., Brazaityte, A., Jankauskiene, J., Sakalauskiene, S., Vaštakaite, V., ... , & Duchovskis, P. (2017). Blue light dosage affects carotenoids and tocopherols in microgreens. *Food Chemistry*, 228, 50-56. <https://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.144>
- Shashidhar, M.D., Pujari, R., Sharatbabu, A.G., Patil, G.B., Arif, A., & Dharamatti, V. (2017). Cultivation of Coriander (*Coriandrum sativum* L.): A Review Article. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 5(3), 796-802. <https://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.4040>
- Shibuya, T., Endo, R., Kitamura, Y., Kitaya, Y., & Hayashi, N. (2010). Potential photosynthetic advantages of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings grown under fluorescent lamps with high red far-red light. *HortScience*, 45(4), 553-558. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.4.553>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020). México exportó 64 mil 647 toneladas de cilantro, en 2017. <https://www.gob.mx/siap/articulos/mexico-exporto-64-mil-647-toneladas-de-cilantro-en-2017?idiom=es>. Consultado 12/02/2020.
- Singh, V., & Garg, A. N. (2006). Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake. *Food Chemistry*, 94, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.053>
- Son, K.-H. & Oh, M.-M. (2015). Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue Light-emitting diodes. *Horticulturae Environment and Biotechnology*, 56(5), 639-653. <https://dx.doi.org/10.1007/s13580-015-1064-3>.
- Taulavuori, K., Pyysalo, A., Taulavuori, E., & Julkunen-Tiitto, R. (2018). Responses of phenolic acid and flavonoid synthesis to blue and blue-violet light depends on plant species. *Environmental and Experimental Botany*, 150, 183-187. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.016>.
- Tibaduiza-Roa, V., Huerta-de la Peña, A. Morales-Jiménez, J. Hernández-Anguiano, A. M. & Muñiz-Reyes, É. (2018). Sistema de producción del cilantro en Puebla y su impacto en la inocuidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(4), 773-786. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i4.1395>
- Ting, K. C., Lin, T., & Davidson, P. C. (2016). Integrated Urban Controlled Environment Agriculture Systems. In T. Kozai, K. Fujiwara & E.S. Runkle (Eds.), *LED Lighting for Urban Agriculture*, (pp. 19-36). Singapore:

- Vaštakaitė, V., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sirtautas, R., & Duchovskis, P. (2015). The effect of blue light dosage on growth and antioxidant properties of microgreens. *Sodininkystė ir daržininkystė*, 34(1–2).
- Viršilė, A., Olle M., & Duchovskis, P. (2017). LED Lighting in Horticulture. In Gupta, S. D. (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture*, (pp. 113-147). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_7.

3. RESPUESTA DE CILANTRO (*Coriandrum sativum* L.) A LA LUZ LED AZUL Y ROJA

RESPUESTA DE CILANTRO (*Coriandrum sativum* L.) A LA LUZ LED AZUL Y ROJA

3.1 Resumen

El cilantro es una especie ampliamente aceptada debido a usos culinarios y propiedades medicinales (actividades antimicrobianas, antioxidantes, antiinflamatorias, entre otras), por lo tanto, es adecuado para el cultivo en entornos controlados con iluminación LED para mejorar sus propiedades nutraceuticas y consumo. Hay poca investigación sobre la respuesta del cilantro en tales condiciones. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de luz LED azul:roja en parámetros de crecimiento, la concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b, total, a/b y carotenoides) y estado de nutrimentos (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu) en la parte aérea del cilantro. Las plantas de cilantro se obtuvieron de la germinación de semillas, las plántulas se establecieron nueve días después de la siembra en una cámara de crecimiento bajo cinco diferentes proporciones de luz LED azul (A) y roja (R), A0:R100, A37.7:R62.3, A57.7:R42.3, A74.2:R25.8, A100:R0. Se aportó una densidad de flujo de fotones fotosintéticos de $307.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 15 h por día. Los resultados se ajustaron a una regresión polinomial de tercer grado: Las mayores respuestas de crecimiento se observaron cuando las plantas recibieron A37.7, mientras las más altas concentraciones de clorofila a, clorofila total y carotenoides fueron en plantas tratadas con A37.7 y A74.2. La mayor cantidad de clorofila b se observó en plantas que recibieron A0 y A37.7 mientras la proporción clorofila a/b fue mayor en A74.2 y A100. La mayor concentración de macronutrimentos fue cuando las plantas se trataron con A57.7 y A74.2, y en micronutrimentos con A57.7 y A0. Podemos concluir que una proporción A37.7:R62.3 promovió el crecimiento de planta y la concentración de pigmentos fotosintéticos, mientras una proporción de A57.7:R42.3 promovió la concentración nutrimentos en cilantro.

Palabras clave: *Coriandrum sativum* L., diodo emisor de luz, cilantro, pigmentos fotosintéticos, macronutrimentos, micronutrimentos

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Director de Tesis: Dra. Ana María Castillo González

CORIANDER (*Coriandrum sativum* L.) RESPONSE TO BLUE AND RED LED LIGHT

3.2 Abstract

Coriander is a widely accepted species because of its culinary uses and medicinal properties (antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory activities, among others), thus, it is suitable for cultivation in controlled environments with LED lighting in order to enhance its nutraceutical properties and consumption. There is little research about the response of coriander under such conditions. The objective of this study was to evaluate the effect of different proportions of blue:red LED light on growth parameters, the photosynthetic pigments concentration (chlorophyll a, b, total, a/b and carotenoids) and nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu) status in the aerial part of coriander. Coriander plants were obtained from seed germination, seedlings were established nine days after sowing in a growth chamber under five different blue (B) and red (R) LED light ratios, B0:R100 B37.7:R62.3, B57.7:R42.3, B74.2:R25.8, B100:R0. A photosynthetic photon flux density of $307.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ was provided for 15 h per day. The results were adjusted to a third-degree polynomial regression: The highest growth responses were observed when plants received B37.7, while the highest chlorophyll a, total chlorophyll and carotenoids concentrations were in plants treated with B37.7 and B74.2. Highest chlorophyll b was observed in plants that received B0 and B37.7 whereas the chlorophyll a/b ratio was highest with B74.2 and B100. The highest macronutrients concentration was when plants were treated with B57.7 and B74.2, and in micronutrients with B57.7 and B0. We concluded that a B37.7:R62.3 ratio promoted plant growth and photosynthetic pigments concentration, whereas a B57.7:R42.3 ratio promoted nutrients concentration in coriander.

Key words: *Coriandrum sativum* L., light emitting diode, coriander, photosynthetic pigments, macronutrients, micronutrients

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Advisor: Dra. Ana María Castillo González

3.3 Introducción

El cilantro es nativo del sur de Europa y del oeste de la región Mediterránea (Wei, Liu, Zhao, Zhao, Xue y Lan, 2019), se ha usado por diversas culturas del mundo en cuestiones culinarias y en medicina tradicional (Prachayasittikul, Prachayasittikul, Ruchirawat y Prachayasittikule, 2018; Wei *et al.*, 2019), tiene actividad antimicrobiana, antioxidante, antiinflamatoria entre otras (Laribi, Kouki, M'Hamdi y Bettaieba, 2015). El cilantro se cultiva extensamente en varios países de Latinoamérica, Europa central, Asia, África del norte y sur y oeste de Australia (Laribi *et al.*, 2015; Mahendra y Bisht, 2011).

Debido a estas características, el cilantro es una planta idónea para cultivarse en ambiente controlado, ya que es de un porte pequeño, posee un ciclo de crecimiento corto, cuenta con diversos usos y propiedades, además de ser consumida en diversas poblaciones del mundo (Kozai y Niu, 2016).

El cilantro tiene muy poca investigación en estas condiciones de crecimiento; Naznin, Lefsrud, Gravel y Hao (2016), evaluaron cuatro relaciones de luz roja (R) y azul (A) R5:A1, R10:A1, R19:A1, R100 y observaron que la altura de la planta fue mayor con R100, número de hojas, peso fresco y seco fue mayor con R10:A1 y la capacidad antioxidante con R5:A1. Nguyen, Lu, Kagawa y Takagaki (2019), centraron su investigación en el efecto de diferentes intensidades de luz con una combinación de luz (rojo/blanco/rojo lejano) y la temperatura de raíz; encontraron que la biomasa de la planta y el contenido de agua en la hoja y el tallo fue mayor a una temperatura de raíz de 25 °C y 300 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de luz LED roja y azul en variables del crecimiento, concentración de pigmentos fotosintéticos y contenido nutrimental en la parte aérea de cilantro. Esta investigación podrá ampliar el conocimiento que se tiene del cultivo del cilantro en condiciones controladas de crecimiento con iluminación LED para su posibilidad de aplicación a nivel comercial en un futuro.

3.4 Materiales y Métodos

3.4.1 Germinación

Se utilizaron semillas de cilantro 'Gladiador' de Sakata Seed de México, las cuales se sembraron a una profundidad de 0.5 cm en turba rubia (Pro mix®, CAN) en macetas de plástico rígido con un volumen de 500 mL (15 semillas por maceta). Una vez sembradas se colocaron en invernadero y fueron regadas con agua de la llave (pH 7.1 y CE 0.42 dS m⁻¹). La temperatura ambiental fue: día 21.1±0.1 °C/noche 14.2±0.2 °C y la humedad relativa: día 62.1±0.2 %/noche 83.3±0.3 %, que se registró con un datalogger (Extech instruments® modelo RH10, USA). El periodo de emergencia duró 6 días después de la siembra y a los 9 días se colocaron en una cámara de crecimiento para iniciar los tratamientos con luz.

3.4.2 Cámara y gabinetes de crecimiento

Se realizó una adaptación de una cámara de crecimiento a partir de un cuarto frío usado (TORREY®, MEX), con medidas interiores de 2.76m x 2.76m x 1.90m (ancho, largo y altura), las modificaciones internas de la cámara de crecimiento se basó en el diseño de Katagiri, Canelon-Suarez, Griffin, Petersen, Meyer y Siegle (2015), con las cuales se logró regular la temperatura ambiental y la humedad relativa a través de un aire acondicionado portátil (LG® modelo LP1017WSR 10200 BTU, KOR) y un deshumidificador (Whirlpool® modelo WAD200 5Q 20L/24 h, USA), los que se colocaron dentro de la cámara de crecimiento. Se diseñaron seis gabinetes de crecimiento con la finalidad de mantener aislados los tratamientos de luz. Éstos se construyeron a partir de un anaquel metálico (0.3 m de ancho x 0.85 m de largo x 1.00 m de altura), al cual se le añadieron paredes de placas de unicel de 2 cm de grosor forradas con papel aluminio, con la finalidad de tener un máximo de reflexión de la luz en su interior.

3.4.3 Tratamientos con diferentes proporciones de luz complementaria

LED roja y azul

Las luminarias que se utilizaron fueron hechas a mano, compuestas por perfiles de aluminio de 5 cm x 85 cm (ancho x largo) en donde se anclaron los focos LED y las lámparas fluorescentes respectivamente. Las luminarias fueron colocadas debajo de la parte superior de cada uno de los gabinetes de crecimiento. Se utilizaron dos perfiles por tratamiento (12 focos LED por perfil), los diferentes tratamientos de luz se describen en el Cuadro 4. La densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) ($\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$) y las propiedades físicas del espectro electromagnético de los tratamientos se midió con un espectroradiómetro (Apogee instruments® modelo SS-110, EUA) donde se tomaron 124 mediciones en el área de cultivo (66 cm x 20 cm= 1320 cm²), que fue la superficie en relación a la parte inferior del gabinete, donde las plantas tuvieron su desarrollo, durante el transcurso del experimento (Cuadro 4). Se realizó un análisis estadístico de las variables físicas de los tratamientos (Cuadro 4) para asegurar que las intensidades de luz entre tratamientos LED fueran iguales, las proporciones de luz azul y roja fueran diferentes, además de verificar el pico de longitud de onda (nm) e intervalo de la luz LED presente en los tratamientos. Se estableció un fotoperiodo para todos los tratamientos de luz de 15 h por día durante 48 días después de la siembra.

3.4.4 Condiciones de crecimiento en la cámara de crecimiento

Nueve días después de la siembra se colocaron 12 macetas por tratamiento dentro de los gabinetes de crecimiento, a los siete días después de iniciar los tratamientos con luz, se ralearon las plantas para dejar tres plantas por maceta. Las macetas se regaron diariamente con 200 mL con la solución nutritiva de Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950) al 50% de concentración de los macronutrientes con pH de 5.8 y CE de 1.33 dS m⁻¹; los micronutrientes se abastecieron con la mezcla comercial Tradecorp® AZ (0.065g L⁻¹). La temperatura ambiental promedio fue: día 24.2±0.1 °C/noche 22.7±0.1 °C y la humedad relativa promedio: día 62.1±0.2 %/noche 83.3±0.3 %, se registró cada minuto con el promedio de tres datalogger (Extech instruments® modelo RH10,

USA), ubicados a nivel de copa de planta dentro de tres gabinetes seleccionados. La temperatura promedio de la solución nutritiva se midió con un termómetro infrarrojo (Extech instruments® modelo 42530, USA) y tuvo un valor de 21.8 ± 0.1 °C y la concentración promedio CO₂ se midió con medidor portátil CO₂ ambiental (Extech instruments® modelo CO250, USA) y fue de 378 ± 53 ppm.

Cuadro 4. Propiedades físicas de los tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja en cilantro ‘Gladiador’ cultivado bajo condiciones controladas.

Tratamientos					
	A0	A37.7	A57.7	A74.2	A100
PrA	A0 %	A37.7 %	A57.7 %	A74.2 %	A100 %
PrR	R100 %	R62.3 %	R42.3 %	R25.8 %	R0 %
Mar	Longniu	Longniu	Longniu	Longniu	Longniu
Mod	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB008
Pot	4	4	4	4	3
Dis	35.7	41.3	45.3	49.3	51.7
Dtot	308.9±8.7a ^x	309.5±7.9a	305.3±6.0a	308.8±5.4a	305.7±6.3a
LID	16.7±0.5a	16.7±0.4a	16.5±0.3a	16.7±0.3a	16.5±0.3a
λA	-	457±0b	457±0a	457±0b	457±0b
λA	-	421±0a	418±0b	416±0c	414±0d
λA	-	510±1d	516±0c	518±0b	521±0a
%DA	-	37.7±0.9d	57.7±0.6c	74.2±0.6b	100.0±0.0a
λR	636±0b	635±0c	637±0a	636±0b	-
λR	594±0c	594±0c	597±0b	599±0a	-
λR	674±0a	671±0b	670±0c	665±0d	-
%DR	100.0±0.0a	62.3±0.9b	42.3±0.6c	25.8±0.6d	-

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). A= Luz LED azul; R= Luz LED roja; PrA= Proporción azul; PrR= Proporción rojo; Mar= Marca; Mod= Modelo; Pot= Potencia (watts); Dis= Distancia luminaria - copa de planta; Dtot= Densidad de flujo de fotones fotosintéticos total de tratamiento ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); LID= Luz integral diaria ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); λA= Pico de longitud de onda (nm) color azul; λA= Pico de longitud de onda (nm) color azul; %DA= Porcentaje de densidad de flujo de fotones fotosintéticos de luz azul (%); λR = Pico de longitud de onda (nm) color rojo; λR= Intervalo de longitud de onda color rojo (nm); %DR= Porcentaje de densidad de flujo de fotones fotosintéticos de luz roja (%).

3.4.5 Variables de crecimiento de planta

Después de 48 días con los tratamientos de luz LED las plantas se cosecharon y se determinó de la parte aérea: la altura de planta (cm), peso fresco (g planta^{-1}) con una balanza de precisión (Ohaus® Scout Pro, USA), número de hojas (planta) y el área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) con un integrador de área foliar (LICOR®, modelo LI-3100, USA). Posteriormente, la parte aérea se secó en una estufa de aire forzado (BINDER® modelo FED 115, DEU) por 48 horas a 65 °C y se registró el peso seco (g planta^{-1}) con una balanza de precisión (Ohaus® Scout Pro, USA). A partir de estos datos se calculó el índice de área foliar con base en la fórmula $[\text{área foliar (cm}^2)/\text{área de cultivo (cm}^2)]$. En cada una de las variables medidas se utilizaron cinco repeticiones por tratamiento.

3.4.6 Concentración de pigmentos fotosintéticos

Las concentraciones de clorofila a, b y total (mg g^{-1} de peso fresco), proporción de clorofila a/b y concentración de carotenoides (mg g^{-1} de peso fresco) se determinaron mediante la metodología descrita por la AOAC (1980). Estas variables se determinaron en hojas frescas al momento de la cosecha. Se utilizaron tres repeticiones por tratamiento.

3.4.7 Concentración nutrimental en la parte aérea

Se determinaron K, P, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu en un espectrofotómetro de Emisión Atómica de Plasma por Inducción Acoplada (ICP-AES) (VARIAN modelo Liberty II, USA). La concentración de N se determinó con el método micro-kjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999). Se utilizaron tres repeticiones por tratamiento.

3.4.8 Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, una repetición estuvo constituida por una maceta con tres plantas y se utilizaron 12 repeticiones por tratamiento. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), a la prueba de comparación de medias de Tukey ($P < 0.05$) y a un análisis de ajuste a regresión polinomial de tercer grado mediante el programa SAS V9.0 (SAS Institute, 2002).

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Variables de crecimiento

Todos los parámetros de crecimiento evaluados se ajustaron a una regresión polinomial de tercer grado. El peso fresco y seco de la parte aérea, área foliar e índice de área foliar mostraron una tendencia de incremento conforme la proporción de luz azul aumentó a partir del tratamiento A0 hasta llegar a los valores máximos con el tratamiento A37.7; posteriormente, existió una disminución constante conforme la proporción de luz azul aumentó hasta llegar al tratamiento A100, donde tanto el tratamiento A0 y A100 fueron los que presentaron los menores valores registrados (Figuras 8B, C, E y F).

El número de hojas por planta presentó un incremento a partir del tratamiento A0 hasta llegar al tratamiento A37.7, donde se registró el máximo número de hojas, posteriormente conforme la proporción de luz azul aumentó el número de hojas disminuyó (Figura 8D).

La altura de planta presentó un aumento a partir del tratamiento A0, posteriormente existió una disminución constante conforme la proporción de luz azul aumentó hasta llegar a un valor mínimo de altura con el tratamiento A74.2 (Figura 8A).

Agarwal, Gupta, Barman y Mitra (2018) evaluaron los tratamientos de luz LED A0:R100, A25:R75, A50:R50, A75:R25, A100:R0 en espinaca y encontraron la mayor altura de planta, peso fresco, número de hojas y área foliar en la combinación de tratamiento A50:R50. Por otro lado, Frąszczak (2016) utilizó las combinaciones de luz LED azul y rojo A10:R90, A20:R80, A30:R70, A40:R60 y A50:R50 en eneldo y observó la mayor altura de planta con el tratamiento A10:R90, el mayor peso fresco lo encontró con el tratamiento A20:R80, el peso seco con la combinación de luz A40:R60, por último, la mayor área foliar la encontró con los tratamientos A10:R90, A20:R80, A30:R70.

Naznin *et al.* (2016) establecieron el intervalo de tratamientos desde A0:R100, A5:R95, A9:R91 hasta A17:R83 en cilantro, donde encontraron la mayor altura de planta con el tratamiento A0:R100, el mayor peso fresco y seco de la parte aérea y número de hojas fue con el tratamiento A9:R91. Por otra parte, Verma,

Gantait, Jeong y Hwang (2018) evaluaron los tratamientos A0:R100, A20:R80, A50:R50, A80:R20, A100:R0 en *D. purpurea* y encontraron la mayor altura de planta con el tratamiento monocromático azul A100:R0, el máximo peso fresco y seco de planta, número de hojas y área foliar con la combinación de luz A20:R80. Finalmente, Pennisi, Blasioli, Cellini, Maia, Crepaldi, Braschi, ... y Gianquinto (2019) usaron las combinaciones de luz LED azul y roja A19:R75, A23:R70, A30:R62, A44:R46, A58:R30 en cultivo de albahaca y hallaron que el mayor peso fresco se registró con los tratamientos A19:R75, A23:R70, A30:R62.

Con los resultados de las investigaciones anteriores se observó, con excepción de Naznin *et al.* (2016) que evaluaron tratamientos con un intervalo muy reducido de proporciones de luz azul y roja, que los mayores valores se obtuvieron en las variables de crecimiento antes mencionadas, con combinaciones de luz roja y azul en el intervalo que abarcó desde una proporción A20:R80 hasta A50:R50; esto coincidió con los resultados obtenidos en este experimento, dado que todas las variables de crecimiento, excepto la altura de planta, obtuvieron su máximo valor con el tratamiento con menor porcentaje de luz azul (A37.7).

El comportamiento de los resultados obtenidos en este experimento, puede deberse a que la luz es la base del crecimiento, desarrollo y productividad de una planta, la cual a través del aparato fotosintético, procesos bioquímicos dependientes de luz y diversos fotorreceptores, activan la expresión de genes de cloroplastos y núcleo, lo que genera la síntesis de compuestos y hormonas que en conjunto controlan el proceso completo de desarrollo de la planta (Berkovich, Konovalova, Smolyanina, Erokhin, Avercheva, Bassarskaya, ... y Tarakanov, 2017); adicionalmente, la luz roja promueve la elongación del tallo, disminuye el número de hojas y aumenta la biomasa de la parte aérea; por otro lado, la luz azul puede aumentar o disminuir la longitud de la parte aérea, de manera similar, posee un efecto en el área foliar y peso seco de la parte aérea (Demotes-Mainard, Personal, Corotb, Bertheloot, Gourrierceb, Pelleschi-Travierb, ... y Sakr 2016). Por otra parte, la composición espectral de la luz, la

intensidad y el fotoperiodo afectan los parámetros de crecimiento de diversas maneras según la especie y el cultivar, lo que hace imposible proponer una recomendación universal para usar un parámetro de iluminación específico para

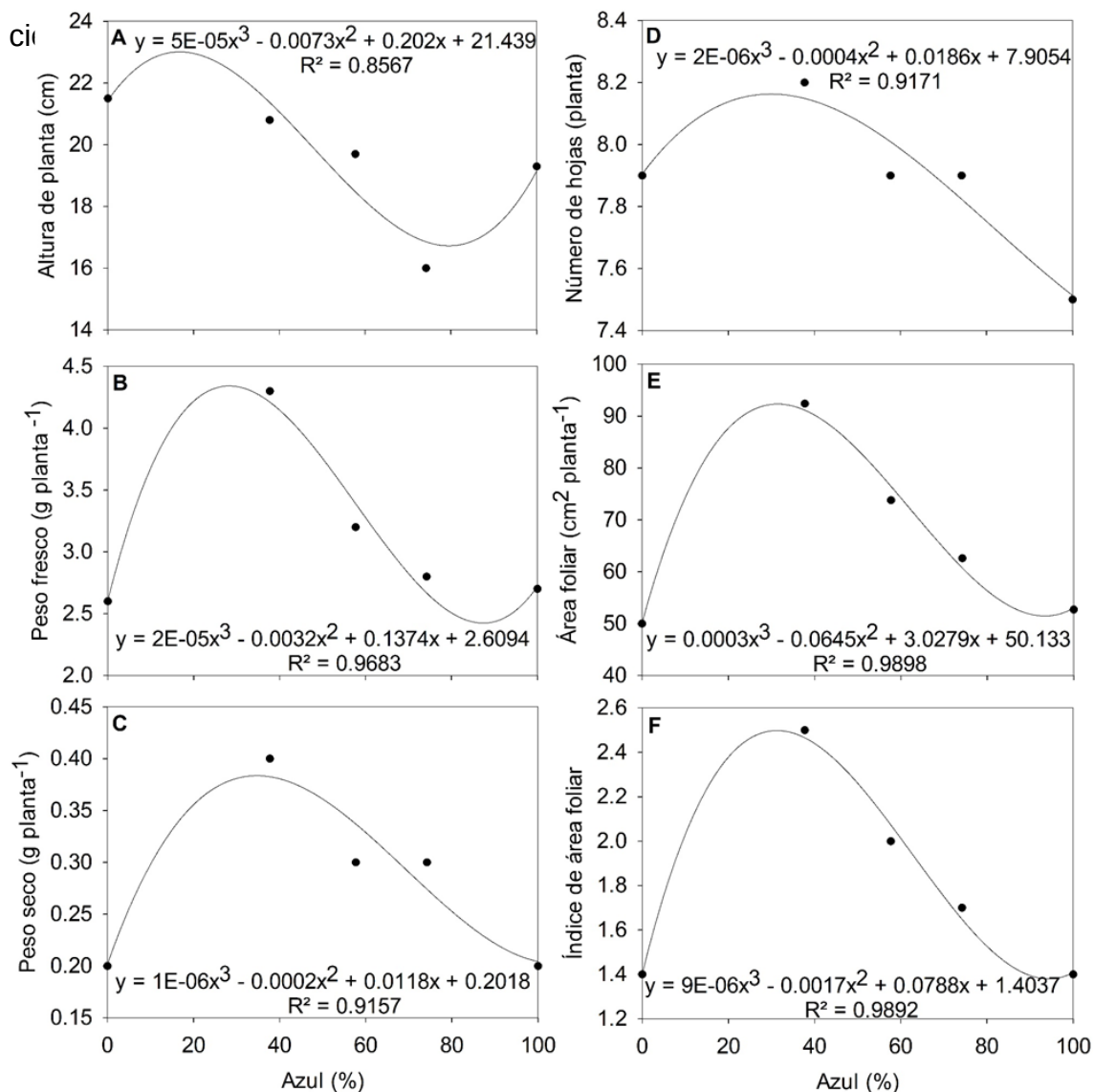


Figura 8. Variables de crecimiento de plantas de cilantro 'Gladiator' cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.

3.5.2 Concentración de pigmentos fotosintéticos

La concentración de pigmentos fotosintéticos (Figura 9) se ajustó al comportamiento de una regresión polinomial de tercer grado. Existió una tendencia de incremento de concentración en clorofila a, total y carotenoides

(Figuras 9A, 9C y 9E) a partir del tratamiento A0 conforme la proporción de luz aumentó, hasta llegar a una máxima concentración en el tratamiento A37.7, para el caso de la clorofila a, también lo fue con el tratamiento A74.2; posteriormente existió una disminución de concentración hasta llegar al tratamiento A100 donde se registró la mínima concentración.

Respecto a los resultados de la medición de la clorofila b (Figura 9B), la mayor concentración se encontró en el tratamiento monocromático rojo A0, así como en el tratamiento A37.7, posteriormente existió una disminución conforme la proporción de luz azul en los tratamientos aumentó.

La relación de clorofila a/b (Figura 9D), tuvo una disminución a partir del tratamiento A0 hasta llegar al tratamiento A37.7, donde posteriormente existió un aumento de concentración conforme la proporción de luz azul incrementó hasta alcanzar sus máximos valores en los tratamientos A100 y A74.2.

Verma *et al.* (2018) evaluaron diferentes tratamientos de luz LED azul y roja A0:R100, A20:R80, A50:R50, A80:R20, A100:R0 en *Digitalis purpurea*, donde encontraron las mayores concentraciones de clorofila a y b en planta en ambos tratamientos monocromáticos A100:R0 y A0:R100 respectivamente, para el caso de carotenoides, se halló la máxima concentración en el tratamiento A80:R20 y en el A100:R0. Nuestros resultados coincidieron con los de Verma *et al.* (2018), en relación con la máxima concentración de clorofila b que se encontró con el tratamiento monocromático rojo A0; por otro lado, también se coincidió con la concentración máxima de carotenoides con los tratamientos A74.2 y A100. Wang, Lu, Tong y Yang (2016) usaron los tratamientos de luz A0:R100, A13:R87, A24:R76, A48:R52, A100:R0 en lechuga y reportaron que la clorofila total se encontró en mayor concentración con los tratamientos A20:R80 y A100:R0, por otra parte, los carotenoides presentaron su mayor concentración en el tratamiento A20:R80. Agarwal *et al.* (2018) establecieron las combinaciones de luz LED roja y azul A0:R100, A25:R75, A50:R50, A75:R25, A100:R0 para el cultivo de espinaca, donde obtuvieron la mayor concentración de los pigmentos fotosintéticos en planta como la clorofila total con el tratamiento A50:R50, la relación clorofila a/b en el tratamiento monocromático

azul A100:R0 y los carotenoides con el tratamiento monocromático rojo A0:R100.

La máxima concentración de clorofila total que obtuvimos en nuestros experimentos se logró con el tratamiento A37.7, la cual se asemejó con el tratamiento donde Agarwal *et al.* (2018) encontraron la máxima concentración de esta misma variable (A50:R50) como se mencionó antes, además, estos autores coincidieron también con uno de los dos puntos donde se encontró la mayor relación clorofila a/b en nuestro experimento que fue con el tratamiento A100. Por otro lado, la concentración máxima de clorofila total que encontraron Wang *et al.* (2016) con el tratamiento A20:R80, como se mencionó anteriormente, se asemejó con nuestros resultados, los cuales la máxima concentración de esta variable se encontró con el tratamiento A37.7.

Los anteriores resultados se pueden explicar debido a que las plantas tienden a adaptar el contenido de clorofila al espectro de luz incidente; además, cuando está presente luz azul con otras longitudes de onda, la clorofila total tiende a aumentar conforme la proporción de luz azul aumenta (Huché-Thélier, Crespel, Gourrierc, Morel, Sakr y Leduc, 2016). Adicionalmente, la relación clorofila a/b se incrementa independientemente de la especie, tanto con tratamientos monocromáticos azules, como con tratamientos donde existió un aumento de la proporción de luz azul (Huché-Thélier *et al.*, 2016). La característica de los carotenoides es ser pigmentos accesorios para absorber y transferir energía de la luz incidente (Blankenship, 2014), los cuales tienden a aumentar su concentración en presencia de luz roja y disminuir al existir luz azul (Kubota, 2016), debido a que a través de estas dos longitudes de onda (azul y roja) se induce la expresión de genes involucrados en la ruta de síntesis de carotenoides (Gupta y Pradhan, 2017).

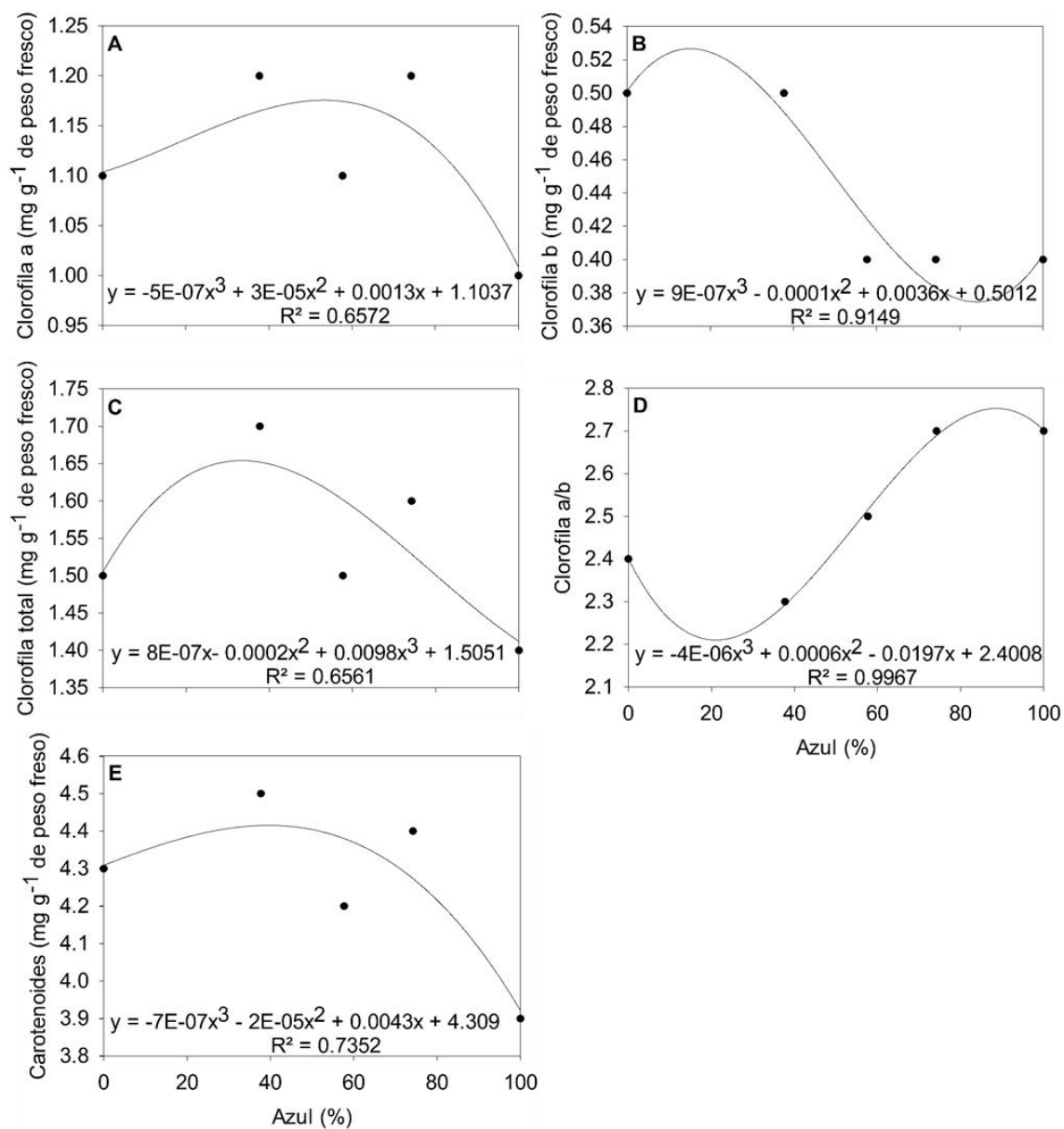


Figura 9. Concentración de pigmentos fotosintéticos en hojas de plantas de cilantro 'Gladiador' cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.

3.5.3 Concentración nutrimental en la parte aérea

La tendencia de la concentración nutrimental en el tejido se ajustó a una regresión polinomial de tercer grado para macronutrientes y micronutrientes. En el caso de la concentración de nitrógeno y calcio en la parte aérea (Figuras 10A y 10E), se observó una disminución a partir del tratamiento A0 conforme la proporción de luz azul aumentó hasta llegar a alcanzar la concentración mínima con el tratamiento A37.7, posteriormente existió un aumento en la concentración conforme la proporción de luz azul aumentó y se llegó a una concentración máxima en ambos elementos con el tratamiento A74.2.

El comportamiento de la concentración de potasio en la parte aérea de cilantro es independiente de los diferentes tratamientos que se usaron con luz LED azul y rojo, ya que no ajustó los resultados a ningún otro modelo de regresión (Figura 10C).

Por otro lado, la concentración de azufre y magnesio (Figuras 10D y 10F) ambos tuvieron una tendencia de aumento de concentración a partir del tratamiento A0 conforme la proporción de luz aumentó, hasta llegar en los tratamientos A57.7 y A74.2 donde se registró la mayor concentración de ambos elementos, posteriormente se observó una disminución en la concentración a partir del tratamiento A74.2 hasta llegar al tratamiento A100.

La concentración de fósforo en la parte aérea (Figura 10B) tuvo un aumento a partir del tratamiento A0 conforme la proporción de luz azul incrementó, hasta llegar al tratamiento A57.7 donde se registró su máxima concentración, posteriormente existió una disminución de la concentración conforme la proporción de luz azul aumento hasta llegar al tratamiento A100 donde se encontró la mínima concentración de fósforo.

Verma *et al.* (2018) investigaron en *D. purpurea* y encontraron que con una proporción de luz azul y roja de A80:R20, se presentó una mayor acumulación tanto de macronutrientes (P, S, Ca, Mg) como de micronutrientes (Fe, Mn, Zn, B, Cu). Lo anterior, coincidió con los resultados de S, Ca, Mg de la presente investigación.

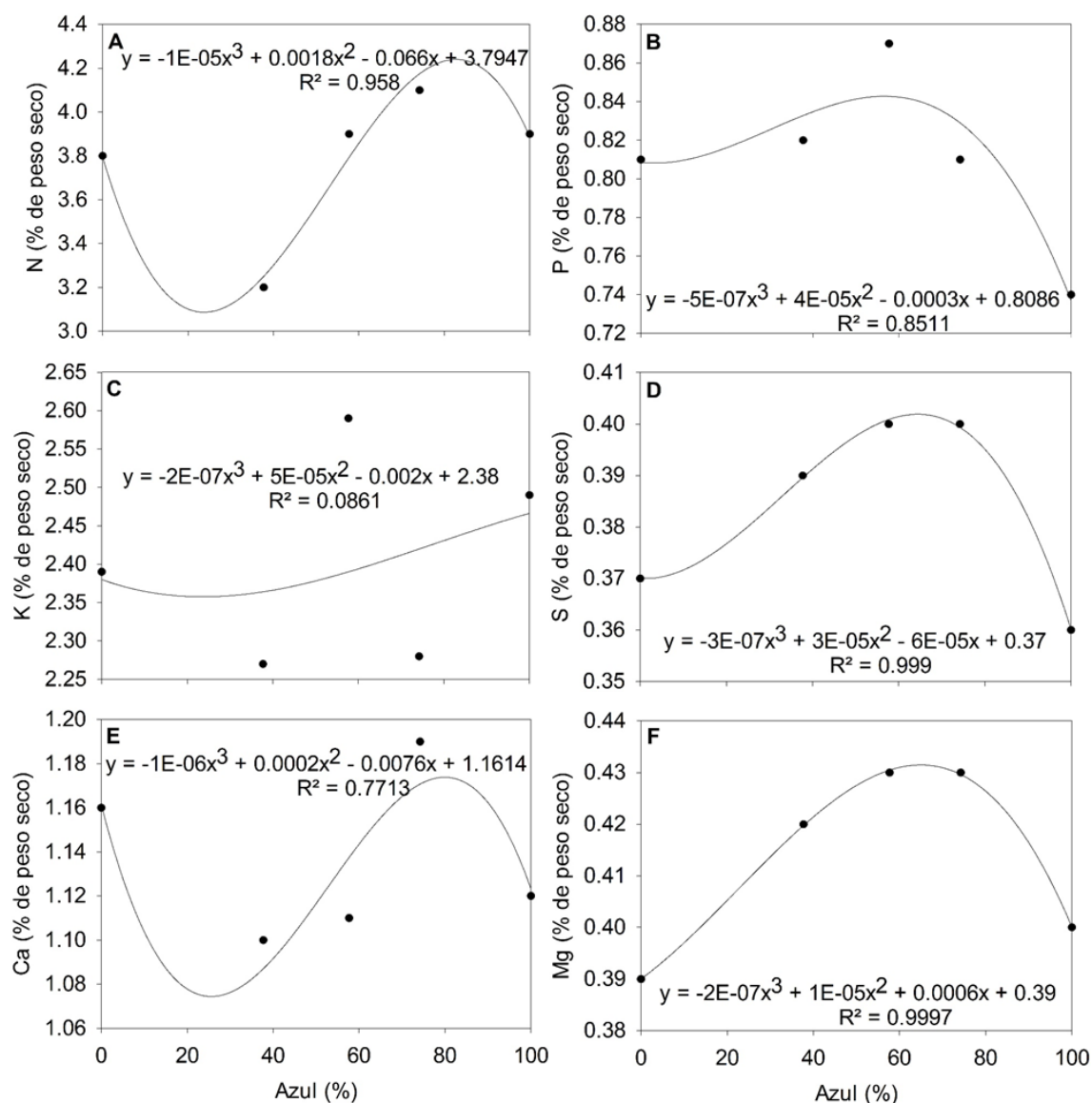


Figura 10. Concentración mineral de macronutrientes en plantas de cilantro 'Gladiador' cultivadas bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.

La máxima concentración de hierro (Figura 11A) se registró en los tratamientos A0 y A37.7, a partir de los cuales existió una disminución de la concentración conforme la proporción de luz aumentó hasta llegar al tratamiento A100 donde se registró la menor concentración.

La máxima concentración de zinc (Figura 11B) se registró en el tratamiento A0, donde posteriormente existió una disminución de concentración conforme la

proporción de luz aumentó hasta llegar al tratamiento A100 donde se obtuvo la mínima concentración de zinc.

La concentración de cobre en la parte aérea de cilantro (Figura 11C), tuvo un incremento a partir del tratamiento A0 conforme la proporción de luz azul aumentó hasta llegar a un máximo de concentración en el tratamiento A57.7, posteriormente existió una disminución de la concentración conforme la proporción de luz azul incrementó.

El manganeso (Figura 11 D) registro su máxima concentración en el tratamiento A0, posteriormente se registró una disminución de concentración conforme la proporción de luz azul aumentó.

Pennisi *et al.* (2019) usaron los tratamientos de luz roja y azul LED A19:R75, A23:R70, A30:R62, A44:R46, A58:R30 en albahaca y hallaron una tendencia clara donde el tratamiento A23:R70 fue el que permitió la mayor concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y hierro; los resultados mencionados anteriormente que encontraron Pannisi *et al.* (2019) se aproximaron un poco respecto a la concentración máxima de hierro que obtuvimos en nuestro experimento que se registró con el tratamiento A0.

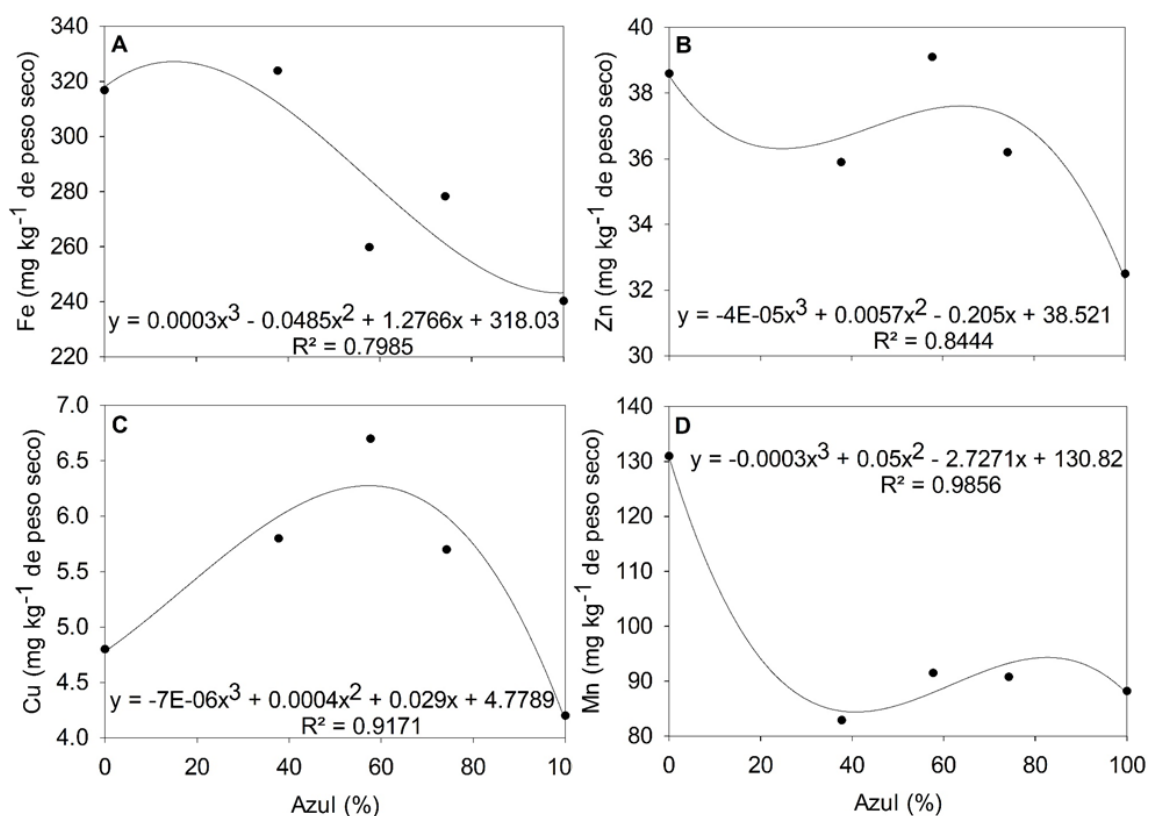


Figura 11. Concentración mineral de micronutrientos en plantas de cilantro 'Gladiator' cultivadas bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul.

Sakuraba y Yanagisawa (2017) mencionan que en *Arabidopsis* los mecanismos asociados a la absorción y asimilación del nitrógeno en los tejidos es mediada por los fotorreceptores, fitocromos (A y B) asociados a luz roja y los criptocromos asociados a luz azul que se encuentran ubicados en la hoja, los cuales a su vez activan al promotor de transcripción HY5 (LONG HYPOCOTYL 5). Posteriormente este promotor se une y activa los genes codificadores de proteínas transportadoras de nitrato en raíz (familia *NRT1* y *NRT2*) y de amonio (familia *AMT1* y *AMT2*) y para la fase de asimilación del nitrato, el promotor HY5 cumple la función de activación y regulación de la expresión de los genes nitrato reductasa 2 (*NIA2*) y nitrito reductasa 1 (*NIR1*) que codifican para las enzimas nitrato reductasa y nitrito reductasa respectivamente (Gangappa y Botto, 2016)

La asimilación del amonio en aminoácidos se lleva a cabo por las enzimas glutamina sintetasa (GS) y glutamato sintetasa (GOGAT) (Hawkesford, Horst, Kichey, Lambers, Schjoerring, Moller y White, 2012). Miao, Chen, Qu, Gao y Hou (2019) encontraron que la luz azul promovió la actividad de las enzimas GS y GOGAT, además se incrementó la absorción de nitrato y por consiguiente la concentración de nitrógeno en planta. Se ha comprobado que la asimilación de nitrato y la biosíntesis de aminoácidos se incrementa con luz azul (Berkovich *et al.*, 2017). Por otra parte, García-Caparrós, Almansa, Chica y Lao (2019) mencionan que la actividad de la enzima NR se incrementó en presencia de luz azul y también favoreció la acumulación de nitrógeno en planta.

Lo antes mencionado, coincidió con los resultados en concentración de nitrógeno, ya que a mayor proporción de luz azul se incrementó la concentración en planta (Figura 10).

La luz roja se ha asociado con la absorción y con el aumento en la concentración de fósforo en *Arabidopsis*, debido al mecanismo asociado con el fotorreceptor fitocromo B en hoja, el cual media el proceso regulatorio de absorción y uso de fósforo a través de dos vías de señalización y regulación, siendo la primera la vía-fitocromo B-HY5 y la segunda la vía-fitocromo B-PIFs (PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR), en donde en conjunto inducen en raíz la expresión del gen transportador de fosfato *PHT1;1* (INORGANIC PHOSPHATE TRANSPORTER) y el gen *PHL1* (HOMEODOMAIN-LIKE SUPERFAMILY PROTEIN) el cual también tiene la función de inducir la expresión del gen *PHT1;1* (Sakuraba, Kanno, Mabuchi, Monda, Iba y Yanagisawa, 2018).

En los resultados que se obtuvieron de fósforo en planta de cilantro (Figura 10) coincidió con lo mencionado por Sakuraba *et al.* (2018), ya que las plantas que recibieron solo luz azul presentaron una disminución de este nutrimento en comparación con las plantas que recibieron luz roja.

En plántulas de *Arabidopsis* la luz azul promueve la acumulación de potasio debido a una mayor actividad en el transporte de membrana asociados a los

canales iónicos de potasio ubicados en las células guarda de los estomas (García-Caparrós *et al.*, 2019).

El comportamiento del potasio en el experimento no siguió una tendencia clara, lo que puede deberse a un comportamiento propio de la especie, ya que fue el único macronutriente que no se ajustó a la regresión polinomial de tercer grado.

El mecanismo de absorción y asimilación de azufre (sulfato), se induce primero a través de una señal generada a nivel de fotorreceptores al recibir luz, la cual activa al promotor de transcripción HY5, el cual se une a determinados promotores de genes con lo cual se induce la síntesis y se aumenta la actividad del gen que codifica para la proteína transportadora de sulfato *SULTR1;2* (SULFATE TRANSPORTER 1;2) y de los genes *APR1* (ADENOSINE 5' PHOSPHOSULPHATE REDUCTASE 1) y *APR2* (ADENOSINE 5' PHOSPHOSULPHATE REDUCTASE 2) asociados con los mecanismos de asimilación (Gangappa y Botto, 2016; Sakuraba y Yanagisawa, 2017).

El azufre forma parte de proteínas a través de los aminoácidos metionina y cisteína que poseen azufre en su estructura, forma parte también de la molécula glutatión, que es un antioxidante que protege a las células de especies reactivas de oxígeno, así como de otras moléculas involucradas en la defensa como glucosinolatos y tioredoxinas (Hawkesford, Horst, Kichey, Lambers, Schjoerring, Moller y White, 2012).

En plantas de cilantro la mayor absorción de sulfato y posible asimilación en proteínas o moléculas asociadas al azufre fue mayor en plantas de cilantro que recibieron al mismo tiempo luz azul y roja (Figura 10).

La luz azul induce en plantas de *Arabidopsis* la actividad de los transportadores de calcio (Kopsell, Sams, Barickman y Morrow, 2014) y también causa variaciones en el transporte iónico de membrana, asociado a calcio, en las células guarda de estomas (Kopsell y Sams, 2013), con lo cual puede inducir mayor acumulación en tejido.

El comportamiento de la concentración de calcio en plantas de cilantro coincidió con lo mencionado con los anteriores autores, sin embargo, en esta especie es

necesario de un 25.8 % de luz roja para obtener una máxima concentración en tejido (Figura 10).

La concentración de cobre en cloroplastos, que es el orgánulo donde existe la mayor concentración, se modula mediante el mecanismo asociado con el promotor de transcripción HY5, el cual previamente se activa a través de una cascada de señalización intercelular generada por los fotorreceptores que son activados por el tipo de longitud de onda asociado a éstos, posteriormente el promotor HY5 cumple la función de interactuar físicamente con el factor de transcripción SPL7 (SQUAMOSA PROMOTER-BINDING PROTEIN-LIKE 7), los en conjunto activan el gen *MIR408* (microRNA408) que es requerido para regular la expresión de los genes *PETE1* (PLASTOCYANIN 1) y *PETE2* (PLASTOCYANIN 2) los cuales son los encargados de la síntesis de proteína plastocianina en cloroplasto y que contiene cobre en su estructura (Gangappa y Botto, 2016; Sakuraba y Yanagisawa, 2017).

En plantas de cilantro existió una posible mayor concentración cobre relacionado a la proteína plastocianina, cuando los tratamientos tuvieron una aproximación de una proporción de luz azul y roja $\approx 1:1$, la cual se registró en las plantas que recibieron 57.7 % de luz azul (Figura 11).

Miao *et al.* (2019) mencionan que existe una mayor concentración de zinc y manganeso en la presencia de luz roja. Este comportamiento se observó en zinc, ya que las plantas con tratamientos que tuvieron luz roja fueron mayores a las plantas que solo recibieron luz azul. De manera similar, el manganeso presentó una evidente mayor concentración en planta bajo la presencia de solo luz roja respecto al resto de tratamientos (Figura 11).

De manera general la concentración de nutrimentos en plantas puede verse afectada a través de procesos fisiológicos como apertura estomática, transpiración, biomasa acumulada, y tasa de crecimiento (Metallo, Kopsell, Sams y Bumgarner, 2018).

Se ha asociado que la luz roja promueve la acumulación de micronutrimentos en tejido Miao *et al.* (2019). Por otro lado, la luz azul se ha corroborado que puede aumentar de manera general la concentración de macronutrimentos y

micronutrientes dependiendo de la especie y la etapa de crecimiento, a través de una mayor apertura estomática, un incremento en la permeabilidad de los canales iónicos asociados a la absorción de nutrientes y junto con un aumento en la tasa de transpiración (Brazaitytė, Vaštakaitė, Viršilė, Jankauskienė, Samuolienė, Sakalauskienė, Novičkovas, ... y Duchovskis, 2018; Craver, Boldt y López, 2018; Gerovac, Craver, Boldt y Lopez, 2016).

Se requiere de mayor investigación para conocer más sobre los mecanismos y vías de señalización involucrados en la absorción y asimilación de nutrientes bajo el efecto de diferentes tipos de longitud de onda (Amoozgar, Mohammadi y Sabzalian, 2016; Miao *et al.*, 2019).

3.6 Conclusiones

Se puede concluir que una relación de luz azul y roja A37.7:R62.3 promovió variables del crecimiento y concentración de pigmentos fotosintéticos, mientras que una proporción de luz azul y roja A57.7:R42.3 promovió la concentración nutricional en la parte aérea de cilantro.

Lo anterior permite deducir que para una posible producción comercial de cilantro, en condiciones de ambiente controlado, la mejor relación de luz azul y roja es A37.7:R62.3 ya que se promueve el crecimiento y por lo tanto el rendimiento comercial.

3.7 Literatura citada

- Amoozgar, A., Mohammadi, A., & Sabzalian, M. R. (2016). Impact of light-emitting diode irradiation on the photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly. *Photosynthetica*, 55, 85-95, <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0216-8>
- Alcántar, G. & Sandoval, M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.
- Agarwal, A., Gupta, S. D., Barman, M., & Mitra, A. (2018). Photosynthetic apparatus plays a central role in photosensitive physiological acclimations affecting spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth in response to blue and red photon flux ratios. *Environmental and Experimental Botany*, 156, 170-182, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.09.009>

- AOAC Association of Official Analytical Chemistry (1980). Official methods of analysis (12th ed.). U.S.: AOAC International.
- Berkovich, Y. A., Konovalova, I. O., Smolyanina, S. O., Erokhin, A. N., Avercheva, O. V., Bassarskaya, E. M., ... & Tarakanov, I. G. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*, 6, 11–24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>
- Blankenship, R. E. (2014). *Molecular mechanisms of photosynthesis* (2nd ed.). India: Wiley Blackwell.
- Brazaitytė, A., Vaštakaitė, V., Viršilė, A., Jankauskienė, J., Samuolienė, G., Sakalauskienė, S., Novičkovas, A., ... & Duchovskis, P. (2018). Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 1227, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.64>
- Demotes-Mainard, S., Personal, T., Corotb, A., Bertheloot, J., Gourrierecb, J. L., Pelleschi-Travierb, S., ... & Sakr, S. (2016). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 4–21, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>
- Frąszczak, B. (2016). The effect of different doses of blue light on the biometric traits and photosynthesis of dill plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44(1), 34-40, <https://doi.org/10.15835/nbha44110212>
- Gangappa, S. N. & Botto, J. F. (2016). The multifaceted roles of hy5 in plant growth and development. *Molecular Plant*, 9, 1353–1365, <http://dx.doi.org/10.1016/j.molp.2016.07.002>
- García-Caparrós, P., Almansa, E. M., Chica, R. M., & Lao, M. T. (2019). Effects of artificial light treatments on growth, mineral composition, physiology, and pigment concentration in *Dieffenbachia maculata* “Compacta” plants. *Sustainability*, 11, 2867, <https://dx.doi.org/10.3390/su11102867>
- Gerovac, J. R., Craver, J. K., Boldt, J. K., & Lopez, R. G. (2016). Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of *Brassica* microgreens. *HortScience*, 51(5), 497-503, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>
- Gupta, S. D., & Pradhan, S. (2017). Regulation of gene expression by LED lighting. In Gupta S. D. (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture*. (pp.

237-258). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_10

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Moller, I. S., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In Marschner, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (pp: 135–189). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>

Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. California. Agricultural Experiment Station. Circular 347. 32 p.

Huché-Théliér, L., Crespel, L., Gourrierc, J. L., Morel, P., Sakr, S., & Leduc, N. (2016). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 22–38, <https://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009>

Katagiri F., Canelon-Suarez, D., Griffin, K., Petersen, J., Meyer, R. K., & Siegle, M. (2015). Design and construction of an inexpensive homemade plant growth chamber. *PLoS ONE*, 10(5), e0126826, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126826>

Kopsell, D. A., & Sams, C. E., (2013). Increases in shoot tissue pigments, glucosinolates, and mineral elements in sprouting broccoli after exposure to short-duration blue light from light emitting diodes. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(1), 31-37, <https://doi.org/10.21273/JASHS.138.1.31>

Kopsell, D. A., Sams, C. E., Barickman, T. C., & Morrow, R. C. (2014). Sprouting broccoli accumulate higher concentrations of nutritionally important metabolites under narrow-band light-emitting diode lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 139(4), 469-477, <https://doi.org/10.21273/JASHS.139.4.469>

Kozai, T., & Niu, G. (2016). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 115-128). San Diego, USA: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00002-0>

Kubota, C. (2016). Growth, development, transpiration and translocation as affected by abiotic environmental factors. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 151-164). San Diego, USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00010-X>

- Laribi, B., Kouki, K., M'Hamdi, M., & Bettaieba, T. (2015). Coriander (*Coriandrum sativum* L.) and its bioactive constituents. *Fitoterapia*, 103, 9-26, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fitote.2015.03.012>
- Mahendra, P., & Bisht, S. (2011). *Coriandrum sativum*: A daily use spice with great medicinal effect. *Pharmacognosy Journal*, 3(21), 84-88, <http://dx.doi.org/10.5530/pj.2011.21.16>
- Metallo, R. M., Kopsell, D. A., Sams, C. E., & Bumgarner, N. R. (2018). Influence of blue/red vs. white LED light treatments on biomass, shoot morphology, and quality parameters of hydroponically grown kale. *Scientia Horticulturae*, 235, 189-197, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.061>
- Miao, Y., Chen, Q., Qu, M., Gao, L., & Hou, L. (2019). Blue light alleviates 'red light syndrome' by regulating chloroplast ultrastructure, photosynthetic traits and nutrient accumulation in cucumber. *Scientia Horticulturae*, 257, 108680, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108680>
- Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Hao, X. (2016). Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. *Acta Horticulturae*, 1134, 223-229, <https://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.30>
- Nguyen, D. T. P., Lu, N., Kagawa N., & Takagaki, M. (2019). Optimization of photosynthetic photon flux density and root-zone temperature for enhancing secondary metabolite accumulation and production of coriander in plant factory. *Agronomy*, 9(5), 224, <https://doi.org/10.3390/agronomy9050224>
- Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, ... & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 10, 305, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305>
- Prachayasittikul, V., Prachayasittikul, S., Ruchirawat, S., & Prachayasittikule, V. (2018). Coriander (*Coriandrum sativum*): A promising functional food toward the well-being. *Food Research International*, 105, 305-323, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.019>
- Sakuraba, Y., Kanno, S., Mabuchi, A., Monda, K., Iba, K., & Yanagisawa, S. (2018). A phytochrome-B-mediated regulatory mechanism of phosphorus acquisition. *Nature plants*, 4, 1089-1101, <https://dx.doi.org/10.1038/s41477-018-0294-7>

- Sakuraba, Y., & Yanagisawa, S. (2017). Light signalling-induced regulation of nutrient acquisition and utilisation in plants. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 83, 123-132, <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.12.014>
- SAS Institute (2002). SAS System for Windows Computer Program. Software Version 9.0. Cary, North Carolina, USA.
- Verma, S. K., Gantait, S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2018). Enhanced growth and cardenolides production in *Digitalis purpurea* L. under the influence of different LED exposures in the plant factory. *Nature Scientific Reports*, 8, 18009, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36113-9>
- Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. (2016). Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*, 7, 250, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00250>
- Wei, J-N., Liu, Z-H., Zhao, Y-P., Zhao, L-L., Xue, T-K., & Lan, Q-K. (2019) Phytochemical and bioactive profile of *Coriandrum sativum* L. *Food Chemistry*, 286, 260-267, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.171>

**4. EFECTO DE DIFERENTES RELACIONES DE LUZ
AZUL:ROJA EN LA CALIDAD DE PLÁNTULAS DE CHILE
HABANERO *Capsicum chinense* Jacq.**

EFFECTO DE DIFERENTES RELACIONES DE LUZ AZUL:ROJA EN LA CALIDAD DE PLÁNTULAS DE CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq).

4.1 Resumen

El chile habanero es una de las especies hortícolas de mayor importancia en la península de Yucatán y en México. La producción de plántula es la parte crucial inicial para una producción exitosa de frutos. Las plántulas de chile habanero son ideales para crecer bajo un ambiente controlado, ya que se pueden producir durante todo el año plántulas libres de plagas y enfermedades. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de luz LED azul:roja en parámetros de calidad como crecimiento y concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b, total, proporción a/b y carotenoides) en hojas de plántulas de chile habanero 'Mayan Ba'alché'. Las plántulas se obtuvieron de la germinación de semillas, las cuales se establecieron 17 días después de la siembra en una cámara de crecimiento bajo cinco diferentes proporciones de luz LED azul (A) y roja (R): A0:R100, A34.5:R65.5, A57.1:R42.9, A76.0:R24, A100:R0 y un testigo (luz fluorescente). Se aportó una densidad de flujo de fotones fotosintéticos de $242.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 15 h por día. Los resultados mostraron que el testigo promovió el número de hojas, área foliar, índice de área foliar, peso fresco de hoja y un menor grosor de hoja, mientras el tratamiento A100 promovió el desarrollo del tallo, altura de planta, distancia de entrenudos, peso fresco de tallo y peso seco de tallo, seguido de A0. Las proporciones A34.5, A57.1 y A76, mostraron un efecto negativo en parámetros de crecimiento cuando se comparó con los tratamientos monocromáticos. No hubo efectos en el peso seco de la parte aérea. Los pigmentos fotosintéticos no tuvieron efectos estadísticos, excepto para clorofila a.

Palabras clave: *Capsicum chinense* Jacq., diodo emisor de luz, habanero, plántula.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jorge Enrique Mendoza Paredes

Director de Tesis: Dra. Ana María Castillo González

EFFECT OF DIFFERENT RATIOS OF BLUE:RED LIGHT ON QUALITY OF HABANERO PEPPER SEEDLINGS (*Capsicum chinense* Jacq).

4.2 Abstract

Habanero pepper is one of the most important horticultural species in the Yucatan peninsula and in México. Seedling production is the crucial initial part for successful fruit production. Habanero pepper seedlings are ideal for growing under controlled environment as pest and disease-free seedlings can be produced year-round. The objective of the present study was to evaluate the effect of different blue:red LED light ratios on quality parameters such as growth and photosynthetic pigments concentration (chlorophyll a, b, total, a/b and carotenoids) in leaves of habanero pepper seedlings 'Mayan Ba'alché'. Seedlings were obtained from seed germination, which were established 17 days after sowing in a growth chamber under five different proportions of blue (B) and red (R) LED light: B0:R100, B34.5:R65.5, B57.1:R42.9, B76.0:R24, B100:R0 and a control (fluorescent light). A photosynthetic photon flux density of $242.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ was provided for 15 h per day. The results showed that the control treatment promoted the number of leaves, leaf area, leaf area index, leaf fresh weight and the lowest leaf thickness, while B100 treatment promoted stem development, plant height, internode distance, fresh stem weight and dry stem weight, followed by B0. Ratios B34.5, B57.1 and B76 showed a negative effect on growth parameters when compared to monochromatic treatments. There were no effects on shoot dry weight. Photosynthetic pigments had no statistical effects, except for chlorophyll a.

Key words: *Capsicum chinense* Jacq., Light-emitting-diode, habanero pepper, seedling.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Advisor: Dra. Ana María Castillo González

4.3 Introducción

El chile habanero es una planta anual de 30 a 120 cm de altura, de tipo arbusto (Lim, 2013), es nativa de las tierras bajas de la cuenca amazónica, de donde se dispersó en la época prehispánica a Perú, a la cuenca del Orinoco, las Antillas y finalmente arribó a la Península de Yucatán (Trujillo, 2018). Es una de las especies hortícolas de mayor importancia de la península de Yucatán (Ruiz-Lau, Medina y Martínez, 2011; Castillo-Aguilar, Quej-Ch, Coh-Méndez, Carrillo-Ávila y Monsalvo-Espinosa, 2015) y obtuvo la denominación de origen en esta región en 2010 (Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2016). El chile habanero posee diversas propiedades nutraceuticas, medicinales, industriales y medicinales (Lim, 2013).

La producción de plántula es la parte crucial inicial para una posterior producción exitosa de frutos, es la etapa donde más vulnerable es y tiene un periodo de que abarca de los 40 a 50 días (Castillo-Aguilar *et al.*, 2015). Debido a estas características, la producción de plántula de chile habanero es idónea para cultivarse en ambiente controlado (Kozai, Shibuya, He, Zobayed y Chun, 2016), ya que tiene un ciclo corto de crecimiento al igual que posee un porte pequeño (Kozai y Niu, 2016).

Actualmente no existe investigación de esta especie en condiciones controladas de crecimiento con luz LED. Se reportan investigaciones en condiciones similares con plántulas de tomate (Hernández, Eguchib, Devecic y Kubota, 2016; Kim y Hwang, 2019; Liu, Jiao, Chang, Guo y Xu, 2018; Wollanger y Runkle, 2015) y en plántula de pepino por Hernández y Kubota (2016), donde en cada investigación se obtuvieron efectos diferentes para cada especie y variedad en relación con diferentes proporciones de luz LED roja y azul.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de luz LED roja y azul en la calidad de plántulas evaluada con el crecimiento y concentración de pigmentos fotosintéticos en hojas de plántula de chile habanero.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Germinación

Se utilizaron semillas de chile habanero ‘Mayan Ba’alché’ del CICY, las cuales se sembraron en charolas, con un tamaño de cavidad de 3.1 cm x 3.1 cm (base superior), 6.0 cm (altura), 2.1 cm x 2.1 cm (base inferior) y 23 mL (volumen), una semilla por cavidad a una profundidad de 1 cm en una mezcla de turba:perlita (3:1) [turba rubia (Pro mix[®]) y perlita (Agrolita[®])], las cuales se cortaron para tener 80 cavidades (4 filas x 20 columnas). Una vez sembradas las semillas, las charolas se colocaron en un laboratorio donde tuvieron luz solar incidente durante el día y fueron regadas con agua potable (pH 7.1 y CE 0.42 dS m⁻¹). La temperatura ambiental (día 25.8±0.2 °C/noche 22.6±0.1 °C) y la humedad relativa (día 51.5±0.6 %/noche 58.6±0.6 %), se registraron con un datalogger Extech instruments[®] modelo RH10. A los 17 días en estas condiciones, se llevaron a una cámara de crecimiento para iniciar los tratamientos.

4.4.2 Cámara y gabinetes de crecimiento

Se realizó una adaptación de una cámara de crecimiento a partir de un cuarto frío usado (TORREY[®], MEX), con medidas interiores de 2.76 m x 2.76 m x 1.90 m (ancho, largo y altura), las modificaciones internas de la cámara de crecimiento se basó en el diseño de Katagiri, Canelon-Suarez, Griffin, Petersen, Meyer y Siegle (2015), con las cuales se logró regular la temperatura ambiental y la humedad relativa a través de un aire acondicionado portátil (LG[®] modelo LP1017WSR 10200 BTU, KOR) y un deshumidificador (Whirlpool[®] modelo WAD200 5Q 20L/24 h, USA) los cuales se colocaron dentro de la cámara de crecimiento.

Se diseñaron seis gabinetes de crecimiento con la finalidad de mantener aislados los tratamientos de luz. Éstos se construyeron a partir de un anaquel metálico (0.3 m de ancho x 0.85 m de largo x 1.45 m de altura), al cual se le añadieron paredes de placas de unicel de 2 cm de grosor, forradas con papel aluminio, con la finalidad de tener un máximo de reflexión de la luz en su interior.

4.4.3 Tratamientos con diferentes proporciones de luz complementaria

LED roja y azul.

Las lámparas que se utilizaron fueron hechas a mano y estuvieron compuestas por perfiles de aluminio (5 cm de ancho x 85 cm de largo) que sirvieron como base de anclaje las lámparas LED y las lámparas fluorescentes; que se colocaron en la base superior de cada uno de los gabinetes de crecimiento. Se utilizaron dos perfiles por tratamiento (12 lámparas LED por perfil), excepto para el testigo, donde se usaron cuatro perfiles (1 lámpara fluorescente por perfil) (Cuadro 5).

Los tratamientos de luz que se utilizaron consistieron en diferentes proporciones de luz azul y roja y un testigo con luz fluorescente. Se utilizaron para el tratamiento A0 %: A100 % (A0) 24 lámparas rojas, A34.5 %:R65.5% (A34.5) 6 azules y 18 lámparas rojas, A57.1 %:R45.9 % (A57.1) 12 lámparas azules y 12 lámparas rojas, A76 %:R24% (A76) 18 lámparas azules y 6 rojas, A100 %:R0 % (A100) 24 lámparas azules. La densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y las propiedades del espectro electromagnético de los tratamientos se midió con un espectroradiómetro (Apogee instruments® modelo SS-110, EUA) tomándose 330 mediciones en el área de cultivo (66 cm x 20 cm= 1320 cm²) para verificar que los tratamientos tuvieran la misma densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) (Cuadro 5).

Se realizó un análisis estadístico de las variables físicas de los tratamientos para asegurar que las intensidades de luz entre tratamientos LED fueran iguales y las proporciones de luz azul y roja fueran diferentes; además de verificar el pico de longitud de onda (nm) e intervalo de la luz LED presente en los tratamientos. Se estableció un fotoperiodo para todos los tratamientos de luz de 15 h por día durante 35 días.

Cuadro 5. Propiedades físicas de tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja en plántulas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas.

		Tratamientos				
	FL	A0	A37.7	A57.7	A74.2	A100
PrA	Testigo	A0 %	A34.5 %	A57.1 %	A76 %	A100 %
PrR	Testigo	R100 %	R65.5 %	R42.9 %	R25.8 %	R0 %
Mar	Osram	Longniu	Longniu	Longniu	Longniu	Longniu
Mod	OctronF017	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB008
Pot	17	4	4	4	4	3
Dis	39.0	70.5	63.5	49.5	43.8	34.5
Dtot	119.1±0.6b	241.5±3.1a ^x	241.4±3.3a	244.4±2.4a	241.4±1.8a	243.8±2.5a
LID	6.4±0.0b	13.0±0.2a	13.0±0.2a	13.2±0.1a	13.0±0.1a	13.2±0.1a
λA	-	-	457±0b	457±0a	457±0b	457±0b
λA	-	-	423±0a	420±0b	417±0c	415±0d
	-	-	506±0d	513±0c	516±0b	519±0a
%DA	-	-	34.5±0.6d	57.1±0.3c	76.0±0.3b	100.0±0.0a
λR	-	636±0b	635±0c	637±0a	636±0b	-
λR	-	594±0d	595±0c	598±0b	601±0a	-
	-	675±0a	670±0b	669±0c	664±0d	-
%DR	-	100.0±0.0a	65.5±0.6b	42.9±0.3c	24.0±0.3d	-

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). FL= fluorescente con un intervalo de 416nm – 715nm (testigo); A= Luz LED azul; R= Luz LED roja; PrA= Proporción azul; PrR= Proporción rojo; Mar= Marca; Mod= Modelo; Pot= Potencia (watts); Dis= Distancia luminaria - copa de planta; Dtot= Densidad de flujo de fotones fotosintéticos total de tratamiento ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); LID= Luz integral diaria ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); λA= Pico de longitud de onda (nm) color azul; λA= Pico de longitud de onda (nm) color azul; %DA= Porcentaje de densidad de flujo de fotones fotosintéticos de luz azul (%); λR = Pico de longitud de onda (nm) color rojo; λR= Intervalo de longitud de onda color rojo (nm); %DR= Porcentaje de densidad de flujo de fotones fotosintéticos de luz roja (%).

4.4.4 Condiciones de la cámara de crecimiento

Diecisiete días después de la siembra, las charolas con las plántulas se colocaron (una charola por tratamiento) dentro de los gabinetes de crecimiento. Las charolas se regaron diariamente con 300 mL de la solución Hoagland modificada a 1/5 de su concentración (Bojórquez-Quintal, Velarde-Buendía, Ku-González, Carillo-Pech, Ortega-Camacho, Echevarría-Machado, ... y Martínez-Estévez, 2014) con pH de 6.8 y CE de 1.35 dS cm^{-1} , donde se abastecieron los macronutrientes de la forma siguiente: 1.2 mM KNO_3 , 0.8 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0.2 mM KH_2PO_4 , 0.2 mM MgSO_4 y los micronutrientes se abastecieron con la mezcla Tradecorp® AZ (0.065 g L^{-1}).

La temperatura ambiental promedio (día $28.2 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ /noche $25.3 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$) y la humedad relativa promedio (día $56.2 \pm 0.5 \%$ /noche $77.1 \pm 0.5 \%$) se registraron cada minuto con el promedio de los registros de tres datalogger (Extech instruments® modelo RH10, USA), ubicados a nivel de copa de la planta, dentro de tres gabinetes seleccionados. La temperatura promedio de la solución nutritiva se midió con un termómetro infrarrojo (Extech instruments® modelo 42530, USA) y fue de $26.1 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la concentración promedio de CO_2 se midió con un medidor portátil de CO_2 ambiental (Extech instruments® modelo CO250, USA) y fue de $397 \pm 53 \text{ ppm}$.

4.4.5 Variables de crecimiento

Después de 35 días con los tratamientos de luz LED, las plántulas se cosecharon y se determinó de la parte aérea: la altura de planta (cm), número de hojas por planta, grosor de tallo (mm) con un vernier digital (Truper®, MEX), área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) con un integrador de área foliar LI-3100 (LICOR®, USA), se calculó el índice de área foliar [área foliar (cm^2)/área de cultivo (cm^2)], el área foliar específica [área foliar (cm^2)/peso seco hoja (cm^2)], distancia de entrenudos (cm) que se obtuvo del cociente de la altura de planta y el número de hojas.

Además, se determinó el peso fresco de tallo (g planta^{-1}) y peso fresco de hoja (g planta^{-1}) con una balanza de precisión (Ohaus® Scout Pro, USA), el peso

fresco de la parte aérea (g planta^{-1}), se obtuvo la suma del peso fresco de tallo y hoja.

Posteriormente, la parte aérea se secó en una estufa de aire forzado (BINDER® modelo FED 115, DEU) por 48 horas a 70 °C y se registró el peso seco de tallo (g planta^{-1}) y peso seco de hoja (g planta^{-1}) con una balanza de precisión (Ohaus® Golden series, USA). El peso seco de la parte aérea (g planta^{-1}) se obtuvo de la suma del peso seco del tallo y de la hoja.

La frecuencia estomática (número de estomas mm^{-2}) se obtuvo aplicando barniz transparente de uñas en el envés de la hoja, para posteriormente despegar esta calca y contabilizar la cantidad de estomas por campo del microscopio (Carl Zeiss® AxioStar, DEU) con un aumento de 40X. En cada una de las variables medidas se utilizaron 20 repeticiones por tratamiento, excepto para frecuencia estomática donde se utilizaron 10 repeticiones.

4.4.6 Concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja

Las concentraciones de clorofila a, b y total (mg g^{-1} de peso fresco), proporción de clorofila a/b y concentración de carotenoides (mg g^{-1} de peso fresco) se determinaron mediante la metodología descrita por la AOAC (1980). Estas variables se determinaron en hojas fuente (de reciente maduración), completamente desarrolladas, recién cortadas y utilizando tres hojas por plántula, se utilizaron nueve repeticiones por tratamiento, donde cada repetición fue una plántula.

4.4.7 Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, una repetición estuvo constituida por una plántula. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($P < 0.05$) mediante el programa SAS V9.0 (SAS Institute, 2002).

4.5 Resultados y discusión

4.5.1 Variables de crecimiento de la parte aérea

Los resultados muestran que en general al ir aumentando la proporción de luz azul se disminuyó la altura de planta, pero cuando la luz azul fue el 100% este

parámetro se recuperó sustancialmente, mientras las de menor altura se registraron en las plantas que recibieron 76 % de luz azul (Cuadro 6).

Kim y Hwang (2019) encontraron en plántulas de tomate ‘Mini Chal’ una tendencia similar a nuestros resultados, en los tratamientos solo con luz azul y roja tuvieron las mayores alturas, mientras que con proporciones A30 %:R70 %, A50 %:R50 %, A70 %:R30 % fueron menos altas las plántulas.

La distancia entre entrenudos mostró una tendencia similar a la altura de planta (Cuadro 6). De manera similar Metera, Wtulich, Gajc-Wolska, Niedzinska, Bujalski y Kowalczyk (2016), solo en tratamientos con luz monocromática azul y roja en plántula de tomate ‘Komeet’ y ‘Starbuck’ obtuvieron la mayor altura de plántula respecto a la registrada con A30 %:R70 %, además, encontraron una mayor distancia de entrenudos en ambos tratamientos monocromáticos (A0 %:R100 % y A100 %:R100 %) y menor en A30 %:R70 %.

Las variables de altura de planta y distancia de entrenudos en plántulas de chile habanero con 100 % de luz azul fueron los mayores (Cuadro 6).

Existió un efecto negativo en las plantas que recibieron luz azul y roja al mismo tiempo, en comparación con las plantas con tratamientos monocromáticos azul y rojo (Cuadro 6). Lo anterior podría explicarse en base en un efecto negativo entre el fotorreceptor fitocromo (asociado a la luz roja) y los fotorreceptores criptocromo, fototropinas y zeitlupe (asociados a la luz azul) a nivel de segundos mensajeros intercelulares; transporte, activación y síntesis hormonal; además, de activación y expresión de genes en cloroplasto y núcleo celular (Berkovich, Konovalova, Smolyanina, Erokhin, Avercheva, Bassarskaya, ... y Tarakanov, 2017); debido a que ambos tipos de receptores contribuyen en muchas otras funciones de manera redundantemente o sinérgicamente en otros procesos fisiológicos (Berkovich *et al.*, 2017; Demotes-Mainard, Personal, Corotb, Bertheloot, Gourrierecb, Pelleschi-Travieb, ... y Sakr, 2016).

El comportamiento de las plantas que recibieron 0 % de luz azul, probablemente se debe a que se generó una estimulación activa del fitocromo, el cual está asociado en promover una mayor altura de planta mediante la

elongación del tallo (Pocock, 2015) y por consiguiente la distancia de entrenudos.

Por otro lado, las plantas que recibieron 100 % de luz azul, probablemente tuvieron un comportamiento opuesto a lo asociado a los fotorreceptores de luz azul, los cuales tienden a reducir la altura de planta en base en el control que ejercen en la expansión celular a través de la reducción de la extensibilidad de la pared celular (Huché-Thélier, Crespel, Gourrirec, Morel, Sakr y Leduc, 2016).

Las plantas que recibieron luz roja (A0 %) mostraron un mayor diámetro de tallo que aquellas que recibieron el 100 % de luz azul, mientras que las plantas del testigo obtuvieron el menor diámetro de tallo (Cuadro 6). Los resultados obtenidos tuvieron una tendencia similar a los encontrados por Hong, Huang y Dai (2015) en plántula de crisantemo 'Riqietaohong', ya que donde existió un mayor grosor de tallo conforme la proporción de luz LED azul disminuyó.

El diámetro de tallo en plántulas fue menor cuando recibieron luz fluorescente debido a que tuvo la mitad de la LID y DFFF (Cuadro 5) que el resto de los tratamientos LED, lo que trajo consigo una disminución del grosor de tallo en pro de desarrollar mayor número de hojas y área foliar.

Aunque no hubo efectos significativos en el número de hojas entre los tratamientos de luz azul, las plantas que recibieron 0 % resultaron con un número de hojas menor al de las plantas que recibieron la luz fluorescente (Cuadro 6).

El número de hojas que obtuvo Metera *et al.* (2016) en plántulas de tomate con tratamientos de luz LED azul y rojo fueron mayores con las proporciones A0 %:R100 %, A100 %:R0 % y ligeramente menor con A30 %:R70 %. Por otra parte, los resultados obtenidos por Hernández y Kubota (2016) en plántulas de pepino 'Cumlaude' además de los obtenidos por Wollanger y Runkle (2015) en plántulas de *impatiens* 'Super Elfin', salvia 'Vista Red' y tomate 'Early Girl' fueron iguales el número de hojas entre tratamientos, siendo de esta manera, resultados con una tendencia similar a lo que se obtuvo en nuestro experimento.

El número de hojas se promovió en mayor proporción en plantas que recibieron luz fluorescente, a pesar de tuvieron una menor LID y DFFF (Cuadro 5) y el cual es causa de un mecanismo de adaptación a baja intensidad luminosa por parte de la planta (Qiansheng *et al.*, 2014; Stanton *et al.*, 2010; Tsukaya, 2005).

Entre los tratamientos con luz LED, esta especie no es tan susceptible a modificar su número de hojas en base en una cierta proporción de luz azul o roja.

Las plantas que recibieron 0 % de luz azul resultaron con un área foliar, índice de área foliar y área foliar específica menor a las plantas que recibieron la luz fluorescente, sin embargo, los menores resultados se registraron en las plantas con tratamientos que presentaron ambos tipos de luz azul y roja (Cuadro 6). Los resultados de Wollanger y Runkle (2015) en plántulas de petunia 'Wave Pink' son similares a los nuestros, ya que también su mayor área foliar la encontraron con las proporciones de luz LED en el tratamiento A0 %:R100 %; y la menor área foliar la encontraron con A50 %:R50 % y A6 %:R94 %; estos autores también encontraron que en plántulas de impatiens 'Super Elfin' y en salvia 'Vista Red' el tratamiento A0 %:R100 % fue el que presentó la mayor área foliar y el resto de tratamientos no fueron similares a los nuestros. Agarwal, Gupta, Barman y Mitra (2018) encontraron en plantas de espinaca 'All Green' una tendencia similar a nuestros resultados de área foliar específica, donde el tratamiento A0 %:R100 % fue el más alto.

El área foliar de las plantas que crecieron bajo la luz fluorescente, tuvo la mayor área foliar con 85.05 cm² debido a la adaptación a una baja intensidad luminosa al igual como anteriormente se explicó.

Entre los tratamientos LED, el comportamiento que tuvieron las plántulas pudo ser inherente a la especie y a la calidad de la luz; ya que Huché-Thélier *et al.* (2016) mencionan que la luz azul puede incrementar o disminuir el área foliar y en algunas especies no tiene un impacto en este parámetro, por otro lado, Berkovich *et al.* (2017) mencionan que la luz roja puede incrementar o disminuir el área foliar dependiendo de la biología de la planta.

El índice de área foliar de las plantas con tratamientos de luz LED estuvieron dentro del intervalo de 3.0 a 4.0, lo que aseguró que las plantas tuvieran una óptima intercepción de luz de 90 a 100 %; cuando los valores son mayores a 4.0, como en el caso de las plantas que recibieron luz fluorescente (5.2), las hojas más bajas de la planta se encontraron muy sombreadas y no tuvieron la suficiente luz incidente, lo que generó una pérdida de fotosintatos asimilados debido a que la respiración fue mayor de lo que se gana como resultado de la fotosíntesis (Yamori, 2016).

Las plantas que recibieron un 57.1 % de luz azul, y que tuvieron una proporción cercana a 1:1 (luz azul:luz roja), presentaron un efecto negativo al compararse con las plantas que recibieron luz monocromática azul y/o roja.

Los resultados del área foliar específica (AFE) que se obtuvieron entre tratamientos con luz LED mostraron que las plantas que recibieron 0 % y 100 % de luz azul, el grosor de hoja fue más delgado respecto a las plantas que recibieron al mismo tiempo ambos tipos de luz azul y roja, destacando las plantas que recibieron A57.1 % de luz azul, donde se registró el mayor grosor de hoja, lo cual puede ser debido a un proceso de aclimatación a la composición espectral de la luz propia de la especie (Berkovich *et al.*, 2017). El anterior comportamiento contradice a lo mencionado por Huché-Thélier *et al.* (2016), donde describen que en plantas que son expuestas a 100% de luz azul en comparación con 100% de luz roja o verde o también cuando la luz azul tiene mayor intensidad dentro de un espectro estudiado promueven un mayor grosor de hoja.

En condiciones de baja intensidad de luz lleva de manera general, a desarrollar hojas más grandes con un grosor más delgado y una baja frecuencia estomática (Stanton, Weeks, Dana y Mickelbart, 2010), con el objetivo de tener un área foliar suficiente y con ella la planta pueda llevar a cabo de la mejor manera la fotosíntesis, fijación de CO₂ y acumulación de almidón (Tsukaya, 2005). El área foliar específica (AFE) (cm² g⁻¹) es una medida indirecta del grosor de la hoja en una planta, donde a menor AFE la hoja es de mayor grosor y a mayor AFE es de menor grosor (Amanullah, 2015), lo cual describe de

manera precisa los resultados que se obtuvieron en el testigo, donde se obtuvo el menor grosor de hoja respecto a los tratamientos con luz LED en consecuencia de su adaptación a una baja DFFF.

La frecuencia estomática fue mayor en plantas que recibieron un 34.5 % de luz azul en comparación con las plantas que tuvieron luz fluorescente y obtuvieron la menor frecuencia estomática (Cuadro 6). Liu *et al.* (2018) encontraron valores similares ya que la mayor frecuencia estomática en plántula de tomate 'Qianxi' fue con las proporciones A50 %:R50 %.

El comportamiento de la frecuencia estomática no siguió una tendencia clara entre los tratamientos LED evaluados en esta investigación, dado que en ambos tratamientos con 0 % y 100 % de luz azul ejercieron un efecto igual en las plantas; sin embargo, Huché-Thélier *et al.* (2016) mencionan que la luz azul incrementa la frecuencia estomática en comparación con plantas que crecieron bajo luz roja o verde. Se puede inferir que para esta especie que se evaluó un 34.5% de luz azul es la adecuada para que exista una mayor frecuencia estomática.

El peso fresco de tallo fue mayor en plantas que tuvieron el 100 % de luz azul mientras que el menor peso fresco se registró en las que tuvieron los tratamientos con ambos tipos de luz azul y roja (Cuadro 6). Las plantas que recibieron 0 % y 76 % de luz azul resultaron con un peso fresco de hoja menor al de las plantas que recibieron luz fluorescente (Cuadro 6). El peso fresco de la parte aérea fue mayor para las plantas que recibieron 0% y 100 % de luz azul, así como para el testigo, mientras que el menor peso lo obtuvieron las plantas con 57.1% de luz azul (Cuadro 6).

Los resultados reportados por Kim y Hwang (2019) de peso fresco de la parte aérea en plántula de tomate 'Mini Chal', también obtuvieron un máximo peso fresco con el tratamiento monocromático rojo A0 %:R100 %, y por otra parte, en su tratamiento evaluado con una proporción de luz azul y roja A50 %:R50 % registraron el menor fresco de la parte aérea.

Las variables de peso fresco de tallo, hoja y de la parte aérea mostraron junto con el resto de las variables de crecimiento tres comportamientos muy importantes.

El primer comportamiento consistió en el favorecimiento del desarrollo del tallo en las plántulas que recibieron el 100% de luz azul, seguido, pero en menor medida de las plántulas que recibieron 0% de luz azul. Lo anterior se vio corroborado en los resultados de altura de planta, distancia de entrenudos y peso fresco de tallo y peso fresco de parte aérea (Cuadro 6).

Además, el favorecimiento del crecimiento del tallo se debió a que éste se comportó como un órgano de demanda con mayor prioridad respecto a la hoja a pesar de que este es un órgano fuente, con lo cual se dirigieron una mayor cantidad de fotosintatos para el crecimiento del tallo respecto a la hoja (Engels, Kirkby y White, 2012).

El segundo comportamiento, promovió el desarrollo de las hojas en plántulas que recibieron luz fluorescente respecto al resto de tratamientos con luz LED, lo cual se vio corroborado con el número de hojas, área foliar, índice de área foliar, peso fresco de hoja y peso fresco de la parte aérea. Como se mencionó anteriormente, este comportamiento se debió a una adaptación a condiciones de baja intensidad luminosa por parte de la planta.

Esto fue debido a que el órgano de mayor demanda fue la hoja, que también es el órgano fuente, lo que trajo como consecuencia mayor crecimiento de hoja respecto al tallo (Engels *et al.*, 2012).

Entre los tratamientos LED, la luz monocromática roja (A0 %:R100 %) promovió más el desarrollo de área foliar con lo cual también el peso fresco de hoja.

El tercer comportamiento consistió en un efecto negativo en las plantas que recibieron al mismo tiempo ambos tipos de luz, ya que obtuvieron los menores resultados en la mayoría de las variables de crecimiento en comparación con los tratamientos que recibieron 0 % y 100% de luz azul. Lo anterior probablemente se debió a un efecto negativo a nivel de fotorreceptores, ya que estos a través de señalización intercelular con segundos mensajeros están

involucrados en el sistema de fotorregulación y el cual afecta a la mayoría de los procesos fisiológicos en las plantas (Berkovich *et al.*, 2017).

Los resultados de peso seco de tallo en plántula siguieron una tendencia similar a los que se obtuvieron en peso fresco de tallo.

Las plantas que recibieron luz azul al 100 % mostraron el mayor peso seco de tallo, mientras que las de menor altura fueron las que recibieron luz fluorescente (Cuadro 6). El peso seco de hoja y peso seco de la parte aérea no tuvieron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 6).

Las variables de crecimiento presentaron un comportamiento diferencial entre las plantas que recibieron luz fluorescente, 0 % y 100 % de luz azul LED, además de las plantas que recibieron diferentes proporciones de luz azul y roja al mismo tiempo.

La LID necesaria para la producción de plántula en ambiente controlado es de $13 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Kubota, 2016), la cual es inferior a lo que recibieron las plantas del testigo ($6.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Cuadro 5), sin embargo, en los tratamientos con luz LED éstos se encontraron dentro de este valor. La baja intensidad de luz indujo en las plantas del testigo mayor formación de hojas entre los tratamientos y, en consecuencia, obtuvieron también la mayor área foliar, índice de área foliar, área foliar específica y la menor frecuencia estomática.

El comportamiento antes mencionado, es una respuesta de adaptación propia de las plantas que crecen en ambientes con una baja densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (DFFF) respecto a otras que lo hacen en ambientes con mayor DFFF, debido a que las plantas que están adaptadas en ambientes con una mayor DFFF tienen puntos de saturación de luz más altos en relación a la tasa fotosintética neta, debido a que tiene mayores niveles de enzimas para la carboxilación y transporte de electrones de manera global en el proceso de la fotosíntesis; mientras que en las plantas adaptadas a una menor DFFF típicamente poseen una tasa baja fotosintética, pero tienen la capacidad de capturar eficientemente y usar la energía de la luz, usualmente a través del incremento en la concentración de clorofila y disminuir la relación clorofila a/b (Qiansheng, Deng, Xiong, Coombes y Zhao, 2014).

Las variables de peso seco de hoja y peso seco de la parte aérea en plántulas al no ser significativos entre tratamientos sus comportamientos fueron opuestos con los resultados del resto de variables de crecimiento evaluadas. Los anteriores comportamientos se pudieron atribuir en base en el proceso de acumulación de biomasa (peso seco de la parte aérea) que se llevó a cabo a través del crecimiento, el cual está constituido por la división celular y expansión celular (Cosgrove, 2005), mismo que es regulado por ciclos circadianos, condiciones ambientales, nutrimentales, hídricas y mediante la señalización con segundos mensajeros y fitohormonas (Poiré, Wiese-Klinkenberg, Parent, Mielewczik, Schurr, Tardieu y Walter, 2010; Walter, Silk, y Schurr, 2009). Estas últimas son usadas por los fotorreceptores como uno de sus mecanismos de comunicación en la planta (Berkovich *et al.*, 2017) y además poseen un papel como moléculas reguladoras de crecimiento y desarrollo (Engels *et al.*, 2012).

Las diferencias entre las variables de crecimiento que se evaluaron en fresco en plántulas en comparación con la biomasa (peso seco), se debió a la diferencia del grado de expansión celular, la cual puede llevarse a cabo en dos o tres dimensiones o por elongación a una dimensión (Carpita, Maureen y McCann, 2015), que tuvieron las células de los tejidos del tallo y de la hoja dependiendo del grado de la relación fuente-demanda que ejercieron los diferentes tipos de luz evaluados en ambos tejidos.

Al eliminar el agua intercelular, la materia seca que permanece en la planta, consiste en más del 90% como celulosa, almidón, lípidos y proteínas, la cual está directamente relacionada con la síntesis de compuestos orgánicos a través de la fotosíntesis (Engels *et al.*, 2012), lo que demuestra, que se generó una modificación en el volumen intercelular de los tejidos antes mencionados y provocó una redistribución de la biomasa entre estos dos tejidos para que al final se tuviera una ganancia idéntica de biomasa de la parte aérea de las plantas entre tratamientos.

Cuadro 6. Variables de crecimiento evaluadas en plántulas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

Var	Tratamientos					
	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
AP	7.05±0.29c ^x	9.94±0.34b	6.81±0.15cd	6.48±0.15cd	5.97±0.21d	13.55±0.30a
DE	0.70±0.04c	1.10±0.04b	0.70±0.02c	0.65±0.02c	0.59±0.02c	1.45±0.04a
DT	0.24±0.01c	0.29±0.01a	0.27±0.01ab	0.29±0.01ab	0.28±0.01ab	0.27±0.00b
NH	10.4±0.37a	9.25±0.25b	9.80±0.21ab	10.1±0.23ab	10.15±0.23ab	9.45±0.23ab
AF	85.05±4.59a	68.78±3.11b	58.29±2.45bc	50.16±1.48c	61.33±1.54bc	60.24±2.74bc
IAF	5.15±0.28a	4.17±0.19b	3.54±0.15bc	3.04±0.09c	3.72±0.09bc	3.64±0.17bc
AFE	566.50±15.49a	452.71±18.51b	376.14±19.00cd	325.70±12.40d	415.48±16.93bc	449.51±10.16b
FE	86.60±4.28d	153.60±6.09c	239.60±5.34a	189.90±6.20b	149.80±4.07c	165.40±8.34bc
PFT	0.26±0.02c	0.52±0.03b	0.29±0.02c	0.32±0.02c	0.32±0.02c	0.62±0.02a
PFH	1.62±0.08a	1.40±0.07ab	1.34±0.05b	1.23±0.04b	1.45±0.04ab	1.30±0.05b
PFA	1.92±0.09a	1.92±0.08a	1.63±0.05bc	1.56±0.05c	1.78±0.05abc	1.88±0.07a
PST	0.03±0.00d	0.08±0.01ab	0.06±0.01bc	0.06±0.00c	0.05±0.01cd	0.09±0.00a
PSH	0.15±0.01ns	0.16±0.01	0.16±0.01	0.16±0.01	0.15±0.01	0.13±0.01
PSA	0.19±0.01ns	0.23±0.01	0.22±0.01	0.21±0.01	0.20±0.01	0.23±0.01

^xMedias ± DE con igual letra en las filas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). ns= No significativo; Var= Variables; FL= fluorescente (testigo); AP= Altura de planta (cm); DE= Distancia entrenudos (cm); DT= Diámetro de tallo (cm); NH= Número de hojas; AF= Área foliar (cm² planta⁻¹); IAF= Índice de área foliar; AFE= Área foliar específica (cm² g⁻¹); FE= Frecuencia estomática (número de estomas mm⁻²); PFT= Peso fresco de tallo (g planta⁻¹); PFH= Peso fresco de hoja (g planta⁻¹); PFA= Peso fresco de la parte aérea (g planta⁻¹); PST= Peso seco de tallo (g planta⁻¹); PSH= Peso seco de hoja (g planta⁻¹); PSA= Peso seco de la parte aérea (g planta⁻¹).

4.5.2 Concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja

La mayor concentración de clorofila a se encontró en las plantas que recibieron luz fluorescente, sin embargo, a pesar de que la mayoría de los tratamientos con luz LED no hubo efectos significativos entre éstos, las plantas que recibieron 57.1 % de luz azul obtuvieron la menor concentración de clorofila a (Cuadro 7). Los resultados de la concentración de clorofila a presentaron una tendencia opuesta en comparación con lo obtenido por Liu *et al.* (2018) en plántula de tomate, ya que los máximos valores los obtuvieron con luz LED azul y rojo A25 %:R75 %, A40 %:R60 %, A50 %:R50 % y la menor concentración con el tratamiento monocromático A100 %:R0 %.

La clorofila b, total, proporción a/b y los carotenoides no tuvieron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 7).

Metera *et al.* (2016) encontraron en plántula de tomate resultados similares, en relación a la concentración de clorofila b, en donde todos los tratamientos que ellos evaluaron con diferentes proporciones de luz azul y roja (A0 %:R100 %, A30 %:R70 % y A100 %:R0 %) los resultados fueron estadísticamente iguales entre éstos.

Por otra parte, los resultados obtenidos de clorofila total en chile habanero son opuestos a los obtenidos en plántula de tomate ‘Komeett’ y ‘Beaufort’ (Hernández *et al.*, 2016), en plántula de tomate ‘Qianxi’ (Liu *et al.*, 2018), en plántula de pepino ‘Hoffmann’s Giganta’ (Hogewoning, Trouwborst, Maljaars, Poorter, van Ieperen y Harbinson, 2010), plántula de pepino ‘Cumlaude’ (Hernández y Kubota, 2016), en colza etapa de roseta ‘Zhongshuang 11’ (Shengxin, Chunxia, Xuyang, Song, Xuelei, Xiaoying, ... y Rongzhan, 2016) y en plántula de algodón ‘Sumian 22’ (Li, Tang y Xu, 2017), ya que los anteriores autores si encontraron diferencias estadísticamente significativas.

La relación clorofila a/b tuvo una tendencia similar en relación a la investigación de Shengxin *et al.*, (2016) en plántulas de colza, en donde todos los tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja que ellos evaluaron fueron iguales excepto en el tratamiento A0 %:R100 % que fue menor.

Los resultados de concentración de carotenoides que obtuvieron Verma, Gantait, Jeong y Hwang (2018) en plantas de *D. digitalis purpurea* difieren completamente, ya que la concentración de carotenoides disminuyó conforme la proporción de luz azul se redujo.

El comportamiento que tuvo la concentración de clorofila a se debió a que en el testigo al tener la mitad de la luz integral diaria (LDI) 6.4 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) respecto a los tratamientos con luz LED evaluados, estuvieron en un intervalo de 13.0 y 13.2 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), lo que generó una mayor concentración de clorofila a respecto al resto de tratamientos, debido a que al tener una menor intensidad de luz, indujo que se sintetizara mayor cantidad de clorofila a para hacer más eficiente la captura y el uso de la luz, lo cual es un mecanismo común en plantas adaptadas a baja intensidad de luz (Qiansheng *et al.*, 2014).

En las plantas que recibieron 57.1 % de luz azul, y que tuvieron una proporción cercana a 1:1 (luz azul:luz roja), presentaron la menor concentración de clorofila a; posiblemente a un efecto negativo por parte de la luz azul y roja en comparación con las plantas que recibieron luz azul y roja monocromática.

El comportamiento del resto de los pigmentos fotosintéticos, ya que no presentaron diferencias estadísticas, se puede atribuir a que la planta misma posee un alto grado de plasticidad en su proceso de aclimatación bajo las diferentes composiciones espectrales de luz a las cuales se puso a experimentación (Berkovich *et al.*, 2017; Pocock, 2015), lo cual es consistente con los resultados de las diversas investigaciones que se mencionaron previamente, en donde se obtuvieron diferentes resultados con tratamientos con proporciones de luz LED azul y roja similares.

Cuadro 7. Pigmentos fotosintéticos en hojas de plántulas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

Var	Tratamientos					
	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
Clorofila a	1.12±0.05a ^x	0.97±0.04ab	1.04±0.06ab	0.92±0.04b	1.07±0.06ab	0.95±0.03ab
Clorofila b	0.45±0.10ns	0.41±0.01	0.45±0.09	0.39±0.02	0.43±0.10	0.40±0.02
Clorofila total	1.57±0.07ns	1.38±0.05	1.49±0.08	1.31±0.06	1.50±0.09	1.35±0.05
Clorofila a/b	1.95±0.21ns	2.36±0.05	2.09±0.16	2.34±0.03	2.24±0.18	2.42±0.05
Carotenoides	4.20±0.17ns	3.80±0.12	4.10±0.18	3.70±0.18	4.20±0.23	3.70±0.13

^xMedias ± DE con letra igual en las filas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). ns= No significativo; Var= Variables; FL= fluorescente (testigo); Clorofila a= Clorofila a (mg g⁻¹ de peso fresco); Clorofila b= Clorofila b (mg g⁻¹ de peso fresco); Clorofila total= Clorofila total (mg g⁻¹ de peso fresco); Clorofila a/b= Clorofila a/b; Carotenoides= Carotenoides (mg g⁻¹ de peso fresco); Fenoles totales= Fenoles totales (mg equivalentes de ácido gálico 100 g de peso fresco).

4.6 Conclusiones

La luz fluorescente indujo en las plantas la mayor área foliar, índice de área foliar, peso fresco de hoja, peso fresco de la parte aérea y se obtuvo el menor grosor de hoja.

La luz azul al 100% promovió el desarrollo del tallo, a través de una mayor altura de planta, distancia de entrenudos, peso fresco de tallo y peso seco de tallo.

El testigo con luz fluorescente incrementó la concentración de clorofila a en hojas respecto a las plantas que recibieron luz LED. Para el resto de los pigmentos fotosintéticos evaluados, los tratamientos no tuvieron efecto.

Las mejores plantas con parámetros de calidad para trasplante fueron las del tratamiento que recibieron 100 % de luz azul.

4.7 Literatura citada

- Agarwal, A., Gupta, S. D., Barman, M., & Mitra, A. (2018). Photosynthetic apparatus plays a central role in photosensitive physiological acclimations affecting spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth in response to blue and red photon flux ratios. *Environmental and Experimental Botany*, 156, 170-182, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.09.009>
- Amanullah (2015). Specific leaf area and specific leaf weight in small grain crops wheat, rye, barley, and oats differ at various growth stages and NPK source. *Journal of Plant Nutrition*, 38, 1694-1708, <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1017051>
- AOAC Association of Official Analytical Chemistry (1980). Official methods of analysis (12th ed.). U.S.: AOAC International.
- Berkovich, Y. A., Konovalova, I. O., Smolyanina, S. O., Erokhin, A. N., Avercheva, O. V., Bassarskaya, E. M., ... & Tarakanov, I. G. (2017) LED crop illumination inside space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*, 6, 11–24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>
- Bojórquez-Quintal, E., Velarde-Buendía, A., Ku-González, A., Carillo-Pech, M., Ortega-Camacho, D., Echevarría-Machado, I., ... & Martínez-Estévez, M. (2014). Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jacq.): proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation. *Frontiers in Plant Science*, 5, 605, <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2014.00605>
- Carpita, N. C., Maureen, J. R., & McCann, C. (2015). The Cell Wall. In B. B. Buchanan, W. Gruissem & R. L. Jones (Eds.), *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. 2 ed. (pp: 45-110). West Sussex, UK: Wiley Blackwell.
- Castillo-Aguilar, C. de la C., Quej-Ch, I. V., Coh-Méndez, D., Carrillo-Ávila, E., & Monsalvo-Espinosa, A. (2015). Producción de planta de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agro-Productividad*, 8(4), 73-78.
- Centro de Investigación Científica de Yucatán (2016). Ficha informativa unidad productora de semillas de chile habanero. Consultada en <https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/quienes-somos/2016/Ficha-UPS-Habanero.pdf>.
- Cosgrove, D. J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6(11), 850-861, <https://doi.org/10.1038/nrm1746>

- Demotes-Mainard, S., Personal, T., Corotb, A., Bertheloot, J., Gourrierecb, J. L., Pelleschi-Travierb, S., ... & Sakr, S. (2016). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 4–21, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>
- Engels, C., Kirkby, E., & White, P. (2012). Mineral Nutrition, Yield and Source–Sink Relationships. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (pp: 85-133). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00005-4>
- Hasan, M., Bashir, T., Ghosh, R., Lee, S. K., & Bae, H. (2017). An overview of LEDs' effects on the production of bioactive compounds and crop quality. *Molecules*, 22(9), 1420, <https://dx.doi.org/10.3390/molecules22091420>
- Heo, J. W., Kang, D. H., Bang, H. S., Hong, S. G., Chun, C. H., & Kang, K. K. (2012). Early growth, pigmentation, protein content, and phenylalanine ammonia-lyase activity of red curled lettuces grown under different lighting conditions. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 30(1), 6-12, <https://dx.doi.org/10.7235/hort.2012.11118>
- Hernández, R., & Kubota, C. (2016). Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 66-74, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001>
- Hernández, R., Eguchib, T., Devecic, M., & 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.005>
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. California. Agricultural Experiment Station. Circular 347. 32 p.
- Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3107-3117, <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq132>
- Hong, Y., Huang, H., & Dai, S. (2015). An *in vivo* study of the best light emitting diode (LED) systems for cut chrysanthemums. *Open Life Sciences*, 10, 310-321, <https://doi.org/10.1515/biol-2015-0031>

- Huché-Thélier, L., Crespel, L., Gourrierc, J. L., Morel, P., Sakr, S., & Leduc, N. (2016). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 22–38, <https://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009>
- Katagiri, F., Canelon-Suarez, D., Griffin, K., Petersen, J., Meyer, R. K., & Siegle, M. (2015). Design and construction of an inexpensive homemade plant growth chamber. *PLoS ONE*, 10(5), e0126826, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126826>
- Kim, H. M., & Hwang, S. J. (2019). The growth and development of 'Mini Chal' tomato plug seedlings grown under monochromatic or combined red and blue light-emitting diode. *Horticultural Science and Technology*, 37(2), 190-205, <https://doi.org/10.12972/kjhst.20190019>
- Kozai, T., Shibuya T., He, D., Zobayed, S., & Chun, C. (2016). Transplant production in closed system. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 237-269). San Diego, USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00019-6>
- Kozai, T., & Niu, G. (2016). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban áreas. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 115-128). San Diego, USA: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00002-0>
- Kubota, C. (2016) Growth, development, transpiration and translocation as affected by abiotic environmental factors. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 151-164). San Diego, USA: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00010-X>
- Li, H., Tang, C., & Xu, Z. (2017). Effects of different light quality on growth, photosynthetic characteristic and chloroplast ultrastructure of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 29(2), 104-113, <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-10-1387>
- Lim, T. K. (2013). *Capsicum chinense*. In T. K. Lim (ed.), *Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 6, Fruits*. (pp: 205-212). Dordrecht, Neederland: Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_30
- Liu, X. Y., Jiao, X. L., Chang, T. T., Guo, S. R., & Xu, Z. G. (2018). Photosynthesis and leaf development of cherry tomato seedlings under

- different LED-based blue and red photon flux ratios. *Photosynthetica*, 56, 1212-1217, <https://dx.doi.org/10.1007/s11099-018-0814-8>
- Metera, A., Wtulich, J., Gajc-Wolska, J., Niedzińska, M., Bujalski, D., & Kowalczyk, K. (2016). Influence of controlled light condition on developmental parameters of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum*). *Acta Horticulturae*, 1142, 361-368, <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1142.55>
- Pocock, T. (2015). Light-emitting diodes and the modulation of specialty crops: light sensing and signaling networks in plants. *HortScience*, 50(9), 1281-1284, <https://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI.50.9.1281>
- Poiré, R., Wiese-Klinkenberg, A., Parent, B., Mielewczik, M., Schurr, U., Tardieu, F., & Walter, A. (2010). Diel time-courses of leaf growth in monocot and dicot species: endogenous rhythms and temperature effect. *Journal of Experimental Botany*, 61, 1751-1759, <https://doi.org/10.1093/jxb/erq049>
- Qiansheng, L., Deng, M., Xiong, Y., Coombes, A., & Zhao, W. (2014). Morphological and photosynthetic response to high and low irradiance of *Aeschynanthus longicaulis*. *The Scientific World Journal*, 2014, 347461, 1-8, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/347461>
- Ruiz-Lau, N., Medina, F., & Martínez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, Julio-Septiembre, 70-77.
- SAS Institute (2002) SAS System for Windows Computer Program. Software Version 9.0. Cary, North Carolina, USA.
- Shengxin, C., Chunxia, L., Xuyang, Y., Song, C., Xuele, J., Xiaoying, L., ... & Rongzhan, G. (2016). Morphological, photosynthetic, and physiological responses of rapeseed leaf to different combinations of red and blue lights at the rosette stage. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1144, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01144>
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., & Duchovskis, P. (2012). LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chemistry*, 134(3), 1494-1499, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.061>
- Stanton, K. M., Weeks, S. S., Dana, M. N., & Mickelbart, M. V. (2010). Light exposure and shade effects on growth, flowering, and leaf morphology of *Spiraea alba* Du Roi and *Spiraea tomentosa* L. *HortScience*, 45(12), 1912-1916, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1912>

- Tsukaya, H. (2005) Leaf shape: genetic controls and environmental factors. *The International Journal of Developmental Biology*, 49, 547-555, <https://doi.org/10.1387/ijdb.041921ht>
- Trujillo, J. J. G. (2018). Caracterización de los recursos genéticos de *Capsicum chinense* Jacq. en la península de Yucatán. En T. A. González (Ed.), *Mejoramiento genético del chile habanero de la Península de Yucatán*. (pp 37-43). Mérida, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Verma, S. K., Gantait, S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2018). Enhanced growth and cardenolides production in *Digitalis purpurea* L. under the influence of different LED exposures in the plant factory. *Nature Scientific Reports*, 8, 18009, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36113-9>
- Walter, A., Silk, W. K., & Schurr, U. (2009). Environmental effects on spatial and temporal patterns of leaf and root growth. *Annual Review of Plant Biology*, 60, 279–304, <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092819>
- Wollanger, H. M., & Runkle, E. S. (2015). Growth and acclimation of impatiens, salvia, petunia, and tomato seedlings to blue and red light. *HortScience*, 50(4), 522-529, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.4.522>
- Yamori, W. (2016). Photosynthesis and respiration. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 141-149). San Diego, USA: Academic Press. [https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.0009-3\(LAI\)](https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.0009-3(LAI))

**5. EFECTO DE DIFERENTES PROPORCIONES DE LUZ LED
AZUL:ROJA EN PLANTAS DE CHILE HABANERO (*Capsicum
chinense* Jacq.)**

EFFECTO DE DIFERENTES PROPORCIONES DE LUZ LED AZUL:ROJA EN PLANTAS DE CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq.)

5.1 Resumen

El chile habanero es el cultivo hortícola de mayor importancia económica en la península de Yucatán en México. Es ampliamente utilizado en la industria alimentaria, farmacéutica y militar. Este cultivo es idóneo para desarrollarse bajo ambiente controlado, ya que el rendimiento puede aumentar sustancialmente y puede adaptarse para la producción durante todo el año libre de plagas y enfermedades. Los objetivos del estudio fueron evaluar el efecto de diferentes proporciones de luz LED azul:roja en crecimiento, concentración en hoja de pigmentos fotosintéticos, compuestos fenólicos, concentración de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, B y Cu), así como determinar si los tratamientos influyeron en la germinación de polen, grosor de hoja, frecuencia estomática, y en la anatomía de ovario y antera de chile habanero. Las plantas se obtuvieron a partir de plántulas 'Mayan Ba'alché' producidas en las mismas condiciones de tratamientos con luz; éstas se establecieron en una cámara de crecimiento bajo cinco diferentes proporciones de luz LED azul (A) y roja (R): A0:R100, A34.5:R65.5, A57.1:R42.9, A76.0:R24, A100:R0 y un testigo con luz fluorescente con una intensidad de $242.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 15 h d^{-1} . Los resultados mostraron que la luz azul indujo crecimiento vegetativo, incrementó la concentración de compuestos fenólicos en hoja, pero este tuvo un efecto negativo en rendimiento de frutos; en cambio, la luz roja incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja y el rendimiento de frutos. La mayor y/o menor concentración de macronutrientes se registró con las proporciones A100:R0 y A0:R100, mientras la mayor concentración de micronutrientes se presentó con la proporción A34.5:R65.5 y A100:R0 y la menor con A0:R100. El testigo incrementó la germinación de polen y el grosor de hoja. La anatomía de los óvulos en ovarios y el polen en anteras no presentaron ningún efecto.

Palabras clave: *Capsicum chinense* Jacq., chile habanero, luz LED, ambiente controlado

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Director de Tesis: Dra. Ana María Castillo González

EFFECT OF DIFFERENT RATIOS OF BLUE:RED LED LIGHT ON PLANTS OF HABANERO PEPPER (*Capsicum chinense* Jacq.)

5.2 Abstract

The habanero pepper is the horticultural crop of greatest economic importance in the Yucatan peninsula in México. It is widely used in the food, pharmaceutical and military industries. This crop is suitable for growing under controlled environments as yield may be substantially increased and it can be adapted for pest and disease-free year-round production. The objectives of the study were to evaluate the effect of different blue:red LED light ratios on growth, leaf concentration of photosynthetic pigments, total phenols, macronutrients (N, P, K, Ca, Mg) and micronutrients (Fe, Mn, Zn, B and Cu) concentration, as well as to determine if the treatments have an influence on pollen germination, leaf thickness, stomatal frequency, and on the anatomy of the ovary and anther of habanero pepper. The plants were obtained from 'Mayan Ba'alché' seedlings produced under the same conditions of light treatments; these were established in a growth chamber under five different blue (B) and red (R) LED light ratios: B0:R100, B34.5:R65.5, B57.1:R42.9, B76.0:R24, B100:R0 and a control with fluorescent light with an intensity of $242.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 15 h d^{-1} . The results showed that blue light induced vegetative growth, increased the concentration of total phenols in the leaf, but it had a negative effect on fruit yield; in contrast, red light increased the concentration of photosynthetic pigments in the leaf and fruit yield. The highest and/or lowest concentration of macronutrients was recorded with the B100:R0 and B0:R100 ratios, while the highest accumulation of micronutrients occurred with the B34.5:R65.5 and B100:R0 ratios and the lowest with B0:R100. The control treatment increased pollen germination and leaf thickness. The anatomy of ovules in ovaries and pollen in anthers did not show any effect.

Key words: *Capsicum chinense* Jacq., habanero chili pepper, LED light, controlled environment

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Jorge Enrique Mendoza Paredes
Advisor: Dra. Ana María Castillo González

5.3 Introducción

El chile habanero es una planta anual de 30 a 120 cm de altura, es de tipo arbusto (Lim, 2013) nativa de las tierras bajas de la cuenca amazónica, donde se dispersó en la época prehispánica a la cuenca del Orinoco y en otras regiones de Perú, las Antillas y finalmente arribó a la Península de Yucatán (Trujillo, 2018). Actualmente este es el cultivo hortícola de mayor importancia económica para la península de Yucatán, México (Ruiz-Lau, Medina y Martínez, 2011); desde 2010 cuenta con la denominación de origen en esta región (Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2016). El fruto posee diversas propiedades nutraceuticas y medicinales (Lim, 2013), es usado también en la industria alimentaria, farmacéutica y militar (Ruiz-Lau *et al.*, 2011).

Debido a esto, ha surgido la necesidad de realizar investigación de su cultivo en ambiente controlado con iluminación LED para analizar el comportamiento como una alternativa de producción, ya que con este sistema se elimina la aparición de plagas y enfermedades, por lo tanto, la obtención de un producto orgánico libre de plaguicidas e inocuo a la salud humana. Otra ventaja sería su producción continua, sin estacionalidad de cultivo, por el control de las variables ambientales y de la fuente de luz, lo cual en su conjunto trae un incremento exponencial de la producción (Kozai y Niu, 2016).

Actualmente no existe investigación de esta especie bajo estas condiciones de crecimiento; sin embargo, se han realizado investigaciones por parte de Gangadhar, Mishra, Pandian y Park (2012) en chile picante cv. Cheonyang y Naznin, Lefsrud, Gravel y Azad (2019) en pimiento dulce enano cv. Redstart, en ambas investigaciones existieron diferencias entre los tratamientos de luz LED azul y roja que evaluaron, respecto a las variables del crecimiento como altura de planta, área foliar, peso fresco de la parte aérea, número de frutos por planta y en los pigmentos fotosintéticos en hoja como clorofila a, b, total a/b y carotenoides. Por otro lado, se han realizado investigaciones en producción de algunos frutos como fresa por Choi, Moonb y Kang (2015) bajo tratamientos LED azul y rojo en condiciones controladas y se obtuvieron diferencias en variables de crecimiento, acumulación de pigmentos fotosintéticos, metabolitos

secundarios y rendimiento de frutos entre tratamientos. Piovene, Orsini, Bosi, Sanoubar, Bregola, Dinelli y Gianquinto (2015) evaluaron también producción de frutos de fresa con iluminación LED de espectro completo variando la cantidad de la región rojo y azul y encontraron diferencias en variables de crecimiento, rendimiento y capacidad antioxidante respecto al porcentaje en la región azul y roja de los tratamientos.

Con base en la información anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de luz LED roja y azul en el crecimiento, concentración de pigmentos fotosintéticos, compuestos fenólicos y nutrimentos en hoja; así como determinar si los tratamientos influyen en la viabilidad del polen, grosor de la hoja, frecuencia estomática, anatomía del ovario, antera y hoja en plantas de chile habanero.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Cámara y gabinetes de crecimiento

Se realizó una adaptación de una cámara de crecimiento a partir de un cuarto frío (TORREY®, MEX), con medidas interiores de 2.76 m x 2.76 m x 1.90 m (ancho, largo y altura), las modificaciones internas de la cámara de crecimiento se basaron en el diseño de Katagiri, Canelon-Suarez, Griffin, Petersen, Meyer y Siegle (2015), se reguló la temperatura ambiental y humedad relativa con un equipo de aire acondicionado portátil (LG® modelo LP1017WSR 10200 BTU, KOR) y un deshumidificador (Whirlpool® modelo WAD200 5Q 20L/24 h, USA). En el interior de esta cámara, se diseñaron seis gabinetes de crecimiento a partir de un anaquel metálico de 0.3 m x 0.85 m x 1.85 m (ancho, largo y altura) a los cuales se les añadieron paredes de placas de unicel de 2 cm de grosor forradas con papel aluminio para tener máxima reflexión de la luz en el interior y para aislar los tratamientos uno de otro.

5.4.2 Tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja

Las luminarias que se utilizaron fueron hechas a mano, compuestas por perfiles de aluminio de 5 cm x 85 cm (ancho x largo) en donde se anclaron focos LED azul y rojos (Longniu® modelo GR-DB015 de 4 watts, CHN) y las lámparas

fluorescentes (Osram® modelo Octron/F017 de 17 watts, DEU). Las luminarias fueron colocadas debajo de la parte superior de cada uno de los gabinetes de crecimiento.

Los tratamientos consistieron en un testigo fluorescente (cuatro lámparas) y en los tratamientos A0 %:R100 % (A0) con 24 focos LED rojos, A34.5 %:R65.5 % (A34.5) con 18 focos rojos LED rojos y 6 azules, A57.1 %:R42.9 % (A57.1) con 12 focos rojos LED rojos y 12 azules, A76 %:R24 % (A76) con 6 focos rojos LED rojos y 18 azules, A100 %:R0 % (A100) con 24 focos LED azules. Se utilizaron dos perfiles por tratamiento (12 focos LED por perfil) y el testigo con cuatro perfiles (1 lámpara fluorescente por perfil).

La densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y las propiedades físicas del espectro electromagnético de los tratamientos se midió con un espectralradiómetro (Apogee instruments® modelo SS-110, EUA) donde se tomaron 330 mediciones en el área de cultivo ($66 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 1320 \text{ cm}^2$), que fue la superficie en relación a la parte inferior del gabinete, donde las plantas tuvieron su desarrollo durante el transcurso del experimento, y así verificar que los tratamientos tuvieran la misma densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF). Se realizó un análisis estadístico de las variables físicas de los tratamientos (Cuadro 8) para asegurar que las intensidades de luz entre tratamientos LED fueran iguales y las proporciones de luz azul y roja fueran diferentes; además de verificar el pico de longitud de onda (nm) e intervalo de la luz LED presente en los tratamientos. Se estableció un fotoperiodo para todos los tratamientos de luz de 15 h por día durante 145 días después del trasplante.

5.4.3 Material vegetal

Se utilizaron semillas de chile habanero 'Mayan Ba'alché' del CICY (Centro de Investigación Científica de Yucatán), las cuales previamente se sembraron en un semillero de 200 cavidades, se colocó una semilla por cavidad a una profundidad de 1 cm en una mezcla de turba rubia (Pro mix®, CAN) y perlita (Agrolita®, MXN) en proporción 3:1 v/v, los semilleros se cortaron para tener 80 cavidades (4 filas x 20 columnas) y tener una charola por tratamiento. Una vez sembradas, se colocaron en un laboratorio donde tuvieron luz solar incidente a

través de una ventana durante la duración del día y fueron regadas con agua de la llave (pH 7.1 y CE 0.42 dS m⁻¹). La temperatura ambiental (día 25.8±0.2 °C/noche 22.6±0.1 °C) y la humedad relativa (día 51.5±0.6 %/noche 58.6±0.6 %); estos datos se registraron con un datalogger (Extech instruments® modelo RH10, USA). A los 17 días en estas condiciones, al inicio del desarrollo, las plántulas contaban con dos cotiledones y dos hojas; en este momento las charolas con las plántulas se trasladaron a la cámara de crecimiento, para iniciar los tratamientos con luz (Cuadro 8). En estas nuevas condiciones las plántulas crecieron por 35 días a una temperatura ambiental (°C) promedio (día 28.2±0.1/noche 25.3±0.1) y humedad relativa (%) promedio (día 56.2±0.5/noche 77.1±0.5). El riego se hizo diariamente a cada una de las charolas con 300 mL de la solución de Hoagland modificada a 1/5 de su concentración (Bojórquez-Quintal, Velarde-Buendía, Ku-González, Carillo-Pech, Ortega-Camacho, Echevarría-Machado, ... y Martínez-Estévez, 2014) con pH de 6.8 y CE de 1.35 dS cm⁻¹, donde se abastecieron los macronutrientes de la forma siguiente: 1.2 mM KNO₃, 0.8 mM Ca(NO₃)₂, 0.2 mM KH₂PO₄, 0.2 mM MgSO₄ y los micronutrientes se abastecieron con la mezcla Tradecorp® AZ (0.065g L⁻¹).

Cuadro 8. Propiedades físicas de los tratamientos con diferentes proporciones de luz LED azul y roja en chile habanero cultivado bajo condiciones controladas.

Tratamientos						
	FL	A0	A37.7	A57.7	A74.2	A100
PrA	Testigo	A0 %	A34.5 %	A57.1 %	A76 %	A100 %
PrR	Testigo	R100 %	R65.5 %	R42.9 %	R25.8 %	R0 %
Mar	Osram	Longniu	Longniu	Longniu	Longniu	Longniu
Mod	OctronF017	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB015	GR-DB008
Pot	17	4	4	4	4	3
Dtot	119.1±0.6b ^x	241.5±3.1a	241.4±3.3a	244.4±2.4a	241.4±1.8a	243.8±2.5a
LID	6.4±0.0b	13.0±0.2a	13.0±0.2a	13.2±0.1a	13.0±0.1a	13.2±0.1a
λA	-	-	457±0b	457±0a	457±0b	457±0b
λA	-	-	423±0a	420±0b	417±0c	415±0d
	-	-	506±0d	513±0c	516±0b	519±0a
%DA	-	-	34.5±0.6d	57.1±0.3c	76.0±0.3b	100.0±0.0a
λR	-	636±0b	635±0c	637±0a	636±0b	-
λR	-	594±0d	595±0c	598±0b	601±0a	-
	-	675±0a	670±0b	669±0c	664±0d	-
%DR	-	100.0±0.0a	65.5±0.6b	42.9±0.3c	24.0±0.3d	-

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). FL= fluorescente con un intervalo de 416nm – 715nm (testigo); A= Luz LED azul; R= Luz LED roja; PrA= Proporción azul; PrR= Proporción rojo; Mar= Marca; Mod= Modelo; Pot= Potencia (watts); Dtot= Densidad de flujo de fotones fotosintéticos total de tratamiento ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); LID= Luz integral diaria ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); λA= Pico de longitud de onda (nm) color azul; λA= Pico de longitud de onda (nm) color azul; %DA= Porcentaje de densidad de flujo de fotones fotosintéticos de luz azul (%); λR = Pico de longitud de onda (nm) color rojo; λR= Intervalo de longitud de onda color rojo (nm); %DR= Porcentaje de densidad de flujo de fotones fotosintéticos de luz roja (%).

5.4.4 Trasplante

Una vez que transcurrieron 35 días dentro de la cámara de crecimiento con los tratamientos de luz (Cuadro 8), se obtuvieron plántulas adecuadas para trasplante, se eligieron tres por tratamiento y se trasplantó una por maceta, las cuales conservaron los mismos tratamientos de luz (Cuadro 8) una vez trasplantadas, se mantuvo así por 145 días después del trasplante (ddt). Se ocuparon tres macetas de 5 L por tratamiento con una mezcla de turba:perlita

(3:1), turba rubia (Pro mix®, CAN) y perlita (Agrolita®, MXN) y se regaron diariamente con 1 L de la solución nutritiva de Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950) a 100 % de concentración de macronutrientes con un pH de 5.8 y CE de 1.33 dS cm^{-1} , los micronutrientes se abastecieron con la mezcla Tradecorp® AZ (0.065 g L^{-1}). La temperatura ambiente promedio fue (día $26.7 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ /noche $23.9 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y la humedad relativa promedio (día $66.1 \pm 0.2 \text{ %}$ /noche $82.3 \pm 0.2 \text{ %}$), éstas se registraron cada minuto con el promedio de tres datalogger (Extech instruments® modelo RH10, USA), colocados los cuales se colocaron uno por gabinete a nivel de copa de la planta en los tratamientos A76 %:R24 %, A34.5 %:R65.5 % y testigo. La temperatura promedio de la solución nutritiva se midió con un termómetro infrarrojo (Extech instruments® modelo 42530, USA) y tuvo un valor de $26.2 \pm 1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La concentración promedio CO_2 se midió con un medidor portátil de CO_2 ambiental (Extech instruments® modelo CO250, USA) y tuvo una media de $404 \pm 52 \text{ ppm}$. Durante el crecimiento de la planta se realizaron podas de chupones y ramas para tener una planta con dos tallos, además se realizaron podas de hojas en la parte inferior de la planta con el fin evitar un sombreado excesivo entre éstas. También se realizaron polinizaciones manuales con un pincel para aumentar el porcentaje de amarre de frutos.

5.4.5 Variables de crecimiento de la planta

A los 145 ddt, las plantas se cosecharon y se determinó la altura de planta (cm), el peso fresco de tallo y de hoja (g planta^{-1}), con una balanza de precisión (Ohaus® Scout Pro, USA), el peso fresco de la parte aérea (g planta^{-1}) se estimó con la suma del peso fresco del tallo y de las hojas. El diámetro de tallo (mm) se midió con un vernier digital (Truper®, MEX); el área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) se determinó con un integrador de área foliar LI-3100 (LICOR®, USA) y se calculó el índice de área foliar con base en la fórmula $[\text{área foliar (cm}^2\text{)}/\text{área de cultivo (cm}^2\text{)}]$. La parte aérea de la planta se secó en una estufa de aire forzado (BINDER® modelo FED 115, DEU) por 48 horas a $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y se registró el peso seco de tallo y hoja (g planta^{-1}), ambos por separado, con una balanza de precisión (Ohaus® Golden series, USA), el peso seco la parte aérea (g planta^{-1})

se determinó sumando el peso fresco del tallo y el de las hojas. Los frutos se cosecharon a los 109 y 145 ddt y se contabilizó el total por tratamiento. La frecuencia estomática (número de estomas mm^{-2}) se determinó mediante la aplicación de barniz transparente sobre el envés de la hoja; posteriormente, se despegó la calca que se formó en la hoja y se colocó en un portaobjetos para la contabilización de los estomas con un microscopio (Carl Zeiss® Axiostar, DEU), con aumento de 40 x. En cada una de las variables medidas se utilizaron tres repeticiones por tratamiento, excepto para la frecuencia estomática donde se tuvieron 10 repeticiones.

5.4.6 Concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja

Las concentraciones de clorofila a, b y total (mg g^{-1} de peso fresco), proporción de clorofila a/b y concentración de carotenoides (mg g^{-1} de peso fresco) se determinaron mediante la metodología descrita por la AOAC (1980). Estas variables se determinaron en hojas fuente (de reciente maduración), completamente desarrolladas, recién cortadas y utilizando tres hojas por planta por tratamiento.

5.4.7 Compuestos fenólicos totales en hoja

Se tomaron 2 g de hojas fuente completamente desarrolladas recién cortadas, las cuales se cortaron finamente y se les adicionó 10 mL de MeOH al 80 % (v/v), posteriormente se homogeneizó mediante sonicación por 15 min a temperatura ambiente y se dejó reposar durante 24 h en refrigeración y oscuridad. Pasado este tiempo, se tomó 0.1 mL del extracto metanólico previamente preparado, se agregó 0.1 mL del reactivo Folin-Ciocalteu 0.2 N, 4.5 mL agua destilada y 0.3 mL de Na_2CO_3 2 % (p/v), esta mezcla se incubó a temperatura ambiente y en oscuridad por 2 h. Posteriormente se tomaron lecturas de absorbancia del sobrenadante en un espectrofotómetro Genesys 10s (Thermo Fisher Scientific, USA) a una longitud de onda de 765 nm. La concentración de compuestos fenólicos se calculó a partir de una curva estándar preparada con ácido gálico y se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso fresco ($\text{mg EAG } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$) de acuerdo con el método

de Singleton y Rossi (1965) con algunas modificaciones. Se utilizaron tres repeticiones de cada tratamiento.

5.4.8 Concentración nutrimental en hojas

Se determinaron P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, B y Cu en un espectrofotómetro de Emisión Atómica de Plasma por Inducción Acoplada (ICP-AES) (VARIAN modelo Liberty II, USA); la concentración de N se determinó con el método micro-Kjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999). Se utilizaron para las determinaciones 0.1 g de hojas fuente completamente desarrolladas previamente secas en una estufa de aire forzado (BINDER® modelo FED 115, DEU) por 48 horas a 65 °C. Para la determinación de los elementos se utilizaron tres repeticiones por tratamiento.

5.4.9 Variables anatómicas y germinación de polen

A los 106 ddt, se realizaron cortes anatómicos longitudinales de flores en anthesis y cortes transversales de hojas completamente desarrolladas. Por tratamiento se utilizaron cinco flores y cinco hojas. En el caso de las flores, se eliminaron los pétalos y posteriormente se seccionó el ovario a la mitad de manera longitudinal con un bisturí. Para el caso de las hojas se tomó una sección de 5 x 5 mm por hoja, con ayuda de un bisturí, de la parte media de la hoja que se ubicó entre la vena central y el borde. Tanto para el caso de los ovarios como de hojas se procesaron para realizar preparaciones permanentes, para lo cual las muestras se fijaron en FAA (50% etanol al 96% + 5 ácido acético glacial + 10 % de formaldehído al 37 % + 35.5 agua); posteriormente se procesaron para la deshidratación y transparentación en un histokinette (Leica Jung® modelo 2000, DEU) incluyéndose en parafina (Paraplast McCormick Scientific Leica®, DEU). El grosor de los cortes fue de 10 µm, los cuales se obtuvieron con un micrótomos rotatorio (Leica® modelo 820, DEU), posteriormente, se realizó la tinción y montaje de las preparaciones siguiendo la metodología descrita por Avitia (1996). Las preparaciones se observaron en un microscopio de luz transmitida (Carl Zeiss® Axiostar, DEU) con aumentos de 10X

y 40X para ovario más anteras y de 40X para hoja. El grosor de la hoja se midió usando los micrómetros objeto y de ocular.

Para la viabilidad de polen se usó la técnica modificada de Mercado, Fernández-Muñoz y Quesada (1994), se preparó un medio sólido con 6 g L⁻¹ de agar-agar, 10% de sacarosa, 0.1 mM de ácido bórico y 1 mM de cloruro de calcio para dos cajas Petri. Se recolectaron cinco flores frescas en estado inicial de apertura a antesis a los 135 ddt, excepto el tratamiento A100 %:R0 % que ya no contaba con flores, el polen fresco de las anteras se depositó sobre la superficie del medio de agar. Las cajas Petri se colocaron dentro de sus respectivos tratamientos de luz por dos horas, se observaron en un microscopio (Carl Zeiss® Axiostar, DEU) con un aumento de 40X y se calculó el porcentaje de germinación de polen en cuatro campos por caja Petri.

5.4.10 Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, una repetición estuvo constituida por una plántula. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), a la prueba de comparación de medias de Duncan ($P < 0.05$) para las variables de las plantas y Tukey ($P < 0.05$) para la caracterización de los tratamientos de luz utilizados mediante el programa SAS V9.0 (SAS Institute, 2002).

5.5 Resultados y discusión

5.5.1 Variables de crecimiento de la planta

Las plantas que recibieron luz azul al 100 % mostraron la mayor altura de planta mientras que en el resto de los tratamientos las alturas de las plantas fueron estadísticamente iguales (Cuadro 9). Verma, Gantait, Jeong y Hwang (2018) también encontraron la mayor altura de planta en cultivo de digitales con un proporción de luz LED azul y roja A100 %:R0 %. Este comportamiento se podría explicar debido a que la luz monocromática roja y azul tienen un uso eficiente en la fotosíntesis, debido a que son absorbidas eficientemente sus longitudes de onda por las clorofilas a y b (Blankenship, 2014), lo cual se

cumplió solo en las plantas que recibieron 100 % de luz azul y fueron entre un 33 – 52 % mayor la altura de planta, respecto al resto tratamientos.

El mayor diámetro de tallo se encontró en las plantas que recibieron A57.1 % de luz azul mientras que en el resto de las plantas con tratamientos con luz LED fueron menores y estadísticamente iguales entre ellos, excepto el testigo que fue el que presentó el menor diámetro de tallo (Cuadro 9). De manera similar, Hernández, Eguchib, Devecic y Kubota (2016) obtuvieron el mayor diámetro de tallo con un tratamiento de luz azul y roja A50 %:R50 % en plántulas de tomate. Las variables de área foliar (cm²) e índice de área foliar no tuvieron diferencias estadísticas entre tratamientos (Cuadro 9). Resultados similares en área foliar se obtuvieron en plántula de tomate por Wollanger y Runkle (2015). Por otro lado, Yamori (2016) menciona que el índice de área foliar debe estar entre 3.0 y 4.0 para aprovechar entre un 90 a 100 % la luz incidente, sin embargo, los resultados obtenidos fueron superiores a este intervalo, lo que supone una pérdida de fotosintatos asimilados debido a la existencia de una mayor respiración por causa del sombreado que existió en las hojas inferiores de la planta.

Las plantas que recibieron 57.1 % y 76 % de luz azul presentaron la mayor frecuencia estomática entre los tratamientos evaluados, mientras que las plantas del tratamiento monocromático rojo tuvieron mayor frecuencia estomática en comparación que las del tratamiento monocromático azul (Cuadro 9). Wang, Lu, Tong y Yang (2016) en lechuga, también encontraron que un tratamiento A50 %:R50 % generaron la mayor frecuencia estomática.

Los fitocromos están relacionados con el desarrollo de estomas (Demotes-Mainard, Personal, Corotb, Berthelootb, Gourrierecb, Pelleschi-Travierb, ... y Sakr, 2016; Pocock, 2015), lo cual se confirmó, ya que se observó que las plantas que recibieron solo luz roja tuvieron 1.64 veces mayor frecuencia estomática que las plantas que recibieron 100 % de luz azul, debido a que la luz roja activa a los fitocromos; sin embargo, conforme creció la proporción de luz azul en los tratamientos (A57.1 %:R42.9 % y A76 %:R24 %) (Cuadro 9) hubo un

efecto de sinergismo por parte de la luz azul y generó la mayor frecuencia estomática entre los tratamientos.

Las plantas que recibieron 100 % de luz azul mostraron un mayor peso fresco de tallo que las plantas que no recibieron luz azul, mientras que las plantas que recibieron luz fluorescente y 57.1 % de luz azul obtuvieron los pesos frescos de tallo más bajos (Cuadro 10). El anterior comportamiento de las plantas que recibieron luz fluorescente pudo deberse a una menor intensidad de luz en el testigo, ya que tuvo la mitad de intensidad luminosa en relación con los tratamientos LED (Cuadro 8), mientras que las plantas que recibieron 57.1 % de luz azul tuvieron un efecto negativo, al compararse con los tratamientos monocromáticos azul y rojo.

El peso fresco de hoja, peso fresco de parte aérea, peso seco de tallo, peso seco de hoja y peso seco de parte aérea no tuvieron diferencias estadísticas (Cuadro 10). Lo anterior pudo deberse a las podas de hojas a las cuales fue sometido durante el ciclo de crecimiento. El comportamiento del peso fresco de tallo y altura en plantas que recibieron 0 % y 100 % de luz azul, puede explicarse en base en la cantidad de frutos producidos, ya que las plantas que recibieron 0 % de luz azul produjeron más frutos mientras que las que recibieron 100 % de luz azul no produjo ninguno (Cuadro 10).

Esto indicó que existió una relación fuente-demanda entre los frutos y el crecimiento vegetativo (Engels, Kirkby y White, 2012), la cual se enfocó en el crecimiento vegetativo en las plantas que tuvieron 100 % de luz azul, mientras que las que recibieron 0 % de luz azul se enfocó al desarrollo y crecimiento de los frutos y en menor medida al crecimiento vegetativo, lo que trajo una disminución en la altura de la planta y peso fresco del tallo en las plantas que recibieron 0% de luz azul respecto a las que recibieron el 100 %.

Las plantas que recibieron 34.5 % y 76 % de luz azul tuvieron el mismo comportamiento en relación con la altura de planta y el peso fresco de tallo que las que recibieron 0 % de luz azul, a pesar de que con 34.5 % de luz azul no tuvo frutos y con 76 % de luz azul cuatro frutos (Cuadro 9).

La mayor cantidad de frutos acumulados por planta se presentó en las plantas que recibieron 0% de luz azul (24) en contraste con las que recibieron el 100 % y 34.5 % de luz azul que no obtuvieron ninguno, las plantas que recibieron 57.1 % y A76 % de luz azul tuvieron 5 y 4 frutos respectivamente (Cuadro 9).

Otros autores tuvieron resultados con un comportamiento distinto respecto a los tratamientos de luz. Gangadhar *et al.* (2012) en chile picante cv. Cheonyang obtuvieron el mayor número de frutos por planta con una proporción de luz azul y roja de A50 %:R50 % (3.8), seguido del testigo fluorescente (3.3) y el tratamiento A0 %:R100 % (3.0), el menor número se obtuvo con el tratamiento A100 %:R0 % (2.1).

En el caso de Naznin *et al.* (2019) en pimiento dulce enano cv. Redstart, encontraron el mayor número de frutos por planta en el tratamiento con una proporción de luz azul y roja de A5 %:R95 % (5), seguido de A9 %:R91 % (5) y los menores con los tratamientos A17 %:R83 % (1) y A0 %:R100 % (1).

El rendimiento de frutos se vio afectado desde un inicio debido a que las plantas del testigo tuvieron una luz integral diaria (LID) de $6.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de fotones, lo cual fue la mitad de lo que recibió en relación con los tratamientos con luz LED que fueron de 13.0 a $13.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de fotones (Cuadro 8). Además, fue 82 % menos de lo necesario para el testigo y 63 % para los tratamientos LED en comparación con la LID que requiere una planta de tomate en etapa de producción que es de $35 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de fotones (Kubota, 2016).

Lo anterior pudo generar una baja tasa en la fotosíntesis y provocó que existieran en la planta pocos fotosintatos para llevar a cabo un adecuado amarre de frutos. A pesar de la baja LID, en las plantas que recibieron 0 % de luz azul existió mayor cantidad de frutos, lo cual pudo ser a una posible acción por parte de los fitocromos en el amarre de frutos, debido a que estos están involucrados en la regulación de la floración (Berkovich, Konovalova, Smolyanina, Erokhin, Avercheva, Bassarskaya, ... y Tarakanov, 2017; Demotes-Mainard *et al.*, 2016), por consiguiente, pudieran tener un papel importante en el amarre de frutos.

La relación fuente-demanda que existió entre los frutos y el crecimiento vegetativo (Engels *et al.*, 2012) en las plantas que recibieron 0 % de luz azul, la demanda fue en la producción de frutos, mientras que en las plantas que recibieron 100 % de luz azul la demanda se concentró en el crecimiento vegetativo, lo que generó la diferencia de número de frutos. Mientras, que las plantas que recibieron ambos tipos de luz azul y roja al mismo, se observó un efecto negativo por parte de la luz azul sobre la producción de frutos en comparación a las plantas que recibieron 0 % de luz azul.

Cuadro 9. Variables de crecimiento en chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

Var	Tratamientos					
	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
AP	85.50±10.28b ^x	102.90±35.52b	94.63±11.66b	97.37±17.41b	109.70±17.97b	176.77±4.57a
GT	8.03±0.28b	10.91±1.71ab	11.30±1.40ab	11.95±0.73a	9.05±0.85ab	9.80±0.33ab
AF	2008.00±714.21ns	1991.00±1592.33	2703.00±1037.32	2661.00±828.07	2222.00±1220.52	1989.00±565.11
IAF	4.56±1.62ns	4.56±3.62	6.16±2.36	6.06±1.88	5.03±2.77	4.53±1.28
FE	127.00±5.12b	144.70±7.32ab	128.30±6.30b	154.00±11.57a	159.30±7.14a	88.30±6.76c
NF	0	24	0	5	4	0

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Duncan, $P \leq 0.05$). ns= No significativo; Var= Variables; FL= fluorescente (testigo); AP= Altura de planta (cm); GT= Grosor de tallo (mm); AF= Área foliar (cm² planta⁻¹); IAF= Índice de área foliar; FE= Frecuencia estomática (número estomas mm⁻²); NF= Número de frutos por tratamiento.

Cuadro 10. Pesos fresco y seco de plantas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

Tratamientos						
Var	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
PFT	47.00±12.45b ^x	74.73±48.50ab	81.27±26.48ab	61.03±9.80b	80.00±48.66ab	182.63±45.76a
PFH	34.27±4.64ns	36.50±11.11	49.90±7.47	56.23±7.41	44.83±10.10	44.97±6.74
PFA	81.27±23.82ns	111.23±76.79	131.17±45.77	117.27±14.82	124.83±74.08	227.60±62.48
PST	6.49±2.36ns	13.68±9.50	12.52±5.96	12.87±3.95	12.41±8.82	22.43±6.67
PSH	3.31±1.55ns	4.17±3.66	5.04±2.58	5.78±2.30	5.62±3.76	5.65±2.51
PSA	9.80±1.51ns	17.85±5.10	17.55±3.31	18.65±2.38	18.03±4.86	28.07±3.52

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Duncan, $P \leq 0.05$). ns= No significativo; Var= Variables; FL= fluorescente (testigo); PFT= Peso fresco de tallo (g planta⁻¹); PFH= Peso fresco de hoja (g planta⁻¹); PFA= Peso fresco de la parte aérea (g planta⁻¹); PST= Peso seco de tallo (g planta⁻¹); PSH= Peso seco de hoja (g planta⁻¹); PSA= Peso seco de la parte aérea (g planta⁻¹).

5.5.2 Concentración de pigmentos fotosintéticos y compuestos fenólicos en hoja

De manera general se observó una tendencia en la concentración de clorofila a, b, total y carotenoides, en donde la luz roja monocromática favoreció su concentración, mientras que la luz azul tuvo un efecto de disminución de concentración en estas variable y además, la relación clorofila a/b tuvo su mayor valor cuando las plantas recibieron una proporción de luz azul de 57.1 % y 100 % (Cuadro 11).

Hogewoning, Trouwborst, Maljaars, Poorter, van Ieperen y Harbinson (2010) obtuvieron en plántulas de pepino, la mayor relación clorofila a/b en hoja en tratamientos similares de luz azul y roja LED con A50 %:R50 % y A100 %:R0 %.

La concentración de carotenoides en hojas fue mayor en plantas que recibieron 0 % de luz azul, mientras que la menor concentración se registró en plantas que tuvieron 34.5 %, 76 % y 100 % de luz azul (Cuadro 11).

De manera general, se observó que la luz roja incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja, mientras la luz azul tuvo un efecto negativo en la concentración.

Borowski, Michałek, Rubinowska, Hawrylak-Nowak y Grudziński (2015) encontraron en hojas de plantas de lechuga, la mayor concentración de clorofila a, b y carotenoides en el tratamiento A0 %:R100 %.

El comportamiento que tuvieron los pigmentos fotosintéticos en la hoja, podría explicarse debido a que la luz azul tiende a disminuir la clorofila total, por otro, lado la luz azul monocromática tiende a aumentar la relación clorofila a/b (Huché-Thélier, Crespel, Gourrierc, Morel, Sakr y Leduc, 2016).

Los fitocromos que están asociados a la luz roja regulan las etapas tempranas de biosíntesis de clorofila y carotenoides (Berkovich *et al.*, 2017).

Además, las plantas presentan un alto grado de plasticidad a las condiciones de luz que son expuestas, ya que las que crecen bajo luz LED azul y roja nunca son expuestas a longitudes de onda superiores a 680 nm con lo cual el fotosistema II (680 nm) estará, preferentemente, excitado en relación al

fotosistema I (700 nm) durante todo el ciclo de crecimiento, lo cual no sucede en la naturaleza, pero aun así las plantas crecen y estas poseen mecanismos de aclimatación a largo plazo que aún no se han determinado (Pocock, 2015).

La concentración de compuestos fenólicos en hojas tuvo una tendencia en la cual la concentración aumentó conforme las plantas recibieron mayor porcentaje de luz azul en los tratamientos LED (Cuadro 11).

Agarwal, Gupta, Barman y Mitra (2018) obtuvieron en espinaca resultados similares, la concentración máxima de compuestos fenólicos en hoja la encontraron con un tratamiento A100 %:R0 % y las menores con A0 %:R100 %. Este comportamiento se puede explicar ya que la luz azul tiende a incrementar la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos (Berkovich *et al.*, 2017) debido a que es un mecanismo de tolerancia al estrés foto-oxidativo y puede asumirse que está regulado por la producción de éste a través del fotorreceptor criptocromo, el cual está asociado con la foto activación a la luz azul (400 a 500 nm) y UV-A (320 a 400 nm) (Huché-Thélier *et al.*, 2016).

La presencia de luz LED azul y roja pueden ser responsables del aumento de la producción de metabolitos secundarios de la planta gracias a un incremento en la actividad de la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL) la cual está involucrada en el primer paso de la vía de síntesis de fenilpropanoide (Hasan, Bashir, Ghosh, Lee y Bae, 2017).

La enzima PAL se asocia con la producción de compuestos fenólicos en plantas, la cual es mayormente estimulada bajo la combinación de luz azul y roja (Heo, Kang, Bang, Hong, Chun y Kang, 2012). Sin embargo, el comportamiento de los resultados puede variar debido a que no solo depende del tipo del espectro de luz que inciden en las plantas, si no, también depende de la especie, la variedad y etapa de desarrollo (Samuolienė, Sirtautas, Brazaitytė y Duchovskis, 2012).

Cuadro 11. Pigmentos fotosintéticos y compuestos fenólicos en hojas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

Var	Tratamientos					
	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
Clorofila a	0.90±0.08ab ^x	1.03±0.03a	0.69±0.04bc	0.75±0.06bc	0.65±0.12c	0.65±0.06c
Clorofila b	0.50±0.02a	0.58±0.02a	0.40±0.02b	0.39±0.02b	0.35±0.05b	0.33±0.03b
Clorofila total	1.40±0.10ab	1.61±0.04a	1.09±0.06bc	1.14±0.08bc	1.00±0.17c	0.98±0.08c
Clorofila a/b	1.81±0.09ab	1.77±0.03ab	1.68±0.02b	1.87±0.04a	1.81±0.08ab	1.93±0.03a
Carotenoides	4.20±0.40ab	4.53±0.04a	3.16±0.18c	3.43±0.22bc	2.93±0.47c	2.93±0.24c
CF	29.14±1.97c	39.27±1.14bc	29.86±3.58c	31.23±2.52bc	40.93±3.04b	53.36±4.75a

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Duncan, $P \leq 0.05$). ns= No significativo; Var= Variables; FL= fluorescente (testigo); Clorofila a= Clorofila a (mg g⁻¹ de peso fresco); Clorofila b= Clorofila b (mg g⁻¹ de peso fresco); Clorofila total= Clorofila total (mg g⁻¹ de peso fresco); Clorofila a/b= Clorofila a/b; Carotenoides= Carotenoides (mg g⁻¹ de peso fresco); CF= Compuestos fenólicos (mg equivalentes de ácido gálico 100 g de peso fresco).

5.5.3 Concentración nutrimental en hoja

La concentración de nitrógeno y fósforo en hoja fue mayor en plantas que recibieron luz azul respecto a las que no recibieron (Cuadro 12). Aunque no hubo efectos significativos en la concentración de potasio en hoja entre los tratamientos con luz LED, las plantas que recibieron luz fluorescente resultaron con la mayor concentración (Cuadro 12). La concentración de calcio fue mayor tanto en las plantas que recibieron 0 y 100 % de luz azul, mientras que la menor concentración se halló en las plantas que recibieron luz fluorescente (Cuadro 12). Las plantas que recibieron 0 % de luz azul mostraron la mayor concentración de magnesio en hoja, mientras que las menores concentraciones se presentaron en las plantas que recibieron 57.1 y 100 % de luz azul (Cuadro 12).

La concentración de hierro en hoja no tuvo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro 12). La concentración de manganeso en hoja presentó una tendencia creciente conforme el porcentaje de luz azul disminuyó (Cuadro 12). La mayor concentración de zinc en hoja resultó en las plantas que recibieron 34.5 % de luz azul y la menor con plantas que recibieron 0 % y 76 de luz azul (Cuadro 12). El boro tuvo la mayor concentración en hoja en plantas que recibieron 100 % de luz azul, mientras que la menor concentración se encontró en las plantas que recibieron 57.1 % de luz azul (Cuadro 12). La concentración de cobre en hoja obtuvo su mayor concentración en las plantas que recibieron luz fluorescente y en los tratamientos que recibieron luz azul, mientras que las plantas que no recibieron luz azul se encontró la menor concentración (Cuadro 12).

Los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y los micronutrientes (B, Fe, Cu, Mn, Zn) siguieron una tendencia de comportamiento individual respecto a los tratamientos de luz. Sin embargo, en los primeros se observó que las plantas que recibieron 0 % y 100 % de luz azul presentaron en su mayoría, las mayores y menores concentraciones de nutrientes evaluados, mientras que las plantas que recibieron tratamientos con diferentes proporciones de luz azul y roja al mismo tiempo presentaron concentraciones similares entre tratamientos. Los

micronutrientes tuvieron una tendencia de menor concentración en plantas que recibieron 0 % de luz azul, mientras que la mayor concentración se presentó en plantas que recibieron 34.5 y 100 % de luz azul.

Pennisi, Blasioli, Cellini, Maia, Crepaldi, Braschi, ... y Gianquinto (2019) encontraron en albahaca una tendencia de mayor acumulación de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Fe) con un tratamiento A23 %:R70 %. Por otro lado, Verma *et al.* (2018) encontraron en plantas de *D. purpurea* que con un tratamiento de luz A80 %:R20 % se obtuvo la máxima concentración de nutrientes (P, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Zn, B, Cu). Los resultados de las investigaciones mencionadas anteriormente, que llevaron a cabo Pennisi *et al.* (2019) y Verma *et al.* (2018) difieren en el comportamiento que tuvieron la concentración de macro y micronutrientes en hojas de planta de chile habanero.

La regulación de nutrientes en plantas está asociado a factores como la especie, luz, temperatura, CO₂ ambiental, estrés hídrico, fitohormonas y la presencia de otros nutrientes, debido a un posible mecanismo de optimización de crecimiento al estar en diferentes condiciones de crecimiento (Sakuraba y Yanagisawa, 2017).

La concentración de nitrógeno en tejido está asociado a la absorción y asimilación por parte de la planta. La absorción y asimilación es mediada en *Arabidopsis* a través de los fitocromos (A y B) y los criptocromos, los cuales activan al promotor de transcripción HY5 (LONG HYPOCOTYL 5) en el núcleo celular, que posteriormente se une y activa genes que codifican para proteínas transportadoras de nitrato (*NRT1* y *NRT2*) y de amonio (*AMT1* y *AMT2*) y en la fase de asimilación regula la expresión del gen NITRATO REDUCTASA 2 (*NIA2*) y NITRITO REDUCTASA 1 (*NIR1*) que codifican para las enzimas nitrato reductasa y nitrito reductasa respectivamente (Gangappa y Botto, 2016; Sakuraba y Yanagisawa, 2017).

El primer paso en la asimilación del nitrato es la reducción por la enzima nitrato reductasa (NR) a nitrito, la cual posteriormente es reducida por la enzima nitrito reductasa (NiR) a amonio (Hawkesford, Horst, Kichey, Lambers, Schjoerring, Moller y White, 2012). Se ha confirmado experimentalmente que la asimilación

del nitrato se incrementa con luz azul (Berkovich *et al.*, 2017), con lo cual se incrementa la concentración de nitrógeno en tejido. La asimilación del nitrato se ve aumentada por la luz azul gracias a que se incrementa la actividad de la enzima nitrato reductasa (Sakuraba y Yanagisawa, 2017). Por otra parte, Miao, Chen, Qu, Gao y Hou (2019), mencionan que la luz azul promueve la absorción de nitrato.

Sakuraba, Kanno, Mabuchi, Monda, Iba y Yanagisawa (2018) mencionan la luz roja aumenta la absorción y acumulación de fósforo en *Arabidopsis* debido a que el fitocromo B media el mecanismo regulatorio de absorción y uso de fósforo en la planta, a través de dos vías de señalización y regulación asociadas a la luz roja: vía-fitocromo B-HY5 y vía-fitocromo B-PIFs (PHYTOCHROME INTERACTING FACTOR), los cuales en conjunto inducen la expresión del gen que codifica para proteínas transportadoras de fósforo inorgánico ubicado en raíz *PHT1;1* (INORGANIC PHOSPHATE TRANSPORTER) y el gen *PHL1* (HOMEODOMAIN-LIKE SUPERFAMILY PROTEIN) el cual induce también la expresión del gen *PHT1;1*.

La menor concentración de fósforo en hoja se registró en plantas que recibieron solo luz roja (Cuadro 8), una posibilidad a esto pudo deberse a la alta demanda de nutrimentos y fotosintatos a la cual la planta estaba sometida, dado que las plantas tuvieron una mayor cantidad de frutos respecto al resto de tratamientos. García-Caparrós, Almansa, Chica y Lao (2019) mencionan que la concentración de potasio en plántulas de *Arabidopsis* se incrementó en condiciones de crecimiento con luz azul debido a cambios en la actividad de transporte de la membrana en células guarda en estomas. Este comportamiento no se observó en ningún tratamiento con luz LED en plantas de habanero, sin embargo, se puede asumir que otras longitudes de onda pudieran estar involucradas en la absorción de potasio, dado que en las plantas que recibieron luz fluorescente, el cual tiene un espectro completo que abarca desde los 416 – 715 nm (Cuadro 8), se obtuvo las mayores concentraciones.

Al igual que en el caso del potasio, la concentración del flujo calcio en *Arabidopsis*, se ha asociado en condiciones de crecimiento con luz azul

(Pennisi *et al.*, 2019). Este comportamiento tuvo una tendencia similar en el experimento; sin embargo, en las plantas que recibieron solo luz roja, también se obtuvo las mayores concentraciones de calcio al igual que las plantas que recibieron solo luz azul (Cuadro 8).

El mecanismo que modula el contenido de cobre en cloroplastos se asocia con el promotor de transcripción HY5, el cual es activado por la señalización generada de diversos fotorreceptores que son activados por el tipo de luz asociada a estos, posteriormente el promotor HY5 interactúa físicamente con el factor de transcripción SPL7 (SQUAMOSA PROMOTER-BINDING PROTEIN-LIKE 7), los cuales coactivan el gen *MIR408* (microRNA408) que es requerido para regular la expresión de los genes *PETE1* (PLASOCYANIN 1) y *PETE2* (PLASOCYANIN 2), encargados de la síntesis de la proteína plastocianina que contiene cobre en su estructura y se encuentra ubicada en cloroplastos (Gangappa y Botto, 2016; Sakuraba y Yanagisawa, 2017).

Por alusión a lo anterior, la luz azul promovió la síntesis de plastocianina asociada a cobre en comparación con las plantas que solo recibieron luz roja.

Miao *et al.* (2019) mencionan que la luz roja promueve la acumulación de manganeso y zinc. Los resultados obtenidos en el experimento coincidieron para el caso del manganeso, ya que la ausencia de luz roja generó la menor concentración de este elemento en plantas. En el caso del zinc cuando las plantas recibieron solo luz roja y 76 % de luz azul se obtuvo la menor concentración en hoja, lo que contradice lo mencionado por Miao *et al.* (2019).

La concentración de nutrimentos en tejidos de plantas puede ser modificada por factores específicos como la transpiración, apertura estomática, tasa de crecimiento y acumulación de biomasa en diferentes etapas de desarrollo (Pennisi *et al.*, 2019).

Se ha demostrado que la luz azul está involucrada en el proceso de acumulación de nutrimentos en planta a través de mecanismos que incrementan la activación de las bombas de protones y la actividad de canales iónicos en membranas celulares, con lo cual se incrementa la actividad de transporte de iones en las membranas celulares en los tejidos de plantas

(Gerovac, Craver, Boldt y Lopez, 2016). La luz azul tiene la capacidad de regular la apertura estomática, lo cual en junto con la capacidad que tiene de incrementar el transporte de iones a través de la membrana, puede afectar directamente la absorción de nutrientes a través de un aumento en la transpiración (Craver, Boldt y Lopez, 2018).

El anterior planteamiento, se pudo corroborar en la concentración de nitrógeno, fósforo y cobre (Cuadro 8). Actualmente existe poca información sobre cómo ciertas longitudes de onda pueden afectar la dinámica de absorción en tejidos de plantas, lo cual se requiere mayor investigación para descifrar estos mecanismos (Amoozgar, Mohammadi y Sabzalian, 2016).

Cuadro 12. Concentración de macronutrientes (N, K, P, Ca, Mg) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, B, Cu) en hojas de chile habanero cultivado bajo condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja

Elementos	Tratamientos					
	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
N	4.69±0.07ab ^x	4.08±0.10b	4.81±0.42ab	4.83±0.25ab	5.30±0.30a	4.33±0.59ab
K	5.20±0.06a	3.62±0.10b	3.92±0.41b	4.14±0.42b	3.75±0.19b	4.00±0.28b
P	0.47±0.00ab	0.33±0.00c	0.52±0.03a	0.49±0.03ab	0.45±0.00b	0.53±0.02a
Ca	1.12±0.05b	1.41±0.07a	1.34±0.10ab	1.32±0.05ab	1.25±0.08ab	1.40±0.10a
Mg	0.74±0.01bc	1.30±0.07a	0.92±0.12b	0.68±0.02c	0.89±0.06b	0.68±0.03c
Fe	223.33±26.42 ^{ns}	166.25±13.94	255.30±57.70	198.93±8.19	193.44±3.03	244.12±22.94
Mn	96.85±14.41cd	171.20±8.61a	136.51±8.40ab	89.02±7.00cd	118.11±18.96bc	77.98±1.04d
Zn	136.69±7.51ab	119.93±16.43b	188.35±34.12a	147.58±18.61ab	119.88±12.48b	148.14±1.58ab
B	49.56±0.62ab	52.37±1.95ab	51.47±0.96ab	46.47±1.46b	50.54±3.72ab	59.40±5.54a
Cu	11.23±0.62a	5.24±0.18c	9.85±0.93a	10.00±0.61a	7.91±0.37b	10.78±0.59a

^xMedias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Duncan, $P \leq 0.05$). ns= No significativo; FL= fluorescente (testigo); N= Nitrógeno (% de peso seco); K= Potasio (% de peso seco); P= Fósforo (% de peso seco); Ca= Calcio (% de peso seco); Mg= Magnesio (% de peso seco); Fe= Hierro (mg kg⁻¹ de peso seco); Mn= Manganeseo (mg kg⁻¹ de peso seco); Zn= Zinc (mg kg⁻¹ de peso seco); B= Boro (mg kg⁻¹ de peso seco); Cu= Cobre (mg kg⁻¹ de peso seco).

5.5.4 Variables anatómicas y viabilidad de polen

Los cortes anatómicos mostraron la presencia de óvulos bien desarrollados dentro de los ovarios (Figura 12A, B, D, E, G, H, J, K, M, N, P, Q) y la presencia de polen maduro en anteras (Figura 12C, F, I, L, O, R) en todos los tratamientos evaluados. Estos resultados coinciden con lo obtenido por Pérez-Pastrana, Islas-Flores, Bárány, Álvarez-López, Canto-Flick, Canto-Canché, ... y Santana-Buzzy (2018) en cortes anatómicos de flores en antesis para la misma variedad de chile habanero.

El mayor porcentaje de germinación de granos de polen se presentó con el testigo, seguido de A0%:R100%, por otro lado, la menor germinación de polen se halló con los tratamientos A34.5%:R65.5%, A57.1%:R42.9% y A76%:R24% (Cuadro 13). Dhawan y Malik (1981) estudiaron la germinación de polen *in vitro* en *Pinus roxburghii* y encontraron menor germinación (40 %) en un tratamiento con luz fluorescente continua comparada con oscuridad continua (60 %); además, con luz roja se encontró el máximo de germinación (95 %) en comparación con luz azul que tuvo menor porcentaje de germinación (60 %), mientras que la luz rojo lejano contrarrestó los efectos de la luz roja cuando ésta se utilizó en combinación (40 %). Por otro lado, Hoyo, Fujiwara y Hoshino (2014) investigaron la germinación de los granos de polen *in vitro* en *Cyrtanthus mackenii* con cinco picos de longitud de onda 405 nm (violeta), 465 nm (azul), 630 nm (rojo naranja), 660 nm (rojo), 735 nm (rojo lejano) y oscuridad, concluyendo que la luz no inhibió o promovió la germinación de polen y las diferentes longitudes de onda no afectaron la tasa de germinación.

Lo anterior sugiere que los efectos del tipo de luz en la germinación de polen dependen de la especie; además, en la presente investigación la luz azul contrarrestó la germinación cuando se usó en combinación de luz roja en comparación con luz roja monocromática, por otra parte, la luz fluorescente al ser una fuente de luz de espectro completo (416 – 715 nm) (Cuadro 8) promovió el porcentaje de germinación debido a la mayor diversidad de longitudes de onda en comparación con en el resto de los tratamientos LED, a

pesar de que la intensidad de la luz fluorescente fue de la mitad en relación a los tratamientos de luz LED (Cuadro 8).

El mayor grosor de hoja se encontró tanto en el tratamiento A100%:R0% y testigo, mientras que en el resto de tratamientos los resultados no tuvieron un comportamiento con una tendencia clara (Cuadro 13). Las investigaciones de Shengxin, Chunxia, Xuyang, Song, Xuele, Xiaoying, ... y Rongzhan (2016) en colza y Wollanger y Runkle (2015) en salvia coincidieron en que un tratamiento monocromático LED rojo (A0 %:R100 %) generó el mayor grosor de hoja. Lo anterior pudo deberse a que el grosor de la hoja se ve incrementado bajo luz azul respecto a luz roja o verde (Huché-Thélier *et al.*, 2016). Evert y Eichhorn (2012) mencionan que a mayor intensidad de luz las hojas tienden a tener un mayor grosor y viceversa; sin embargo, el tratamiento fluorescente con la mitad de la intensidad luminosa con respecto al resto de tratamientos tuvo el mayor grosor de hoja, igual que el tratamiento monocromático azul A100 %:R0 %.

Cuadro 13. Germinación de polen y grosor de hoja en chile habanero cultivado en condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

V	Tratamientos					
	FL	A0	A34.5	A57.1	A76.0	A100
GP	44.83±5.65a	17.95±4.11b	4.30±1.76c	0.28±0.29c	12.17±6.57bc	---
GH	115.28±5.1a	74.17±3.2c	93.89±3.66b	76.67±2.43c	94.72±2.90b	115.00±6.5a

*Medias ± DE con letras iguales en las filas son estadísticamente iguales (Duncan, $P \leq 0.05$). NS= No significativo; FL= fluorescente (testigo); V= Variables; GP= Germinación de polen (%); GH= Grosor de hoja (μm).

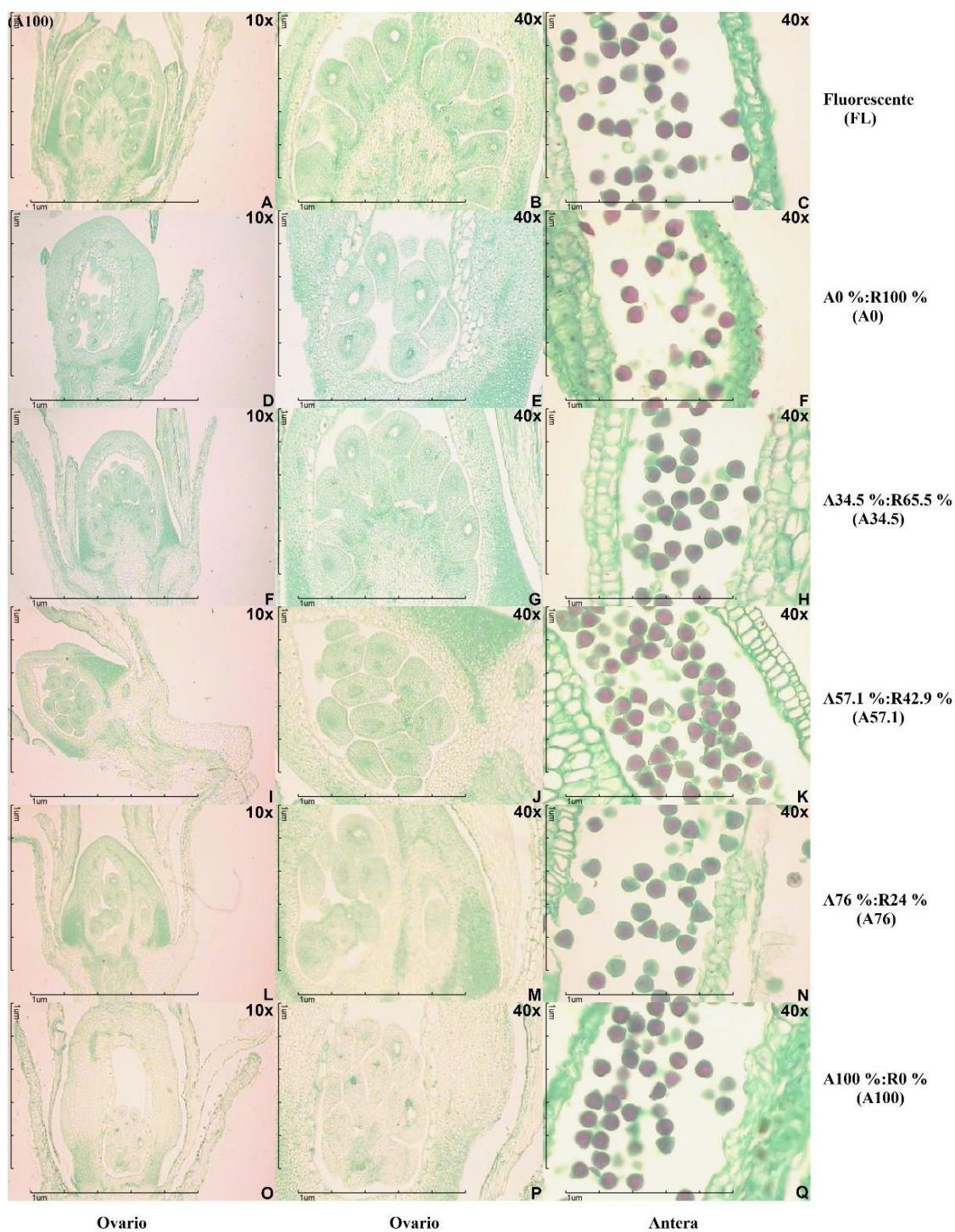


Figura 12. Cortes anatómicos longitudinales de ovario y polen de anteras de flores en chile habanero cultivado en condiciones controladas con diferentes proporciones de luz LED azul y roja.

5.6 Conclusiones

La luz azul indujo en la planta un mayor crecimiento vegetativo, mientras que la luz roja favoreció el amarre y desarrollo de los frutos.

La luz roja monocromática generó en las plantas la mayor cantidad de frutos respecto al resto de los tratamientos, mientras la luz azul generó un menor número de frutos.

Las plantas que recibieron 57.1 % y 76 % de luz azul presentaron la mayor frecuencia estomática.

La luz roja incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos y la luz azul la concentración de los compuestos fenólicos en hoja.

Las plantas que recibieron solo luz roja presentaron la mayor concentración de Ca y Mg, mientras que tuvieron la menor concentración de N y P. Las plantas que recibieron solo luz azul presentaron la mayor concentración de P y Ca, mientras se presentó la menor concentración de Mg. El K no tuvo diferencias entre tratamientos LED.

La mayor concentración de micronutrientes se presentó en plantas que recibieron 34.5 y 100 % de luz azul; mientras que la tendencia de menor concentración se observó en plantas que recibieron 0 % de luz azul.

La luz fluorescente (testigo) incrementó la germinación de los granos de polen y el grosor de hoja, igual que la luz azul en esta última variable. La anatomía de los óvulos en ovarios y el polen en anteras no presentaron ningún efecto de los tratamientos.

5.7 Literatura citada

- Amoozgar, A., Mohammadi, A., & Sabzalian, M. R. (2016). Impact of light-emitting diode irradiation on the photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly. *Photosynthetica*, 55, 85-95, <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0216-8>
- Alcántar, G., & Sandoval, M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.
- Agarwal, A., Gupta, S. D., Barman, M., & Mitra, A. (2018). Photosynthetic apparatus plays a central role in photosensitive physiological acclimations affecting spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth in response to blue and

red photon flux ratios. *Environmental and Experimental Botany*, 156, 170-182, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.09.009>

AOAC Association of Official Analytical Chemistry (1980). Official methods of analysis (12th ed.). U.S.: AOAC International.

Avitia, G. E. 1996. Anatomía precigótica y postcigótica en relación al aborto de óvulos y semillas en *Spondias purpurea* L. Tesis de Doctorado. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Botánica. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Estado de México. 118 p.

Berkovich, Y. A., Konovalova, I. O., Smolyanina, S. O., Erokhin, A. N., Avercheva, O. V., Bassarskaya, E. M., ... & Tarakanov, I. G. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*, 6, 11–24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>

Blankenship, R. E. (2014). *Molecular mechanisms of photosynthesis* (2nd ed.). India: Wiley Blackwell.

Bojórquez-Quintal, E., Velarde-Buendía, A., Ku-González, A., Carillo-Pech, M., Ortega-Camacho, D., Echevarría-Machado, I., ... & Martínez-Estévez, M. (2014). Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jacq.): proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation. *Frontiers in Plant Science*, 5, 605, <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2014.00605>

Borowski, E., Michałek, S., Rubinowska, K., Hawrylak-Nowak, B., & Grudziński, W. (2015). The effects of light quality on photosynthetic parameters and yield of lettuce plants. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 14(5), 177-188.

Choi, H. G., Moonb, B. Y., & Kang, N. J. (2015). Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber. *Scientia Horticulturae*, 189, 22–31, <https://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.022>

Centro de Investigación Científica de Yucatán (2016). Ficha informativa unidad productora de semillas de chile habanero. Consultada en <https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/quienes-somos/2016/Ficha-UPS-Habanero.pdf>.

Craver, J. K., Boldt, J. K., & Lopez, R. G. (2018). Radiation intensity and quality from sole-source light-emitting diodes affect seedling quality and subsequent flowering of long-day bedding plant species. *HortScience*, 53(10), 1407-1415, <https://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI13228-18>

- Dhawan, A. K., & Malik, C. P. (1981). Effect of growth regulators and light on pollen germination and pollen tube growth in *Pinus roxburghii* Sarg. *Annals of Botany*, 47(2), 239-248.
- Demotes-Mainard, S., Personal, T., Corotb, A., Bertheloot, J., Gourrierecb, J. L., Pelleschi-Travierb, S., ... & Sakr, S. (2016). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 4-21, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>
- Engels, C., Kirkby, E., & White, P. (2012). Mineral nutrition, yield and source-sink relationships. In Marschner, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (pp: 85-133). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00005-4>
- Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2012). *Raven biology of plants* (8 ed.). USA: MacMillan.
- Gangadhar, B. H., Mishra, R. K., Pandian, G., & Park, S. W. (2012). Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annuum*) under different light-emitting diode treatments. *HortScience*, 47(12), 1729-1735, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.12.1729>
- Gangappa, S. N. & Botto, J. F. (2016). The multifaceted roles of hy5 in plant growth and development. *Molecular Plant*, 9, 1353-1365, <https://dx.doi.org/10.1016/j.molp.2016.07.002>
- García-Caparrós, P., Almansa, E. M., Chica, R. M., & Lao, M. T. (2019). Effects of artificial light treatments on growth, mineral composition, physiology, and pigment concentration in *Dieffenbachia maculata* "Compacta" plants. *Sustainability*, 11, 2867, <https://dx.doi.org/10.3390/su11102867>
- Gerovac, J. R., Craver, J. K., Boldt, J. K., & Lopez, R. G. (2016). Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of *Brassica* microgreens. *HortScience*, 51(5), 497-503, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Moller, I. S., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In Marschner, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (pp: 135-189). USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Hernández, R., Eguchib, T., Devecic, M., & 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*

- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *California agricultural experiment station*. Circular 347. 32 p.
- Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3107-3117, <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq132>
- Hoyo, Y., Fujiwara, K., & Hoshino, Y. (2014). Effects of different wavelengths of LED light on pollen germination and direction of pollen tube elongation in *Cyrtanthus mackenii*. *Advances in Horticultural Science*, 28(4), 190-194.
- Huché-Thélier, L., Crespel, L., Gourrierc, J. L., Morel, P., Sakr, S., & Leduc, N. (2016). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 22–38, <https://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009>
- Katagiri F., Canelon-Suarez, D., Griffin, K., Petersen, J., Meyer, R. K., & Siegle, M. (2015). Design and construction of an inexpensive homemade plant growth chamber. *PLoS ONE*, 10(5), e0126826, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126826>
- Kozai, T., & Niu, G. (2016). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 115-128). San Diego, USA: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00002-0>
- Kubota, C. (2016). Growth, development, transpiration and translocation as affected by abiotic environmental factors. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 151-164). San Diego, USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00010-X>
- Lim, T. K. (2013). *Capsicum chinense*. In T. K. Lim (ed.), *Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 6, Fruits*. (pp: 205-212). Dordrecht, Neederland: Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_30

- Miao, Y., Chen, Q., Qu, M., Gao, L., & Hou, L. (2019). Blue light alleviates 'red light syndrome' by regulating chloroplast ultrastructure, photosynthetic traits and nutrient accumulation in cucumber. *Scientia Horticulturae*, 257, 108680, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108680>
- Mercado, J. A., Fernández-Muñoz, R. F., & Quesada, M. A. (1994). *In vitro* germination of pepper pollen in liquid medium. *Scientia Horticulturae*, 57, 273-281, [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90110-4)
- Naznin, M. T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Azad, M. O. K. (2019). Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content, and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper in a controlled environment. *Plants*, 8(4), 93, <https://doi.org/10.3390/plants8040093>
- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto G. (2015). Optimal red:blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, 193, 202–208, <https://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.015>
- Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, ... & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 10, 305, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305>
- Pérez-Pastrana, J., Islas-Flores, I., Bárány, I., Álvarez-López, D., Canto-Flick, A., Canto-Canché, B., ... & Santana-Buzzy, N. (2018). Development of the ovule and seed of Habanero chili pepper (*Capsicum chinense* Jacq.): Anatomical characterization and immunocytochemical patterns of pectin methyl-esterification. *Journal of Plant Physiology*, 230, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.005>
- Pocock, T. (2015). Light-emitting diodes and the modulation of specialty crops: light sensing and signaling networks in plants. *HortScience*, 50(9), 1281-1284, <https://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI.50.9.1281>
- Ruiz-Lau, N., Medina, F., & Martínez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, Julio-Septiembre, 70-77.
- Sakuraba, Y., Kanno, S., Mabuchi, A., Monda, K., Iba, K., & Yanagisawa, S. (2018). A phytochrome-B-mediated regulatory mechanism of phosphorus acquisition. *Nature plants*, 4, 1089-1101, <https://dx.doi.org/10.1038/s41477-018-0294-7>
- Sakuraba, Y., & Yanagisawa, S. (2017) Light signalling-induced regulation of nutrient acquisition and utilisation in plants. *Seminars in Cell &*

- SAS Institute (2002). SAS System for Windows Computer Program. Software Version 9.0. Cary, North Carolina, USA.
- Shengxin, C., Chunxia, L., Xuyang, Y., Song, C., Xuele, J., Xiaoying, L., ... & Rongzhan, G. (2016). Morphological, photosynthetic, and physiological responses of rapeseed leaf to different combinations of red and blue lights at the rosette stage. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1144, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01144>
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Society for Enology and Viticulture*, 16, 144-158.
- Trujillo, J. J. G. (2018). Caracterización de los recursos genéticos de *Capsicum chinense* Jacq. en la península de Yucatán. En T. A. González (Ed.), *Mejoramiento genético del chile habanero de la Península de Yucatán*. (pp 37-43). Mérida, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Verma, S. K., Gantait, S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2018). Enhanced growth and cardenolides production in *Digitalis purpurea* L. under the influence of different LED exposures in the plant factory. *Nature Scientific Reports*, 8, 18009, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36113-9>
- Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. (2016). Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*, 7, 250, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00250>
- Wollanger, H. M., & Runkle, E. S. (2015). Growth and acclimation of impatiens, salvia, petunia, and tomato seedlings to blue and red light. *HortScience*, 50(4), 522-529, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.4.522>
- Yamori, W. (2016). Photosynthesis and respiration. In T. Kozai, G. Niu & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. (pp: 141-149). San Diego, USA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.0009-3>(LAI)