

Carlos Eligio
Hernández
Navarrete

Producción de aceite esencial de albahaca
morada (*Ocimum basilicum* L.) en cultivo
suplementado con luz LED.

2024



Universidad Autónoma de QuerétaroFacultad de
Ingeniería

Producción de aceite esencial de albahaca morada (*Ocimum
basilicum* L.) en cultivo suplementado con luz LED.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en

Ciencias (Ingeniería en Biosistemas)

Presenta

Carlos Eligio Hernández Navarrete

Dirigido por

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Querétaro, 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Ingeniería en Biosistemas)

Producción de aceite esencial de albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.) en cultivo suplementado con luz LED.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Ingeniería en Biosistemas)

Presenta

IIA. Carlos Eligio Hernández Navarrete

Dirigido por:

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Co-Director:

Dra. Ma. Cristina Vázquez Hernández

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Presidente

Dra. Ma. Cristina Vázquez Hernández

Secretario (Co-directora)

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez

Vocal

Dra. Rosario Guzmán Cruz

Suplente

M. en C. Benito Parra Pacheco

Suplente

Centro Universitario,
Querétaro, Qro
Diciembre del 2024

Dedicatorias

La presente tesis se la dedico a mi familia que gracias a su apoyo y motivación logre concluir esta etapa de mi vida. A mi padre y a mi madre, que gracias a sus consejos y apoyo logré crecer como persona y mejorar como estudiante, a mis hermanos que siempre creyeron en mí y me brindaron su apoyo para poder concluir este grado de estudios y por último a los doctores que gracias a su guía, apoyo y consejos crecí como persona y estudiante.

Agradecimientos

A mi familia que siempre me impulsa a seguir adelante y no rendirme.

A mis amigos que siempre me apoyaron a lo largo de la maestría.

A los doctores que compartieron un poco de su conocimiento conmigo.

A Raúl, Daphne, Adal, Isabel, Montserrat, Benito, Montserrat, Vanesa y Rosario por todo el apoyo, consejos, ayuda y momentos dentro del posgrado.

A Esmeralda por todo el apoyo que me brindo durante la estancia en el posgrado, por sus consejos, por su amistad y sobre todo por nunca dejarme solo en todo este camino.

A mis asesores por ser mi guía durante el proyecto, así como todos los consejos y apoyo brindado.

Al doctor Humberto por creer en mí y brindarme la confianza para realizar este proyecto y siempre motivarme a seguir y no rendirme y a la doctora Cristina por siempre creer en mí y motivarme a seguir en este camino al igual que siempre motivarme a ser una mejor persona profesional.

A CONAHCYT por el apoyo económico brindado.

Índice General

Índice de tablas	6
Índice de figuras	7
Resumen	8
Abstract	10
1. Introducción	11
1.1 Descripción del problema (oportunidad)	12
1.2 Justificación	12
2. Antecedentes	12
2.1 Revisión de patentes	18
2.2 Monitoreo tecnológico	18
3. Fundamentación teórica	19
3.1 Albahaca	19
3.2 La luz	21
3.3 Fotosíntesis	23
3.4 Fotorreceptores	24
3.5 Fitocromos	24
3.6 Criptocromos	24
3.7 Fototropinas	25
3.8 Familia UVR8 y Zeitlupes	25
3.9 Metabolismo Vegetal	26
3.10 Producción de aceite esencial en plantas	26
3.11 Ciclo Circadiano	26
3.12 Tecnología LED	27
4. Hipótesis y Objetivos	28
4.1 Hipótesis	28
4.2 Objetivo general	28
4.3 Objetivos particulares	29
5. Materiales y Métodos	29
5.1 Ubicación del experimento	29
5.2 Construcción de la lámpara	30

5.2.1 LEDs	31
5.2.2 Fuente de suministro de voltaje	32
5.2.3 Electrónica de potencia	33
5.2.4 Controladora de voltaje	33
5.3 Material biológico	34
5.4 Diseño experimental	34
5.5 Germinación de albahaca	35
5.6 Sistema de Riego	36
5.7 Biometrías de la planta	36
5.8 Determinación de área foliar	37
5.9 Extracción de aceite esencial de albahaca	38
5.10 Cuantificación de clorofila	38
5.11 Capacidad antioxidante (CAO)	39
5.12 Fenoles totales	39
5.13 Contenido de flavonoides totales	40
5.14 Capacidad Antioxidante Enzimática	40
5.14.1 Fenilalanina-amonio liasa	40
5.14.2 Catalasa	40
5.14.3 Superóxido dismutasa	41
5.15 Análisis e interpretación de datos	41
6. Resultados y discusión	41
6.1 Biometrías de las plantas	41
6.2 Mediciones Fitoquímicas	43
6.3 Mediciones Enzimáticas	45
6.4 Producción de aceite esencial	46
7. Conclusión	48
8. Referencias Bibliográficas	49

Índice de tablas

Tabla 1 . Clasificación taxonómica <i>Ocimum Basilicum</i> L. (Albahaca). elaboración propia con información de (Agexport, 2020).	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2 . Especificaciones técnicas de los LED.	31
Tabla 3 . Diseño experimental.	34
Tabla 4 . Biometrías de las plantas correspondientes a la altura, diámetro del tallo, longitud de la raíz, distancia entre nodos, Área foliar.	42
Tabla 5 . Resultado de las mediciones fitoquímicas.	44
Tabla 6 . Resultado de las mediciones enzimáticas.	46

Índice de figuras

Figura 1 . Planta de albahaca morada (<i>Ocimum basilicum L.</i>) variedad red opal. UAQ campus Amazcala. Elaboración propia 2024.	21
Figura 2 . Fenómeno electromagnético (Hernández-Navarrete, Aguirre-Becerra 2024).....	22
Figura 3 . Descripción de los componentes de un LED. Imagen obtenida de https://www.ledtecnologia.com/que-es-un-led/	28
Figura 4 . Ubicación de la UAQ Campus Amazcala. Amazcala, municipio de El Marqués, estado de Querétaro. Elaboración propia con información de Google maps 2024.	30
Figura 5 . Diagrama de la elaboración de la lámpara.....	30
Figura 6 . Diseño de la lámpara LED con 32 LEDs rojo, 17 azules y 7 UV-A. Elaboración propia.	32
Figura 7 . Fuentes de poder.	32
Figura 8 . Convertidor elevador. Imagen tomada de: https://www.conrad.fr/fr/p/convertisseur-cc-cc-pour-circuits-imprimés-mean-well-ldh-45a-350-nbr-de-sorties-1-x-30-1-w-1-pc-s-1292794.html	33
Figura 9 . Reguladoras de voltaje electrónicas. Imagen tomada de: https://naylorlampmechatronics.com/conversores-dc-dc/127-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-8a-300w-xl4016.html	34
Figura 10 . Plántula de albahaca morada (<i>Ocimum basilicum L.</i>) variedad Red Opal. Elaboración propia 2024.	36
Figura 11 . Hojas de albahaca para el análisis de área foliar. Elaboración propia 2024.	37
Figura 12 . Porcentaje de producción de aceite esencial.	47

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 . Fenómeno de la fotosíntesis.....	23
Ecuación 2 . Determinación de clorofilas.....	38

Resumen

La luz es una forma de energía electromagnética que surge en ondas de longitudes variables, que van desde las ondas de radio hasta las de rayos gamma, abarcando el espectro electromagnético, del cual la luz visible tiene longitudes de onda que van desde aproximadamente 380 a 750 nanómetros. El papel de la luz es sumamente esencial, tanto en los fenómenos naturales, como en los procesos biológicos, porque puede influir directamente en las plantas dependiendo de la cantidad, calidad y fotoperiodo. La albahaca es una planta de alto valor comercial, ya que sus elementos la hacen una opción valiosa para los alimentos funcionales. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de diferentes fotoperiodos con dos sistemas de iluminación sobre la producción de aceite esencial en plantas de albahaca morada variedad red opal. Los tratamientos consistieron en 1) una combinación de luz roja (625 nm y 655 nm), luz azul (415 nm y 460 nm) y radiación UV-A (365 nm) mientras que el segundo con luz blanca (fluorescente) en plantas de albahaca morada variedad red opal con el objetivo de incrementar la producción de aceite esencial. Para esta investigación se establecieron 7 tratamientos: TC (tratamiento control) luz natural, T1 con 12 horas de luz LED, T2 con 12 horas de luz blanca, T3 con 14 horas de luz LED, T4 con 16 horas de luz blanca, T5 con 20 horas de luz LED y T6 con 20 horas de luz blanca, todos los tratamientos duraron 50 días. Los resultados mostraron que las plantas en los tratamientos T1 y T2 fueron las que menor altura presentaron, mientras que en diámetro del tallo el T3 fue el que mayor diámetro presentó. La longitud de la raíz y la generación radicular fue menor en los tratamientos de luz artificial en comparación con el control. En el área foliar no hubo diferencia significativa. En los tratamientos de iluminación artificial se observó la inhibición de SOD, pero una mayor presencia de CAT en los tratamientos T2 y T4. En la producción de fenoles y flavonoides se encontró mayor contenido en el TC. En la producción de aceite esencial el que mayor rendimiento se observó fue en T6.

Palabras clave: Albahaca, Luz, LED, Aceite esencial

Abstract

Light is a form of electromagnetic energy that arises in waves of varying lengths, ranging from radio waves to gamma rays, encompassing the electromagnetic spectrum, of which visible light has wavelengths ranging from approximately 380 to 750 nanometers. The role of light is extremely essential in both natural phenomena and biological processes because it can directly influence plants depending on the quantity, quality and photoperiod. Basil is a plant of high commercial value, since its elements make it a valuable option for functional foods. The objective of this research was to determine the effect of different photoperiods with two lighting systems on essential oil production in purple basil plants of the red opal variety. The treatments consisted of 1) a combination of red light (625 nm and 655 nm), blue light (415 nm and 460 nm) and UV-A radiation (365 nm) while the second with white light (fluorescent) in purple basil plants red opal variety with the objective of increasing the production of essential oil. For this research, 7 treatments were established: TC (control treatment) natural light, T1 with 12 hours of LED light, T2 with 12 hours of white light, T3 with 14 hours of LED light, T4 with 16 hours of white light, T5 with 20 hours of LED light and T6 with 20 hours of white light, all treatments lasted 50 days. The results showed that the plants in the T1 and T2 treatments showed the lowest height, while in stem diameter, T3 was the one with the highest diameter. Root length in the artificial light treatments showed a shorter distance as well as less root generation; there was no difference in leaf area. In the artificial light treatments, SOD inhibition was observed, but a greater presence of CAT in treatments T2 and T4. In the production of phenols and flavonoids, a higher content was found in CT. In the production of essential oil, the highest yield was observed in T6.

Keywords: basil, light, LED, essential oil.

1. Introducción

La agricultura protegida es un sistema en el que los productores pueden controlar algunos factores climáticos como la humedad, la temperatura, la luz, entre otros. El objetivo de estos métodos de cultivo es garantizar la calidad de los productos durante todo el año mediante estructuras como invernaderos, malla, sombra, túneles altos y bajos. El cultivo bajo invernadero permite obtener una mayor producción en una menor área, el uso de estas estructuras puede minimizar el impacto de algunos factores como el uso excesivo de agua o el cambio brusco de temperaturas (SENASICA, 2016; Berrios y Rivera 2022).

Las plantas aromáticas y medicinales se han utilizado desde miles de años en la medicina tradicional, en la preparación de alimentos, al igual que en su conservación. El uso de este tipo de plantas en la medicina se remonta a tiempos de la prehistoria, la creciente investigación de estas plantas se debe a sus propiedades medicinales y la implementación de ellas en la aroma-terapia, que en algunas partes del mundo sigue siendo la principal alternativa para aliviar malestares. En la actualidad el mercado de las plantas aromáticas se considera un mercado de nicho o mercado especializado (Juárez-Rosete et al., 2013)

Los principales productos hortícolas cultivados bajo esta tecnología son jitomate (70%), pimiento (16%), pepino (10%), además, productos como flores, chiles, bayas y papaya (FAO, 2016). La albahaca es una de las principales plantas aromáticas de importancia económica, por lo que a nivel mundial se han buscado alternativas para mejorar los índices de rendimiento, calidad y tolerancia a diversos tipos de estrés (Romero-Bastidas et al., 2016).

En el ámbito de la agricultura protegida se han realizado avances en la tecnología para mejorar el sistema de iluminación. El uso de diodos emisores de luz (LED) permite controlar el espectro electromagnético, ajustar la intensidad luminosa, generar una alta intensidad de luz con una baja emisión de calor y, al no estar hecho de electrodos, no se queman como las bombillas tradicionales (PauletteChaux-Terán et al., 2023).

1.1 Descripción del problema (oportunidad)

La albahaca dulce en condiciones normales de cultivo tiene un rendimiento de 360 g de hoja por planta, obteniendo un 0,4% de aceite esencial (Fikadu,2021). La cantidad de aceite esencial es baja en comparación con la biomasa total de la planta, es decir, que no hay un rendimiento óptimo en la producción de aceite esencial. Por lo que, a través de la aplicación de tecnología LED se pretende incrementar significativamente la producción de aceite esencial de esta planta.

1.2 Justificación

La albahaca dulce es la más utilizada en el mundo, debido a su valor económico, popularidad y la creciente de sus derivados. Es utilizada principalmente para producir aceite esencial y como aromatizantes, además es utilizada en la industria alimentaria. Por lo que, un sistema de iluminación controlado es una herramienta relevante para incrementar la producción del aceite esencial en esta planta.

Esta investigación se plantea el objetivo de implementar la tecnología LED como medio para la suplementación de luz roja/azul y radiación ultravioleta tipo A (UV-A) durante el fotoperiodo de albahaca morada (variedad red opal), con el fin de incrementar la producción de aceite esencial.

2. Antecedentes

La luz es un factor natural crucial para el correcto desarrollo de los organismos fotosintéticos. De igual manera activa las respuestas fisiológicas de las plantas, por lo que las condiciones de luz (intensidad, fotoperiodo y calidad) son parte fundamental en el desarrollo, regulación del crecimiento, así como de la acumulación de fitoquímicos, como terpenos, flavonoides y ácidos fenólicos entre otros, que corresponden a los metabolitos secundarios de las plantas, especialmente en las que se cultivan bajo condiciones controladas. Se ha demostrado que la exposición a diferente cantidad y nivel de luz tiene un impacto positivo en el desarrollo de biomasa, así como la inducción de los mecanismos de

defensa contra la radiación ultravioleta (UV) (Santos-Oliveira et al., 2014, Bian et al., 2015, Neo et al., 2022).

La intensidad luminosa es una magnitud que define el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido. El fotoperiodo se puede definir como la influencia que existe entre las variaciones diurnas de luz y los periodos de oscuridad en el desarrollo de las plantas. La calidad de la luz en el área biológica y el área agronómica hace referencia a las longitudes de onda predominantes que la componen (Casierra-Posada & Peña-Olmos (2015).

La luz es de gran relevancia en los cultivos y los ecosistemas en general, debido a que las plantas absorben ciertos rangos de la radiación y transmiten la que no es absorbida a las plantas vecinas. El efecto de la calidad e intensidad lumínica se combina con el componente de sombra en la oferta ambiental y produce un espectro de radiación singular en el entorno de las plantas para realizar la fotosíntesis y generar metabolitos primarios y secundarios (Casierra-Posada & Peña-Olmos 2015).

Las plantas en condiciones naturales se encuentran con diversos factores de estrés, también conocidos como elicitores que potencialmente pueden restringir el desarrollo de las plantas (Safin et al., 2021). Los elicitores son compuestos de origen biológico que activan las defensas de las plantas, estos pueden ser externos o internos. Al aplicarse en pequeñas cantidades pueden activar las defensas y adaptación mediante los metabolitos secundarios. Las plantas se encuentran siempre expuestas a estos factores, por lo que desarrollan defensas para hacer frente a entornos desfavorables para ellas. Los factores de estrés se pueden clasificar en bióticos y abióticos dependiendo de su origen y del efecto que causa en las plantas (González et al., 2020 y Caicedo-López et al., 2021).

Los elicitores bióticos son todos aquellos que son generados por las plantas, por ejemplo, las proteínas, carbohidratos, bacterias, hongos y fitohormonas. Por otra parte, los estímulos físicos se conocidos como elicitores abióticos que afectan a la planta, como la iluminación, el calor, el frío, señales eléctricas de largo alcance,

ondas electromagnéticas, detección de estímulos mecánicos y ondas acústicas, entre otros. Los elicitores activan señales de respuesta para que la planta genere metabolitos secundarios y obtener una respuesta de defensa. Los efectos positivos en el desarrollo de las plantas se pueden obtener mediante la regulación de la calidad de la luz y del tiempo de los factores abióticos o bióticos que generan estrés, también conocido como eustrés (Vázquez-Hernández et al., 2019 y Caicedo-López et al., 2021).

Las plantas poseen un metabolismo primario que está relacionado con la actividad fotosintética para generar biomasa y mantener sus procesos fisiológicos. Por otra parte, el metabolismo secundario engloba aquellos procesos metabólicos que no son considerados esenciales, pero forman parte de la respuesta química a los daños ocasionados por estrés bióticos (bacterias, virus, hongos, herbívoros, nematodos, etc.) y abiótico (altas o bajas temperaturas, sequía, salinidad en suelo, altas o bajas intensidades de luz, entre otras) (Aguirre-Becerra et al., 2021).

Los organismos fotosintéticos responden a la luz mediante distintos fotorreceptores agrupados en cinco categorías como: las fototropinas, fitocromos, criptocromos, zeitlupes y UVR8. La clorofila es un fotorreceptor que se encuentra en los cloroplastos y le dan ese color verde característico de las plantas, tienen dos tipos de clorofila; clorofila A y clorofila B, que no tienen una gran diferencia entre sí, pero permiten captar diferentes longitudes de onda complementándose al absorber la luz roja y azul reflejando la luz verde que es lo que le da su característico color (Bures et al., 2018).

La radiación solar es crucial para el desarrollo y la fotosíntesis de las plantas, pero su efecto puede ser perjudicial si su intensidad o longitud de onda no es la adecuada. Con el fin de prevenir daños, las plantas han evolucionado mecanismos que les permiten percibir y ajustarse a la radiación, adaptándose a diferentes condiciones y evitando la exposición a niveles excesivos o insuficientes de radiación. De esta forma, pueden optimizar su crecimiento y minimizar los riesgos asociados con la radiación inadecuada (Meisel et al., 2011).

En un invernadero la intensidad lumínica es menor al 50% en comparación a cielo abierto, ya que, los materiales utilizados en su construcción, refleja o absorbe esta intensidad. Ciertos materiales empleados para regular el calor y el frío, como las mallas de sombreo y las estructuras que se utilizan para conservar el calor, pueden disminuir la intensidad lumínica entre un 40% y un 80%. Por lo que añadir horas de luz artificial se utiliza cuando la radiación solar es deficiente y limita la productividad. La suplementación de luz en invernadero se utiliza como promotor de la fotosíntesis, agregando luz artificial como fuente de energía y/o para el control foto-morfogénico y otros procesos fisiológicos como la síntesis de metabolitos secundarios (Flores et al., 2020).

Las tendencias en tecnología lumínica apuntan hacia la implementación de tecnología LED (Light Emitting Diode), ya que ofrecen una gran variedad de intensidades lumínicas, esto debido a que se puede obtener un valor específico dentro del espectro de luz para potenciar la optimización de los fotorreceptores que son los encargados de regular la morfología, el crecimiento y la producción de biomasa además de ser una opción viable para la suplementación de fotoperiodo esto debido a su vida funcional, el control que se tiene sobre el espectro de luz y el bajo consumo energético (Hernández and Kubota, 2012, Gómez y Mitchell, 2015, Lin et al., 2021).

Sarfanaz et al., (2023) establecieron un cultivo de orégano y mejorana en condiciones de invernadero a 25 °C, para el tratamiento de luz se utilizaron láminas de LED con 120 LED de 1 W (corriente de entrada de 0,25 A, OSRAM, Alemania) para proporcionar luz azul (460–475 nm), blanca (380–760 nm), roja (650–665 nm) y azul-rojo (70%:30%). Como resultado, obtuvieron que el mayor y menor contenido de aceite fue con luz roja (OV = 2,89) y blanca (OM = 0,94), respectivamente. Sin embargo, las dos especies estudiadas revelaron respuestas diferentes a los tratamientos de luz. En *O. vulgare*, el mayor contenido de aceite se observó con luz roja, mientras que el más bajo se obtuvo con luz azul. En *O. majorana*, el tratamiento azul-rojo provocó un contenido de aceite elevado en comparación con otros.

Xiao-Xue et al., (2013) utilizaron diferentes diodos emisores de luz roja y azul para obtener diferentes intensidades de luz de espectros uniformes e investigaron los efectos en el crecimiento y desarrollo de las hojas de plantas de tomate jóvenes cultivadas bajo 300, 450 y 550 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Se obtuvo una eficiencia energética máxima con 300 μmol y Bajo 300 y 450 μmol , el espesor de las hojas, el parénquima en empalizada y el parénquima esponjoso fueron mayores, y la frecuencia y el área estomáticas por unidad de área foliar también fueron mayores.

Amaki et al., (2011) cultivaron albahaca dulce (*O. Basilicum L.*) con cuatro luces LED monocromáticas azul (470 nm), azul verde (500 nm), verde (525 nm) y roja (660 nm). Las condiciones en las cuales se llevó a cabo el experimento fueron 24 ± 2 °C a 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPF, se obtuvo un resultado favorable debido a que el peso total de la hoja y el área total de la hoja fueron mayores en luz verde monocromática que bajo otras luces, sin embargo, el área foliar de los brotes fue mayor bajo las condiciones de luz azul, de igual manera el incremento de aceite fue bajo esta misma luz.

Mientras que Pennisi et al., (2020), realizaron un cultivo en cinco compartimentos separados, cada uno se aisló utilizando paredes blancas opacas claras y se equipó con ventiladores que reemplazaban constantemente el aire interno. El efecto de la intensidad de la luz en albahaca aumentó los pesos frescos (FW) y seco (DW) hasta 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que un mayor aumento de la intensidad de la luz condujo a un menor aumento de FW y DW.

Carvalho et al., (2016) Establecieron un cultivo de albahaca dulce que se expusieron a diferentes longitudes de onda las cuales fueron luz verde, roja, azul y amarillo ámbar con una tasa de fluencia de 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas oscuridad para asemejar la cantidad de luz que se tiene en condiciones de invernadero. Obtuvieron una mayor altura y un mayor diámetro de tallo de planta en comparación con las cultivadas en invernadero al igual que una mayor reducción de radicales libre y mayor generación de compuestos fenólicos.

Por otra parte, chutimanukul et al., (2022), establecieron un cultivo de albahaca sagrada en el cual la iluminación estuvo compuesta por longitudes que comprenden la luz visible en el rango rojo, azul y verde en la siguiente combinación (T1; 3R:0G:1B), R:G:B = 50:0:50 (T2; 1R:0G:1B), R:G:B = 40:20:40 (T3; 2R:1G:2B) y R:G:B = 25:0:75 (T4; 1R:0G:3B) con una intensidad de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a una altura de 40 cm. Como resultado obtuvieron mayor crecimiento en altura y diámetro del tallo, de igual manera aumento su capacidad antioxidante en las hojas mientras que la composición química del aceite vario dependiendo de la longitud de onda.

Mientras que Sutuliene et al., (2022), establecieron cultivos de albahaca dulce y lechuga, para la iluminación se utilizaron longitudes de onda correspondientes a la luz visible roja y azul en tratamientos de solo luz roja, solo luz azul, combinación de ambas con luz verde y una combinación de luz roja, azul, verde y luz natural con fotoperiodo de 12 horas con diferentes cantidades de luz. Observando que a una mayor cantidad de luz se obtiene una mayor altura y un mayor diámetro del tallo, presentaron de igual manera un incremento en la actividad antioxidante medida por DPPH sin embargo la producción de fenoles se observó en mayor cantidad en las de condiciones óptimas de luz por último la calidad del aceite se ve afectado por la intensidad lumínica.

Con base en los antecedentes mencionados previamente, se planteó el objetivo de evaluar el efecto de la suplementación de horas de luz con una mezcla que incluye longitudes de onda de rojo (625 nm), azul (460 nm) y UV-A (390 nm) en plantas de albahaca morada durante su etapa vegetativa. Se espera que esta mezcla de longitudes de onda pueda aumentar la producción de metabolitos especializados, generar cambios positivos en la acumulación de aceite esencial. Se llevaron a cabo tratamientos completamente artificiales con luz roja/azul y radiación UV-A, así como con luz fluorescente, cada uno con fotoperíodos de 12, 16 y 20 horas.

2.1 Revisión de patentes

Se estableció el diseño de un sistema de iluminación artificial para la producción de orquídeas, se diseñó de acuerdo con las características de la morfología de la misma planta. La estructura de la lámpara está equipada con 254 LEDs rojos con una longitud de onda central de 630 nm y 168 LEDs azules con una longitud de onda central de 460 nm. Cada celda consta de 8 LEDs rojos en forma de elipse y 3 LEDs azules dentro de esa elipse, en 56 unidades iguales 8 están colocadas lateralmente y 7 unidades verticalmente. La lámpara es recomendable colocarla en una figura cuadrada, preferiblemente de 30 cm x 30 cm con la patente en China patent No. WO2011091760A1 (Xuedong et al., 2011).

2.2 Monitoreo tecnológico

La producción de albahaca ha presentado notable mejoras tecnológicas a lo largo de su historia productiva, la tecnología con la que se cuenta actualmente permite que las personas puedan tener su propia producción de esta planta. Es relativamente fácil de cultivar, ya que se adapta muy bien a los sistemas hidropónicos y a la agricultura de precisión con un alto margen de rentabilidad. Por otra parte, la implementación de iluminación artificial está tomando gran relevancia para aumentar la producción de esta planta (Sipos et al.,2021).

Para mantener una producción óptima de albahaca se requieren 1500 horas de sol al año; sin embargo, el sombreado provoca cambio en negativos en el crecimiento y en la generación de aceite esencial. El fotoperíodo también juega un papel importante en la producción de compuestos biológicos de la planta. Debido a la creciente demanda del aceite esencial de albahaca, se buscó una manera de aumentar la producción de este producto, por lo que se comenzaron a diseñar sistemas de iluminación artificial que permitan aumentar la producción de la planta todo el año (Sipos et al.,2021).

Las lámparas de halogenuros metálicos fueron de las primeras lámparas utilizadas para la producción indoor, ya que proporcionaban de suficiente luz y calor a las

plantas; sin embargo, contaban con un problema y era el alto consumo energético y el sobrecalentamiento de la instalación eléctrica (Rangel y Orozco, 2014).

Con el paso del tiempo, se implementaron sistemas de iluminación más especializados, los sistemas de iluminación fluorescentes y posteriormente las luces LED se volvieron populares en la producción de plantas. Estos sistemas ofrecían una mayor eficiencia energética, una vida útil más larga y la capacidad de ajustar el espectro de luz según las necesidades específicas de las plantas (Paradiso *et al.*, 2022).

En un futuro, el entendimiento de la intensidad, el espectro electromagnético y el fotoperíodo permitirá que se generen sistemas de iluminaciones más eficientes que se adapten a las condiciones luminosas diarias, siendo así los sistemas híbridos de luz natural y complementación con luz artificial aquellos más eficientes en términos de producción y gasto energético (Paradiso *et al.*, 2022).

3. Fundamentación teórica

3.1 Albahaca

La albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.) es una planta aromática perteneciente a la familia de las Lamiaceae (Tabla 1), es una planta nativa del sudeste asiático y África central, en donde su cultivo data de más de 5000 años. Actualmente, se comercializa en varias regiones del mundo debido a sus propiedades culinarias y medicinales, la planta presenta diversos polisacáridos como manosa, galactosa, glucosa, fructosa, ramnosa, arabinosa y ácido galacturónico así como pequeñas fracciones de proteína y lípidos, además la albahaca se destaca por su alto valor nutricional al contener vitamina C, E, K, A, B1, B2, B3, B5, B6, B7, B9 y minerales como, Fe, Ca, Mg, P, Mn, Na, K y Zn (Farías *et al.*, 2022).

Existen más de cincuenta especies de albahaca que se diferencian en el tamaño, el color, la apariencia y el sabor, siendo la especie *O. basilicum* L., la que produce mayor cantidad de aceite esencial, lo que permite su uso en la industria alimenticia,

cosmética y farmacéutica. En este sentido, el efecto medicinal de esta planta se debe a los contenidos de alcaloides, taninos, flavonoides y compuestos fenólicos (Moncayo et al., 2015).

La albahaca es una planta con alto contenido de aceites esenciales, especialmente de eugenol, cinol, metilcahvicol, linalol y estragol, que es ampliamente utilizado en la medicina, así como en alimentos como condimento. Por lo general, las hojas son las partes de la planta que se utilizan en la medicina herbal, aunque también se usan en menor medida otras partes como las raíces, cortezas, frutos, flores y, a veces, el tallo. Esto debido a que, los órganos que contienen la mayoría de los elementos activos son las hojas, ya que, están presentes durante toda la vida de la planta. Además, las hojas son el órgano más utilizado en los estudios anatómicos y fisiológicos, puesto que responden bien a los cambios ambientales y realizan el proceso fundamental de la fotosíntesis que es común en la mayoría de las plantas (De la luz et al., 2002, Reyes-Pérez et al., 2014).

Tabla 1. Clasificación taxonómica *Ocimum Basilicum L.* (Albahaca). elaboración propia con información de (Agexport, 2020).

Reino	Plantae
Subreino	Viridiplantae
Infrareino	Streptophyta
Supervisión	Embryophyta
División	Tracheophyta
Subdivisión	Spermatophyta
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Asteranae
Orden	Lamiales
Familia	lamiaceae

Género	Ocimum
Especie	<i>Ocimum basilicum</i> L.

La albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.) es una planta herbácea que alcanza una altura de entre 30 y 50 cm, sus hojas tienen un diámetro de entre 2 y 5 cm siendo estas suaves, oblongas, opuestas, pecioladas, aovadas, lanceoladas y ligeramente dentadas (Dueñas-García et al., 2020). Está compuesta principalmente de fitoquímicos como los flavonoides y compuestos fenólicos que se encuentran principalmente en el tallo y las hojas (Figura 1). El nivel de adaptabilidad de esta planta aromática es muy alto debido a que solo requiere un ambiente alto en humedad (Vélez-Carranza et al., 2021).



Figura 1. Planta de albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.) variedad red opal. UAQ campus Amazcala. Elaboración propia 2024.

3.2 La luz

La luz y otro tipo de radiación electromagnética está compuesta por paquetes llamados fotones. La energía contenida en cada uno dependerá de su longitud de onda, los fotones con una longitud más corta tendrán mayor energía, mientras que aquellos con una longitud más larga tendrán menor energía. El sol contiene todas las longitudes de onda que se encuentran dentro de un espectro amplio de radiación electromagnética (Figura 2), dentro del cual una pequeña fracción de la energía que llega a la atmósfera del planeta está compuesta por radiación UV que a su vez se divide en tres que son la radiación UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) y UV-C (200-280 nm), Luz visible e infrarroja (IR). La mayor cantidad de la

radiación UV e IR es absorbida en la atmósfera por los gases, específicamente por el ozono en el caso de la UV y vapor de agua y CO₂ en el caso de la IR (Meisel et al., 2011).

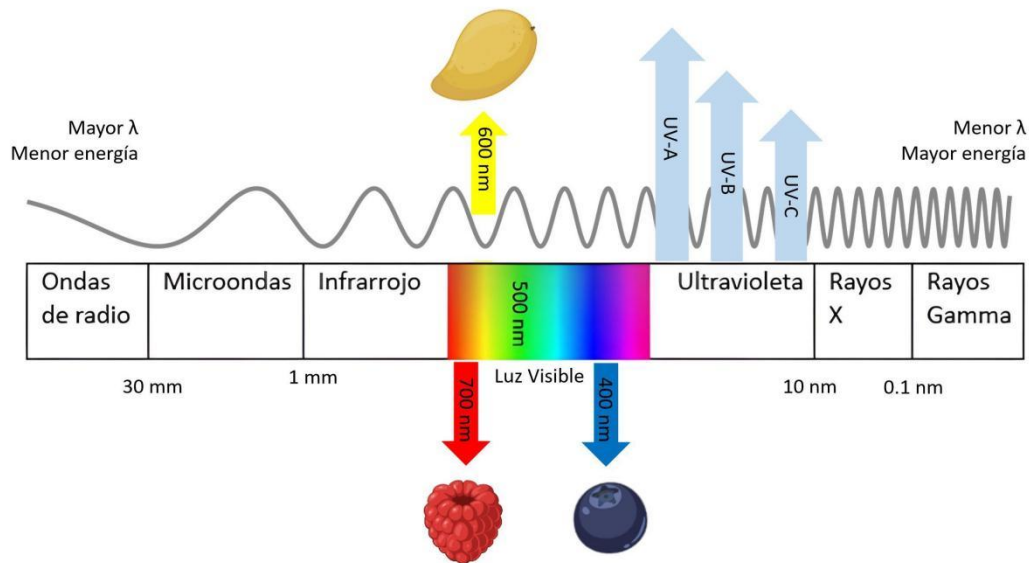


Figura 2. Fenómeno electromagnético (Hernández-Navarrete, Aguirre-Becerra 2024)

La radiación solar se considera el factor ambiental más importante, pues influye en procesos relacionados con la fotosíntesis, los balances de agua y energía, y el crecimiento y desarrollo del cultivo. La radiación UV-A mejora el proceso de fotosíntesis en la planta propiciando un crecimiento vegetal más rápido. Estudios muestran que la exposición mejora la fotosíntesis en las plantas en un 12% así como los niveles de crecimiento (Lyu, 2021). Una fracción de radiación UV-B, junto a la totalidad de la radiación UV-A, más la correspondiente a la Luz visible (400 a 700 nm), forman parte del espectro percibido por los organismos en la biosfera, el porcentaje de la radiación UV-A es el 95% y la radiación UV-B es del 5% que llega directamente a la superficie de la tierra mientras que la radiación UV-C es bloqueada por la capa de ozono (Meisel *et al.*, 2011).

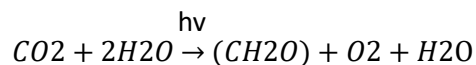
La radiación UV-B ocasiona daños en el material genético (ADN), reduce la velocidad a la que se lleva a cabo la fotosíntesis, disminuye la capacidad de

floreCIMIENTO y polinizaci3n, y afecta el crecimiento de las semillas. La exposici3n prolongada puede tener efectos negativos al disminuir la fotos3ntesis y la producci3n de biomasa. Se ha comprobado que esta radiaci3n daña varios procesos de las plantas, los cuales se pueden clasificar en dos categor3as: daños al ADN que pueden resultar en mutaciones hereditarias y daños a los procesos fisiol3gicos. Por otra parte, la radiaci3n UV-A puede causar elongaci3n en las plantas si no le llega suficiente cantidad (Stapleton, 1992).

3.3 Fotos3ntesis

La fotos3ntesis se efectúa en todos aquellos organismos fotosint3ticos como por ejemplo las plantas terrestres y marinas, siendo un proceso anab3lico aut3trofo que consta de la transformaci3n de la energ3a lum3nica en energ3a qu3mica en forma de azúcares, dicho de otra manera, el mecanismo por el cual las plantas producen su alimento. Este proceso se lleva a cabo en dos etapas: la fase lum3nica y fase oscura, en este proceso se producen mol3culas de glucosa mediante agua y di3xido de carbono soltando ox3geno. Los pigmentos (clorofila, xantofila y carotenoides) de las plantas se encargan de absorber la energ3a lum3nica y transformarla en mol3culas de glucosa. La siguiente reacci3n (Ecuaci3n 1) muestra el fen3meno de la fotos3ntesis, donde: $h\nu$ representa la energ3a de la luz (Ocampo, 2020).

Ecuaci3n 1. Fen3meno de la fotos3ntesis.



La estructura de las hojas permite tener mayor contacto con la fuente de luz, mientras que su grosor facilita que la luz llegue a los cloroplastos. Los cloroplastos tienen una membrana interna y externa, adem3s de un sistema de membranas llamadas tilacoides que forman discos conectados y apilados en grupos llamados granas. Las reacciones de la fotos3ntesis que dependen de la luz se llevan a cabo en los tilacoides, mientras que las reacciones que continúan por un periodo de tiempo en la oscuridad (fotos3ntesis independiente de la luz) ocurre en el estroma (Audesirk et al., 1996 y Espinosa-Barrera & Ch3vez-Sahagún 2019).

Importancia de la fotosíntesis: Gracias a la fotosíntesis se expandió la vida en nuestro planeta hace millones de años y perdurar hasta la actualidad al proporcionar el alimento para todos los organismos autótrofos, proporcionar biomasa y generar el oxígeno que requieren todos los organismos multicelulares y algunos unicelulares (Zita, 2020).

3.4 Fotorreceptores

Los fotorreceptores son sensores que se encargan de captar la energía lumínica en los organismos fotosintéticos y proveen a la planta la información sobre los cambios en la composición espectral de la luz, su intensidad, la dirección y duración, controlando así, respuestas fisiológicas y morfológicas, además de la fotosíntesis. La luz afecta al ciclo circadiano de las plantas y activan respuestas como: cambios en la estructura y forma de las hojas, la germinación de las semillas, elongación de los tallos, entrada de las plantas en floración y síntesis de pigmentos, entre otros (Flores et al., 2020).

3.5 Fitocromos

Los fitocromos (cromoproteínas) son capaces de absorber la energía lumínica, especialmente en las regiones rojo (660 nm) rojo lejano (730 nm) y azul (440-485) siendo claves para el ciclo circadiano de las plantas, encontrándose principalmente en tejidos meristemáticos que carecen de clorofila. Diferentes tipos de plantas cuentan con diferente cantidad y diferentes tipos de fitocromos. La forma Pr del fitocromo absorbe la Luz roja y al ser expuesta se convierte en la forma Pfr, capaz de absorber luz roja lejana y regresar a la forma Pr. La conversión entre las formas Pr y Pfr depende de la proporción de luz roja y roja lejana (Júnior & Gomes, 2023).

3.6 Criptocromos

Los criptocromos son fotorreceptores que captan la luz azul (450 nm) radiación UV-A (355-366 nm) y en algunos casos la luz verde (500-550 nm), se encuentran compuestos de proteínas solubles, siendo sus dominios terminales en amino y

carboxilo. La investigación de los fotorreceptores que captan la luz azul es compleja porque su respuesta es similar a la absorción de las flavoproteínas y los carotenoides. Su efecto está relacionado con varias funciones como el ritmo circadiano, biosíntesis de antocianinas, apertura de estomas, floración, dormancia de semillas y adaptación a distintos ambientes. Los criptocromos son flavoproteínas asociadas a dos cromóforos, Flavina, Adenina, Dinucleótido y Metiniltetrahidrofolato. La luz captada por el cromóforo es transformada en energía química que se transfiere a la proteína, provocando un cambio conformacional que promueve su fosforilación *in vivo* (Páez et al., 2021).

3.7 Fototropinas

Las fototropinas son proteínas receptoras de luz azul y UV-A que regulan el fototropismo en las plantas, cada fototropina consta de dos proteínas LOV (luz, oxígeno y voltaje), dos cromóforos y una región cinasa. Estas proteínas están asociadas al cromóforo Flavina Mononucleótido (FMN) en cada uno de sus dominios: dominio que responde a estímulos de luz y cambios en concentraciones de oxígeno y de voltaje (LOV) (Páez et al., 2021).

3.8 Familia UVR8 y Zeitlupes

UVR8 desencadena respuestas fotomorfogénicas a la radiación UV-B al regular la transcripción de un conjunto de genes. A diferencia de otros fotorreceptores conocidos, UVR8 utiliza aminoácidos específicos de triptófano en lugar de un cromóforo protésico para la absorción de luz durante la fotorrecepción UV-B (Jenkins, 2014).

Los integrantes de la familia zeitlupe son cruciales para controlar la degradación y estabilizar los compuestos que se relacionan con el ciclo circadiano y el control del fotoperiodo de la floración. Los miembros de zeitlupe se localizan en el citosol o el núcleo (Christie et al., 2015).

3.9 Metabolismo Vegetal

El metabolismo es un conjunto de reacciones químicas que realizan las células de todo ser vivo para sintetizar sustancias complejas a partir de otras más sencillas o degradan las sustancias complejas en otras más simples (García and Carril, 2011). Las plantas poseen un metabolismo primario que cumple un rol directo en la supervivencia, como por ejemplo el crecimiento, la reproducción, la fotosíntesis, la respiración, entre otros, y un metabolismo secundario que se activan como respuesta a estímulos bióticos o abióticos (Ccana, 2017).

3.10 Producción de aceite esencial en plantas

Los aceites esenciales (AE) son líquidos aromáticos y oleosos que son extraídos de plantas aromáticas y son considerados metabolitos secundarios, lo que indica que no son esenciales para el desarrollo de la planta. Sin embargo, su relevancia radica en que tienen un papel importante en la defensa y adaptación de las plantas a su entorno. La síntesis de estos aceites es un proceso complejo que involucra la síntesis de compuestos volátiles, estos compuestos se generan a partir de precursores que se producen en la fotosíntesis, un ejemplo es la glucosa que se puede transformar en terpenoides que son principales componentes en algunos AE. Los tricomas son los responsables de producir el aceite esencial, existen dos tipos de tricomas: los tricomas capitados que son pequeños y se encargan de almacenar los AE, sin embargo, su capacidad es limitada y los tricomas peltados que son más grandes y abundantes. Los tricomas glandulares son estructuras clave en la producción de aceites esenciales en las plantas aromáticas. Su capacidad para sintetizar, almacenar y liberar compuestos volátiles es fundamental tanto para la supervivencia de la planta como para su interacción con el entorno (Ruíz et al., 2015; Chávez-Soto et al., 2021)

3.11 Ciclo Circadiano

Las plantas tienen un reloj interno el cual les permite regular todo lo que pasa en su interior dependiendo de los ciclos de luz y oscuridad, estos ciclos son llamados

circadianos y existen en todos los seres eucariotas. El ciclo circadiano afecta a todos los seres vivos en periodos de luz, puede considerarse un sistema de dos componentes: la entrada que sincroniza a un oscilador central y la salida que conectan el oscilador con diversos procesos fisiológicos, metabólicos y de desarrollo, en plantas este reloj circadiano regula gran parte del transcriptoma. La importancia del reloj circadiano es que controla una multitud de acciones del desarrollo y de la fisiología permitiendo anticipar eventos periódicos, por ejemplo, las plantas al igual que cualquier ser vivo necesitan su momento de luz, en el caso de las plantas durante el día realizan la fotosíntesis, pero de igual manera se necesita una etapa de oscuridad que ayuda a controlar diferentes acciones en su desarrollo (Rodríguez, 2022).

3.12 Tecnología LED

Un LED es un semiconductor capaz de transformar energía eléctrica en energía luminosa sin generar calor. Está compuesto por un chip semiconductor con impurezas formando una unión p (ánodo) - n (cátodo), permitiendo que la corriente fluya de manera fácil del lado p al lado n pero no en dirección contraria. Cuando un electrón encuentra un hueco, su energía se desploma a niveles bajos, y libera energía en forma de un fotón. En la actualidad, se han podido producir LEDs para cualquier tipo de color, como blanco, azul, rojo, verde, UV etc. el color de la luz emitida depende de la separación de los materiales que forman la unión p - n . Los materiales empleados para esta tecnología tienen una separación de banda directa que contempla la radiación UV, la radiación infrarroja y la luz visible. El fenómeno por el cual un LED produce luz se llama electroluminiscencia, que es pasar los electrones del electrodo negativo al electrodo positivo. La estructura clave de un LED consiste en la matriz (o material semiconductor emisor de luz), un marco de plomo donde se coloca la matriz y la encapsulación que protege la matriz (Figura 3) (Arrollo & Jiménez, 2013). Algunas ventajas del uso de la tecnología LED son: 1) tienen una mayor vida útil en comparación con cualquier otro tipo de tecnología de iluminación tradicional, 2) proporcionan mejor calidad de luz (más brillante y uniforme) en comparación con la iluminación tradicional, 3) en

ambientes industriales soportan choques y vibraciones, 4) reproducción del espectro electromagnético y 5) permite un mayor control de la iluminación (PauletteChaux-Terán et al., 2023).

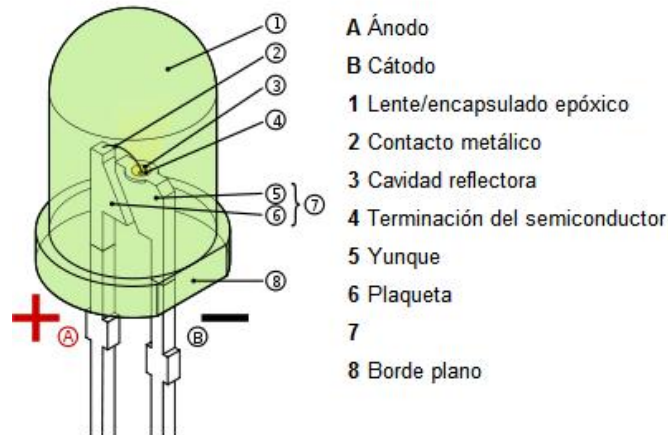


Figura 3. Descripción de los componentes de un LED. Imagen obtenida de <https://www.ledtecnologia.com/que-es-un-led/>

4. Hipótesis y Objetivos

4.1 Hipótesis

La producción de aceite esencial y metabolitos secundarios en albahaca incrementará mediante diferentes fotoperíodos con dos sistemas de iluminación, el primero con una combinación de luz roja (625 nm y 655 nm), luz azul (415 nm y 460 nm) y radiación UV-A (365 nm) mientras que el segundo sistema es con luz blanca (fluorescente) durante su cultivo en etapa vegetativa debido a la interacción de las diferentes longitudes de onda de luz con los fotorreceptores, en comparación de un cultivo de invernadero.

4.2 Objetivo general

Incrementar la producción de aceite esencial y metabolitos secundarios en albahaca morada (*Ocimum basilicum L.*) variedad red opal mediante diferentes fotoperíodos con dos sistemas de iluminación, el primero con una combinación de

luz roja (625 nm y 655 nm), luz azul (415 nm y 460 nm) y radiación UV-A (365 nm) mientras que el segundo sistema es con luz blanca (fluorescente).

4.3 Objetivos particulares

1. Diseñar y establecer el sistema de iluminación LED con luz roja/azul y radiación UV-A para elicitación de plantas de albahaca.

2. Implementar el sistema de iluminación para desarrollar un experimento de elicitación en plantas de albahaca, para incrementar su producción de aceite esencial.

3. Analizar e interpretar los resultados para identificar diferencias significativas entre los tratamientos del diseño experimental y poder aceptar o rechazar la hipótesis.

5. Materiales y Métodos

5.1 Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en el campus Amazcala de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. La comunidad de amazcala (Figura 4) pertenece al municipio del marqués, se localiza en el sector Suroeste del estado, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud Norte. Su longitud se encuentra entre los 100° 24' del Oeste a 1850 m sobre el nivel del mar. Colinda al Oeste con el municipio de Querétaro, al Norte con el estado de Guanajuato, el Este con el municipio de Colón, y al Sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. La temperatura media oscila entre los 18 °C y los 24 °C, con un clima predominante subtropical, templado semiseco.

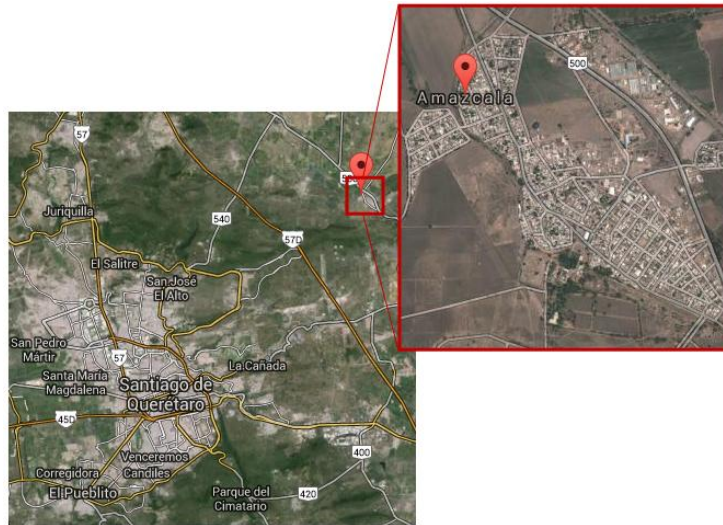


Figura 4. Ubicación de la UAQ Campus Amazcala. Amazcala, municipio de El Marqués, estado de Querétaro. Elaboración propia con información de Google maps 2024.

5.2 Construcción de la lámpara

La lámpara tiene una fuente de energía directa de 12v 10A que alimenta una reguladora de voltaje para los diferentes LEDs, a su vez se utilizó un temporizador (timer) que se encuentra previo a la fuente de energía que regula el encendido y apagado de la lámpara (Figura 5).

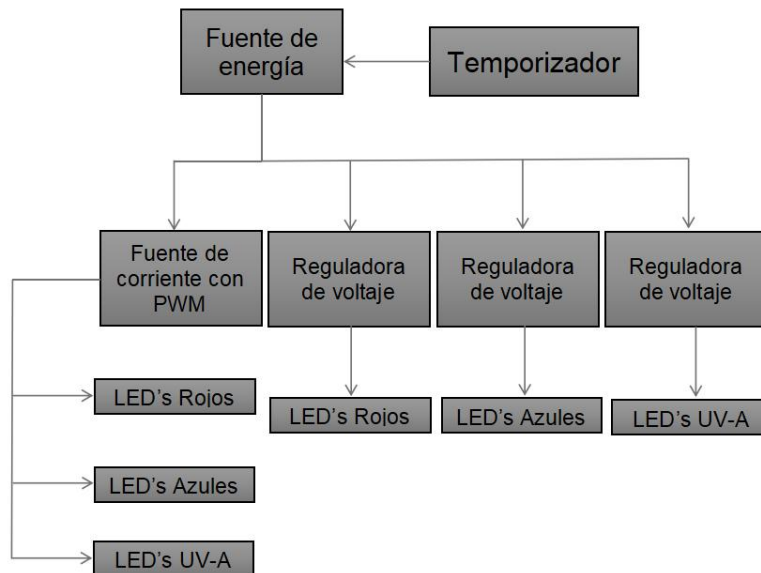


Figura 5. Diagrama de la elaboración de la lámpara.

5.2.1 LEDs

Se utilizaron LED's rojos, azules y UV-A que corresponden a la longitud de onda que los fotorreceptores que las plantas perciben. La Tabla 2 contiene las especificaciones técnicas de los LEDs utilizados para la construcción de la lámpara y la Figura 6 muestra la lámpara final. En una lámina de acetato perforada se colocaron 33 LED's rojos, 17 LED's azules y 7 LED's UV-A.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los LED.

	LED rojo	LED azul	LED rojo	LED UV-A	LED UV-A
Longitud de onda (nm)	625	460	655	415	365
Flujo luminoso (lm)	62	24	-	-	-
Potencia radiante (mW)	-	-	450	440	875
Corriente eléctrica (mA)	350	350	350	350	500
Ángulo de incidencia	165	165	120	125	130
Tensión directa (V)	2.15	3.5	2.15	3.2	3.6

En una lámina de acetato perforada se colocaron 33 LED's rojos, 17 LED's azules y 7 LED's UV-A.

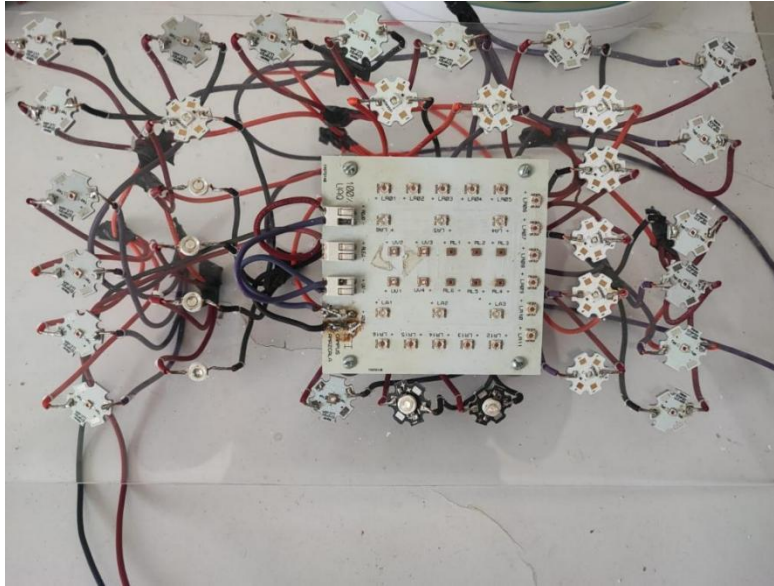


Figura 6. Diseño de la lámpara LED con 32 LEDs rojo, 17 azules y 7 UV-A. Elaboración propia.

5.2.2 Fuente de suministro de voltaje

Las fuentes de poder utilizadas para la construcción del sistema fueron las siguientes: una EDR-120-12, una SPD12120 y una PLA600F-24 con salida de corriente continua de 12 V 10A y entrada de corriente alterna de 110 V para las dos primeras fuentes de poder mientras que para la última fue de 12 V 25A y entrada de corriente alterna de 110 V (Figura 7).

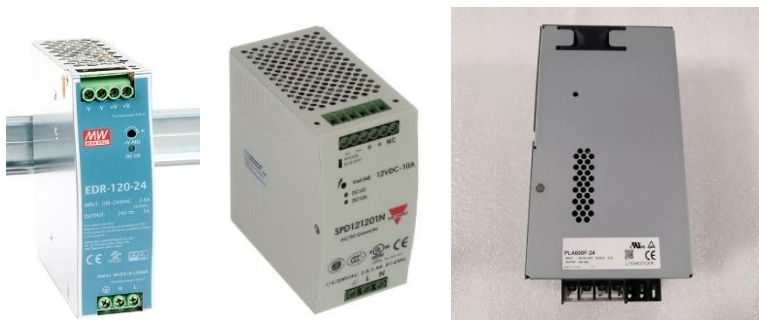


Figura 7. Fuentes de poder.

5.2.3 Electrónica de potencia

Para la potencia del circuito de LEDs se empleó un LDH-45A-350 W (Figura 8), que es un convertidor-elevador de voltaje DC/DC que regula una salida constante de corriente directa de 350 mA. Una característica relevante de este regulador es su capacidad de recibir una señal PWM de entrada para ajustar la intensidad luminosa de los LEDs, además de contar con protección contra sobre-voltaje, bajo-voltaje y corto-circuito, y una eficiencia energética del 95%.



Figura 8. Convertidor elevador. Imagen tomada de:

<https://www.conrad.fr/fr/p/convertisseur-cc-cc-pour-circuits-imprimes-mean-well-ldh-45a-350-nbr-de-sorties-1-x-30-1-w-1-pc-s-1292794.html>

5.2.4 Controladora de voltaje

La reguladora de voltaje utilizado fue un *Convertidor de voltaje DC-DC STEP-DOWN- 8A 300W XL4016* (Figura 9). El cual fue conectado a la fuente de suministro de voltaje y regulado con el uso de un multímetro para el control de la intensidad luminosa. Se utilizaron distintos controladores paraca cada tipo de LED.

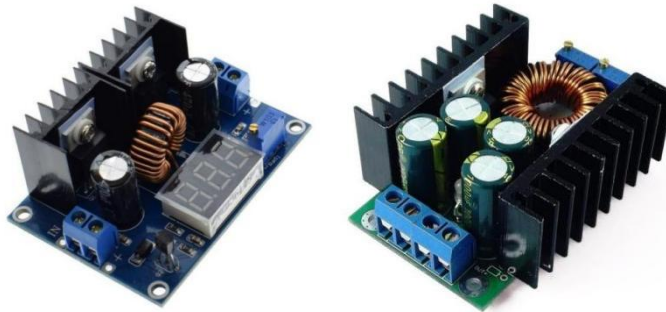


Figura 9. Reguladoras de voltaje electrónicas. Imagen tomada de:
<https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/127-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-8a-300w-xl4016.html>

5.3 Material biológico

Para el experimento se utilizaron un total de 315 plantas de albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.) variedad Red Opal. Las plantas fueron cultivadas a partir de semilla certificada producida en Estados Unidos de América en el año 2019.

5.4 Diseño experimental

Los tratamientos del diseño experimental se describen en la Tabla 3. El tratamiento control (TC) estuvo expuesto a un fotoperiodo de 12 horas bajo luz fluorescente que sería el equivalente a su fotoperíodo natural, el tratamiento 1 (T1) mantuvo un fotoperiodo de 12 horas, pero bajo luz LED (Rojo/Azul y UV-A), los tratamientos 2 (T2) y 3 (T3) estuvieron bajo un fotoperiodo de 16 horas con luz fluorescente y LED respectivamente, el tratamiento 4 (T4) y 5 (T5) estuvieron bajo un fotoperiodo de 20 horas con luz Fluorescente y LED respectivamente y por último el tratamiento control (TC) se expuso a su fotoperiodo natural bajo condiciones de invernadero.

Tabla 3. Diseño experimental.

T1	T2	T3	T4	T5	T6	TC
----	----	----	----	----	----	----

Fotoperiodo (L:O)	12: 12	12:12	16:8	16:8	20:4	20:4	13:11
Tipo de luz	RAUV-A	Fluorescente	RAUV-A	Fluorescente	RAUV-A	Fluorescente	Invernadero
Activación de la lámpara	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00
Apagado de la lámpara	20:00	20:00	22:00	22:00	4:00	4:00	7:00
Cantidad de luz artificial (μmol)	230	153.9	230	153.9	230	153.9	619.5

Para valorar el efecto del fotoperíodo y las diferentes longitudes de onda, los tratamientos se mantuvieron bajo condiciones controladas en un cuarto oscuro, el cuarto se dividió en seis con un plástico negro, el cual impide la contaminación lumínica entre los tratamientos. Los sistemas de iluminación se colocaron de 8000 a 10000 luxes.

5.5 Germinación de albahaca

Para la producción de albahaca morada variedad Red Opal se realizó la germinación de la semilla en charolas de 320 cavidades, que estuvieron rellenas de peat moss y se colocó una semilla por cavidad. Las charolas se mantuvieron bajo condiciones de invernadero hasta alcanzar su cuarta hoja verdadera, se cubrieron con muy poco sustrato, se debe considerar mantener el sustrato

húmedo por lo que se debe regar dos veces al día (Figura 10). El trasplante se realizó al tener su cuarta hoja verdadera a macetas de un diámetro de 17 cm con una mezcla de peat moss (80%) y perlita (20%) y como nutrición se utilizó solución universal Steiner para que tenga un buen desarrollo (Agexport, 2020).



Figura 10. Plántula de albahaca morada (*Ocimum basilicum L.*) variedad Red Opal.
Elaboración propia 2024.

5.6 Sistema de Riego

Se realizó el riego de manera manual cada 4 días a las 17:00 para los tratamientos indoor y para el tratamiento control en invernadero se regó todos los días a las 17:00, 3 días con agua natural y el cuarto día con solución Steiner.

5.7 Biometrías de la planta

Para determinar la altura de la planta se tomaron las mediciones desde el cuello hasta la punta de su ápice. Para determinar la distancia entre nudos se midió desde el cuello hasta el primer nudo y posteriormente del primer nudo al segundo, la longitud de la raíz se mide desde la base del tallo hasta la punta de la raíz más larga y por último el diámetro del tallo reportando en mm con un vernier digital

(CD-6"PSX,Mitutoyo, Resolución:0.01 mm, Precisión: ± 0.02 209 mm, Japón).
(Colorado et al., 2013).

5.8 Determinación de área foliar

El análisis del área foliar se realizó en cada planta durante el muestreo al tomar una imagen digital de todas las hojas de la planta (Figura 11) y posteriormente se realizó un análisis de imagen en el programa MATLAB.



Figura 11. Hojas de albahaca para el análisis de área foliar. Elaboración propia 2024.

5.9 Extracción de aceite esencial de albahaca

La extracción del aceite esencial de albahaca morada (*Ocimum basilicum L.*) variedad red opal se llevó a cabo por medio del método soxleth propuesto por Mesa et al., (2024). Para la extracción se utilizó hexano al 100% y hojas deshidratadas y molidas de albahaca morada, se colocaron 200 ml de hexano en un matraz bola y las hojas de albahaca se colocaron en un cartucho de celulosa para su extracción, se llevó a ebullición para extraer la mayor cantidad de aceite, posteriormente se llevó a un rota vapor para evaporar el solvente y cuantificar la cantidad de aceite esencial obtenido.

5.10 Cuantificación de clorofila

Para la determinación de clorofila se tomó una muestra de hoja (2 g) que se trituró y suspendió en un volumen de 5-10 ml de acetona al 90% (V/V) como disolvente extractor de los pigmentos. Se agitó y se dejó reposar en la oscuridad a 4 °C durante 24 h. Después de este periodo se llevó temperatura ambiente, se repone el disolvente que pueda haberse evaporado y se centrifuga a 2700rpm durante 5 minutos. Se midió la densidad óptica del sobrenadante a 665, 645 y 630 nm, comprobando que no existía turbidez ni partículas en suspensión utilizando el propio disolvente como blanco. La densidad óptica se midió en un espectrofotómetro DR6000 (HACH 233 Company, Loveland Colorado, USA). Para la cuantificación de clorofila a y b se utiliza la ecuación 2, propuestas por (Strickland and Parsons, 1972), donde $Chla$ y $Chlb$ son las concentraciones de clorofila a, b y c, respectivamente, y DO es la densidad óptica medida a la longitud indicada:

Ecuación 2. Determinación de clorofilas

$$Chla = 11.6DO_{\lambda 665} - 1.31DO_{\lambda 645} - 0.14DO_{\lambda 630}$$

$$Chlb = 20.7DO_{\lambda 645} - 4.34DO_{\lambda 665} - 4.42DO_{\lambda 630}$$

5.11 Capacidad antioxidante (CAO)

La capacidad antioxidante se evaluó utilizando los ensayos del radical libre 2,2'-difencil-1-picrilhidrazilo (DPPH). Este método consistió en calcular el porcentaje de inhibición de la absorbancia de radical libre DPPH a 428 nm, ocasionada por la reducción de éste debido a su reacción con los compuestos antioxidantes presentes en la muestra, dando lugar a la formación de DPPH estable en un espectrofotómetro UV-Vis halo XB-10 (Moon y Shibamoto, 2009). Para crear la curva de calibración, se empleó una solución estándar de Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico) en metanol con una concentración de 1 mg/mL. Se tomaron volúmenes adecuados para obtener un rango de concentraciones de 0.02 mg/mL a 0.2 mg/mL.

El método espectrofotométrico para la cuantificación de capacidad antioxidante por ABTS se realizó siguiendo el método de Pellegrini. Para la cuantificación se mezclaron 230 μ L de ABTS con 20 μ L de muestra en una microplaca de 96 pozos. Se dio lectura a 734 nm en el espectrofotómetro (MULTISKAN GO). Expresados en mg equivalentes de trolox/ g de muestra.

5.12 Fenoles totales

Los fenoles totales se determinaron espectrofotométricamente por el método de Folin-Ciocalteu descrito por (Singleton y Rossi, 1965) y se expresó la medición en miligramos de equivalente de ácido gálico por gramo de peso seco (mg GAE g⁻¹ dw). Este método se lleva a cabo mediante la oxidación de los grupos hidroxilo con el reactivo de Folin, que contiene una mezcla de wolframio sódico y molibdato sódico en ácido fosfórico. En la determinación de fenoles totales se utilizó una solución de carbonato de sodio anhidro al 20% y el reactivo Folin-Ciocalteu se preparó a 1N. El ácido gálico se preparó a una concentración final de 0.1 mg/ml. La reacción redox genera una coloración azul detectada a una longitud de onda de 765 nm.

5.13 Contenido de flavonoides totales

Para la cuantificación de flavonoides se utilizó el método reportado por (Zhishen et al., 1999) y se expresó en miligramos de equivalente de catequina por gramos de peso seco (mg CE g⁻¹ dw). Se preparó una solución de 2-aminoetilfenilborato y se tomó 50 µl de la extracción de fenoles, la fracción de fenoles extraíbles, a la cual se le agregaron 180 µl de metanol y 20 µl de la solución preparada con 2-aminoetilfenilborato. Además, se preparó nitrito de sodio al 5%, cloruro de aluminio al 10%, hidróxido de sodio al 1 M y la solución estándar de catequina con metanol. La lectura se realizó en un espectrofotómetro a 404 nm y las concentraciones de flavonoides se determinaron utilizando una curva estándar de catequina.

5.14 Capacidad Antioxidante Enzimática

Se evaluó el efecto de los tratamientos en la actividad antioxidante enzimática, específicamente la determinación de las enzimas SOD, CAT y PAL, siguiendo el protocolo espectrofotométrico reportado por Carbajal-Valenzuela et al. (2022).

Para la preparación del extracto se homogeneizaron 300 mg de hojas pulverizadas con 1 mL de buffer de fosfatos (pH 6.8) y se centrifugaron durante 4 minutos a 12,000 rpm. El extracto enzimático se recuperó del sobrenadante y se utilizó para la determinación de la actividad enzimática. La cantidad de proteína se determinó por el método de Bradford (Ampofo et al., 2020).

5.14.1 Fenilalanina-amonio liasa

La actividad de la fenilalanina amonio-liasa (PAL) se midió a 290 nm después de reaccionar 125 µL de extracto enzimático y 125 µL de L-fenilalanina 60 mM durante 1 hora a 37°C; la reacción se detuvo añadiendo 50 µL de ácido tricloroacético 1M (Dickerson et al., 1984).

5.14.2 Catalasa

La actividad de la catalasa (CAT) se determinó utilizando 100 µL de extracto enzimático, a los cuales se añadieron 200 µL de buffer de fosfatos pH 7.0 y H₂O₂

10 mM. Posteriormente, se añadieron 100 μ L de solución de trabajo con cobalto (II) y hexametáfosfato de sodio; la mezcla se mantuvo 10 minutos en oscuridad y luego se leyó a 440 nm (Hadwan, 2018).

5.14.3 Superóxido dismutasa

La actividad de la superóxido dismutasa (SOD) se determinó utilizando 20 μ L del extracto enzimático, a los cuales se añadieron 280 μ L de mezcla de reacción preparada con buffer de fosfato (50 mM), nitro blue tetrazolium chloride (NBT), riboflavina y metionina. La mezcla de reacción se vortexó y se expuso a 12.5 lux de luz durante 15 minutos, luego se midió a 560 nm y se reportó como unidades de actividad por mg de tejido vegetal (Cakmak y Horst, 1991).

5.15 Análisis e interpretación de datos

Se determinaron las diferencias estadísticamente significativas mediante un análisis de varianza ANOVA (95% de confianza) y una comparación de medias por Tukey con el programa stathgraphics para la demostración del efecto de diferentes fotoperiodos con dos sistemas de iluminación en albahaca morada (*Ocimum basilicum L.*) variedad red opal.

6. Resultados y discusión

6.1 Biometrías de las plantas

La tabla 4 muestra las mediciones de las plantas de albahaca morada (*Ocimum basilicum L.*) variedad red opal 50 días después de la implementación del fotoperiodo artificial. Se observó que la calidad de la luz no tuvo un efecto sobre los tratamientos, pero el fotoperiodo sí afectó especialmente a los tratamientos T1 y T2 al tener una altura menor en comparación con los otros tratamientos. El diámetro del tallo en el tratamiento T3 es mayor; sin embargo, no presentó diferencia significativa con los tratamientos T5 y T6 en comparación con los tratamientos restantes, lo que indica que la calidad de la luz junto con el fotoperiodo tiene un efecto en el diámetro del tallo. El TC tiene una mayor longitud de raíz y mayor producción radicular en comparación con los tratamientos que

entre ellos no se encontró diferencia significativa. Los tratamientos T1 y control TC tienen una menor distancia entre nodos a comparación de los tratamientos restantes. En el área foliar se observó que no existe diferencia significativa, sin embargo, el TC desarrollo hojas más pequeñas pero mayor cantidad de ellas a diferencia de los tratamientos indoor que desarrollaron hojas más grandes pero menor cantidad de ellas por lo que en el área foliar total no se observó diferencia significativa.

Tabla 4. Biometrías de las plantas correspondientes a la altura, diámetro del tallo, longitud de la raíz, distancia entre nodos, Área foliar.

	Altura	Diámetro del tallo	Longitud de la raíz	Distancia entre nodos	Área foliar (cm^2)
T1	18.29±0.8692a	0.32±0.0126ab	7.86±0.5019a	3.64±0.1291a	235.48±27.0512a
T2	20.81±1.4207a	0.29±0.0181a	7.07±0.3928a	3.32±0.1966ab	245.95±27.3465a
T3	26.70±0.9880b	0.52±0.0545d	10.64±1.0104a	4.12±0.1940b	544.78±65.0709a
T4	26.05±0.7399b	0.36±0.0139bc	10.54±1.1487a	3.88±0.2043b	330.73±50.8308a
T5	25.41±0.8954b	0.41±0.0092d	11.17±1.1694a	3.48±0.2313ab	460.18±103.4054a
T6	29.41±0.636b	0.38±0.0077cd	13.57±2.8527a	3.75±0.2265b	498.53±29.1220a
TC	26.88±1.177b	0.35±0.0143bc	23.33±1.7895b	2.61±0.2635a	468.18±116.5763a

a y b en la misma columna por medición muestran diferencia significativa por tratamientos ($P<0.05$). Las mediciones se muestran como promedio \pm error estándar.

Se observó que la altura de las plantas en los tratamientos T1 y T2 es menor al igual que su diámetro del tallo, presentando una menor longitud de raíz y una

mayor distancia entre nodos en comparación con los demás tratamientos de entre los cuales destaca el tratamiento T3 el cual presentó una mayor altura y un mayor diámetro de tallo, sin embargo, se observó una longitud de raíz igual a la de los tratamientos T1 y T2 y una distancia entre nodos similar a los demás tratamientos en contraste los tratamientos T4, T5 y T6 presentaron misma altura, longitud de raíz, distancia entre nodos que el tratamiento T3, por otra parte, se observó un menor diámetro del tallo en el T4. Por otro lado, no se observó diferencia significativa del área foliar total entre los tratamientos, sin embargo T3, T5 y T6 presentaron hojas más grandes en comparación con los otros tratamientos que presentaron hojas más pequeñas, pero en mayor cantidad. Lo cual concuerda con lo reportado por sutuliene et al., en 2022 el cual menciona que la luz artificial tiene un efecto positivo en la altura, el diámetro del tallo y el área foliar desarrollando hojas más grandes en plantas de albahaca dulce. Adicionalmente chutimanukul et al., (2022), menciona que la calidad de la luz si afecta el desarrollo de la altura, diámetro y área foliar de las plantas de albahaca sin embargo también podemos decir que el fotoperiodo es fundamental también en el desarrollo de las plantas.

6.2 Mediciones Fitoquímicas

La tabla 5 muestra los resultados de las mediciones fitoquímicas de las plantas de albahaca morada (*Ocimum basilicum* L.) variedad red opal 50 días después de la implementación del fotoperiodo artificial en las cuales se observó que las cantidades de clorofila no varían a la exposición de diferentes fotoperiodos y calidad de la luz, sin embargo, podemos observar que el porcentaje de inhibición de ABTS en el tratamiento control TC es el que se encuentra por arriba de los otros tratamientos lo que nos indica una mayor capacidad antioxidante en comparación con los otros tratamientos, por otra parte el T2 es el que se vio afectado por el fotoperiodo y por la calidad de la luz. En comparación de las plantas del TC se encontró una actividad significativamente mayor de DPPH, sin embargo, en el T5 se vio inhibida ya que fue el tratamiento que presento una menor cantidad de mg de trolox/g de muestra seca. Para los compuestos fenólicos (fenoles y flavonoides totales) no se observó diferencia significativa entre los

tratamientos indoor, sin embargo, el tratamiento control es el que presento una mayor cantidad de estos compuestos. Los resultados obtenidos concuerdan con sotuliene et al., 2022 en el incremento de DPPH aunque difiere en la actividad de ABTS ya que se observó un mayor desarrollo de esta actividad en el tratamiento bajo invernadero (TC). Por otra parte, chutimanukul et al., (2022), menciona que se tiene una mayor capacidad antioxidante en plantas suplementadas con luz artificial. Adicionalmente Carvalho et al., (2016), menciona que se obtiene una mayor cantidad de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante con una intensidad lumínica de 100 por lo que los resultados obtenidos concuerdan con lo dicho anteriormente sin embargo podemos también decir que la intensidad unida a una exposición prolongada puede inhibir la capacidad antioxidante como sucedió en el tratamiento T5.

Sin embargo, los experimentos desarrollados por ellos fueron realizados en plantas verdes mientras que el presente experimento fue desarrollado en albahaca morada lo que puede explicar que debido al tipo de cultivo existen variaciones en la producción de metabolitos secundarios obtenidos en este experimento.

Tabla 5. Resultado de las mediciones fitoquímicas.

	Contenido de fenoles (mg equivalente de ácido gálico/g de muestra seca)	Contenido de flavonoides(mg de hidrato de catequina/g de muestra)	Capacidad antioxidante DPPH (mg de trolox/g de muestra seca)	Capacidad antioxidante ABTS (porcentaje de inhibición)	Clorofila a	Clorofila b
T1	422.8±0.0036a	120.7±0.0007a	1836.9±0.0068a	66.4±1.3704a	30.8±0.2676a	42.3±0.1396a
T2	351.5±0.0055a	106.2±0.0023a	2034.9±0.0104a	42.3±3.1837c	31.2±0.1464a	41.6±0.3316a
T3	447.6±0.0051a	126.8±0.0020a	1897.0±0.0036a	75.6±0.4754d	31.3±0.1713a	43.1±0.2011a
T4	273.4±0.0052a	106.6±0.0008a	1890.5±0.0044a	74.9±0.2503d	31.6±0.5028a	41.8±0.1475a
T5	277.2±0.0086a	74.4±0.0013a	42.2±0.0101c	74.2±1.3891ad	31.3±0.2680a	41.7±0.5728a
T6	374.0±0.0043a	115.8±0.0028a	1699.6±0.0073a	57.1±2.5154b	31.6±0.1873a	41.5±0.1772a
T7	661.6±0.0174b	317.1±0.0089b	1560.0±0.0220b	101.5±0.5296e	31.0±0.1622a	41.8±0.6073a

a, b, c, d en la misma columna por medición muestran diferencia significativa por tiramientos ($P < 0.05$). Las mediciones se muestran como promedio \pm error estándar.

6.3 Mediciones Enzimáticas

La tabla 6 muestra la capacidad antioxidante enzimática, se observó una baja presencia de SOD entre los tratamientos indoor, sin embargo, el TC si tiene una diferencia significativa lo que quiere decir que el TC sostuvo una mayor cantidad de estrés y generaba más especies reactivas de oxígeno (EROs). Por otra parte, la actividad CAT en los tratamientos T2 y T4 presentaron una mayor presencia de esta enzima a comparación de los otros tratamientos lo que quiere decir que la calidad de la luz propicia la generación de oxígeno y peróxido de hidrógeno. Los resultados obtenidos difieren con lo dicho por Lan et al., (2023), quienes mencionan que al interactuar la combinación de luz roja y radiación UV-A y UV-B con la planta de trigo negro tienen un aumento en la presencia de las encimas SOD, mientras que por otro lado concuerda con el incremento de CAT bajos diferentes sistemas de iluminación siendo fundamental longitudes de onda específicas para la presencia de esta enzima. Por último, la presencia de la enzima PAL tiene que ver con la generación de compuestos fenólicos observando una mayor presencia en T2 y TC. Los resultados obtenidos difieren con Lan et al., (2023), quien dice que bajo las condiciones de luz roja y radiación UV-A y UV-B presentó una regulación positiva debido a que en donde se presentó una mayor cantidad fue en los tratamientos con luz fluorescente. No se han realizado análisis de la actividad antioxidante enzimática en plantas de albahaca morada inducidas por luz, por lo que podemos observar que los tratamientos que contienen todas las longitudes de onda como los son los tratamientos T2, T4, T6 y T7 son los que tienen una mayor presencia de CAT con esto podemos suponer que longitudes de onda específicas son las que activan esta enzima en esta variedad de albahaca. Por otra parte, SOD no se encuentra en los tratamientos indoor pero si en el de invernadero lo que nos quiere decir que esta enzima pudo ser activada por algún otro agente externo debido a que dentro de los tratamientos indoor se tenía controlado los factores como es la humedad y la temperatura. Por último, la enzima PAL puede variar entre los tratamientos ya que no se sabe en qué etapa

se encuentra al momento de realizar la cosecha, sin embargo, podemos observar que si presento una relación con la generación de los compuestos fenólicos.

Tabla 6. Resultado de las mediciones enzimáticas.

	Superóxido dismutasa (SOD)	Catalasa (CAT)	Fenilalanina-amonió liasa (PAL)
T1	0.000913945±0.0003a	0.044589329±0.0013a	0.326793566±0.0138bc
T2	0.000735009±0.0001a	0.131192442±0.0134b	0.500749878±0.0026ab
T3	0.003505855±0.0006a	0.041289682±0.0008a	0.289708071±0.0030ab
T4	0.000789284±7.65081E-05a	0.11026311±0.0130b	0.344458366±0.0421bc
T5	0.00198154±0.0002a	0.031824739±0.0008a	0.31183516±0.0033ab
T6	0.001720159±9.95686E-05a	0.054507303±0.0024a	0.223035815±0.0078a
TC	0.034047928±0.0016b	0.034142807±0.0003a	0.494187259±0.0001cd

a, b, c, d en la misma columna por medición muestran diferencia significativa por tratamientos ($P<0.05$). Las mediciones se muestran como promedio \pm error estándar.

6.4 Producción de aceite esencial

La producción de aceite esencial en albahaca morada variedad red opal después de 50 días de exposición, se observó una diferencia significativa entre el tratamiento T6 y el resto de tratamientos ya que como se puede observar en la figura 13 el tratamiento T6 es el que mayor cantidad genero sin embargo es crucial observar que por poca que sea la diferencia las plantas bajo luz blanca (fluorescente) son las que mayor producción de aceite tienen, con lo que podemos observar que tanto el Fotoperiodo como la calidad de la luz juega un papel

importante en la producción de aceite en esta variedad de albahaca. La calidad de la luz es de suma importancia en la producción de aceite esencial en plantas aromáticas, afectando tanto la planta como el perfil químico del aceite (becerril 2021). En este estudio se observó que la luz blanca bajo un fotoperiodo de 20 horas fue en la que se observó una mayor producción de aceite esencial lo que difiere con Sarfanaz et al., (2023) el cual menciona que se obtiene una mayor producción de aceite esencial en tratamientos donde predomine la luz roja. Adicionalmente Amaki et al., (2011), menciona que bajo condiciones de iluminación azul se obtiene una mayor cantidad de aceite esencial, sin embargo, se sabe que la luz blanca (fluorescente) contiene todas las longitudes de onda por lo que podría ser un factor importante para la producción de aceite en esta variedad de albahaca. Es importante mencionar que las especies utilizadas en los experimentos son comúnmente verdes mientras que para este experimento se utilizó albahaca morada la cual puede requerir de otro tipo de longitudes.

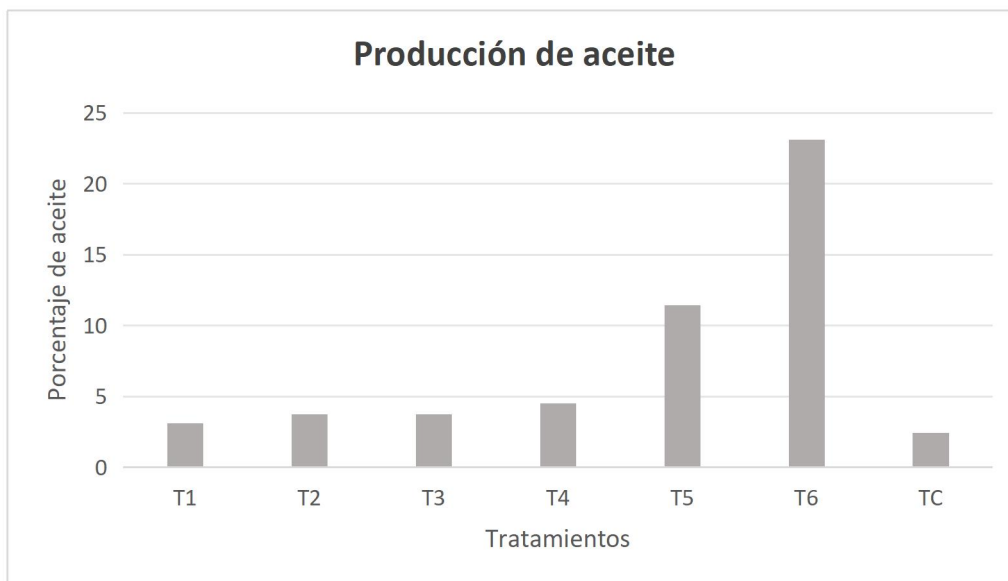


Figura 12. Porcentaje de producción de aceite esencial.

7. Conclusión

En el presente trabajo se puede concluir que el T2 es aquel que se asemeja más al tratamiento control (TC) en la producción de metabolitos secundarios, sin embargo, en los análisis fisiológicos no existe diferencia significativa.

Por otra parte el T6 es el que mayor cantidad de aceite esencial produjo mostrando que además del fotoperiodo también la calidad de la luz juega un papel importante en la producción de los compuestos secundarios y de la producción del aceite esencial.

Para la producción de albahaca morada en condiciones controladas (indoor) se requieren más estudios de las longitudes de onda específicas que propicien el desarrollo de antocianinas, ya que son las encargadas de dar ese color característico de esta variedad de albahaca.

Se ofrece información fundamental acerca del diseño de una lámpara LED, teniendo en cuenta la cantidad de luz que cada LED puede generar según su longitud de onda principal. Esta información resulta útil para el desarrollo de futuros sistemas de iluminación artificial.

8. Referencias Bibliográficas

- Agexport. (2020). Albahaca, *Ocimum basilicum*. Unión Europea.
- Aguirre-Becerra, H., Vázquez-Hernández, M. C., O, D. S., Alvarado-Mariana, A., Guevara-González, R. G., García-Trejo, J. F., & Feregrino-Pérez, A. A. (2021). Role of stress and defense in plant secondary metabolites production. *SpringerLink*, 151-195.
- Amaki, W. Y. (2011). EFFECTS OF LIGHT QUALITY ON THE GROWTH AND ESSENTIAL OIL CONTENT IN SWEET BASIL. *Acta Horticulturae*, 91-94.
- Ampofo, J., Ngadi, M., Ramaswamy, H.S. Elicitation kinetics of phenolics in common bean (*Phaseolus vulgaris*) sprouts by thermal treatments. *Legume Sci.* 2020, 2, e56.
- Arrollo, R. y Jiménez, R. V. (2013). Tecnología LED para un programa mejorado de luz sustentable. *Mundo Siglo XXI*.
- Morales Becerril, C. D. J. (2021). La calidad de la luz y la relación con el crecimiento y metabolismo secundario en *Thymus vulgaris* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).
- Bian, Z. H. (2015). Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(5), 869-877.
- Bures, S., Gavilan, M. U., y Kotiranta, S. (2018). Iluminación artificial en agricultura. *Artículo técnico Cultivo/Tecnología*, 4-17.
- Caicedo-López, L. H., Aranda, A. L., O, D. S., Gómez, C. E., Márquez, E. E., y Zepeda, H. R. (2021). Elicidores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana. Scielo.
- Cakmak, I. y Horst, W.J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiol. Plant.* 1991, 83, 463–468.
- Carbajal-Valenzuela, I. A., Guzmán-Cruz, R., González-Chavira, M. M., Medina-Ramos, G., Serrano-Jamaica, L. M., Torres-Pacheco, I., y Guevara-González, R. G. (2022). Response of plant immunity markers to early and late application of extracellular DNA from different sources in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Agriculture*, 12(10), 1587.
- Carvalho, S. D., Schwieterman, M. L., Abrahan, C. E., Colquhoun, T. A., y Folta, K. M. (2016). Light Quality Dependent Changes in Morphology, Antioxidant Capacity, and Volatile Production in Sweet Basil (*Ocimum basilicum*). *Frontiers in Plant Science*.

- Casierra-Posada, F., y Peña-Olmos, J. E. (2015). Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas. *Revista de la academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 84-87.
- Chávez Soto, D. Y., Vázquez Armijo, J. F., Hernández Meléndez, J., Martínez González, J. C., Esparza Jiménez, S., y Lopez Aguirre, D. (2021). Los Aceites Esenciales En Los Pequeños Rumiantes Y Su Efecto Sobre La Productividad. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(2).
- Chutimanukul, P., Wanichananan, P., Janta, S. et al. La influencia de diferentes espectros de luz en las respuestas fisiológicas, la capacidad antioxidante y las composiciones químicas en dos cultivares de albahaca sagrada. *Sci Rep* 12 , 588 (2022).
- Colorado, F., I. M. (2013). Crecimiento y desarrollo de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) bajo cubierta en la sabana de Bogotá. Scielo.
- Dickerson, D.P., Pascholati, S.F., Hagerman, A.E., Butler, L.G., Nicholson, R.L. Phenylalanine ammonia-lyase and hydroxycinnamate: CoA ligase in maize mesocotyls inoculated with *Helminthosporium maydis* or *Helminthosporium carbonum*. *Physiol. Plant Pathol.* 1984, 25, 111–123.
- Dueñas-García H.V, Burgos-Briones G.A, Bermello-Ochoa S.J, Alcívar-Cedeño U.E. (2020). Encapsulado de aceite esencial de albahaca morada (*Ocimum sanctum*) aplicado como agente antimicrobiano, en queso criollo y pasteurizado. *Ciencias administrativas y empresariales*.
- Espinosa-Barrera, L., y Chávez-Sahagún, E. (2019). El otro genoma de las plantas: los cloroplastos y su ADN. Desde El Herbario CICY, 11, 201–206. http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/2019
- Farías, Camila, Cisternas, Camila, Morales, Gladys, Muñoz, Loreto, y Valenzuela, Rodrigo. (2022). Albahaca: Composición química y sus beneficios en salud. *Revista chilena de nutrición*, 49(4), 502-512. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182022000500502>
- Flores, M., Gonzales, E., Escalona V. (2020). *Respuestas de las plantas frente al estímulo lumínico*. Universidad de Chile.
- Juárez-Rosete CR., Aguila-Castillo JA., Juárez-Rosete ME., Bugarín-Montoya R., Juárez-Lopez P y Cruz Crespo E. (2013). Hierbas Aromaticas y medicinales en Mexico: Tradicion e innovacion. *Biociencias*.
- Hadwan, M. H. (2018). Simple spectrophotometric assay for measuring catalase activity in biological tissues. *BMC Biochemistry*, 19, 1-8.
- Hernández-Navarrete C. E. y Aguirre-Becerra H. (2024). La luz y su efecto en las plantas. *Elementos BUAP*. No. 136, Vol. 31. pp. 17-22.

- Hernández, R., Kubota, C., 2012. Tomato seedling growth and morphological responses to supplemental LED lighting red: blue ratios under varied daily solar light integrals, VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956, pp. 187-194
- García, A.Á., Carril, E.P.-U., 2011. Metabolismo secundario de plantas. Reduca (Biología) 2.
- Gómez, C., Mitchell, C.A., 2015. Growth responses of tomato seedlings to different spectra of supplemental lighting. HortScience 50, 112-118.
- Gomez, S. B., y Herrera, H. J. R. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. *Ingeniería investiga*, 4.
- González, R. G., Aranda, A. L., Jiménez, N. I., y Roséndiz, M. M. (2020). *Elicidores en la agricultura. Bases teóricas y algunas aplicaciones*. Almería: Universidad de Almería.
- Jenkins, G. I. (2014). The UV-B Photoreceptor UVR8: From Structure to Physiology. *The Plant Cell*, Pages 21–37.
- Lan, H., Wang, C., Yang, Z., Zhu, J., Fang, W., & Yin, Y. (2024). El impacto de los tratamientos de iluminación en la biosíntesis de ácidos fenólicos en plántulas de trigo negro. *Alimentos*, 13(16), 2499.
- Lin, K.-H., Hsu, M.-H., y Huang, M.-Y. (2021). Morphological and physiological response in green and purple basil plants (*Ocimum basilicum*) under different proportions of red, green, and blue LED lightings. *EL SEVIER*.
- Lyu, K. (2021). *EyouAgro protecting corps*. Obtenido de <https://es.eyouagro.com/blog/6-beneficios-UV/#:~:text=La%20luz%20UV%20DA%20mejora,las%20plantas%20en%20un%2012%25.&text=Mejora%20los%20niveles%20de%20crecimiento>.
- Meisel, L. A., Urbina, D. C., y Pinto, M. E. (2011). Fotorreceptores y Respuestas de Plantas a Señales Lumínicas. *Fisiología Vegetal (F.A. Squeo & L. Cardemil, eds.)*, 2-10.
- Moncayo Luján, M. R., De paul Álvarez, V. (2015). Producción orgánica de albahaca en invernadero en Comarca Lagunera. *scielo*.
- Moon, J.-K., Shibamoto, T., 2009. Antioxidant assays for plant and food components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 1655-1666.
- Neo, D. C. J., Ong, M. M. X., Lee, Y. Y., Teo, E. J., Ong, Q., Tanoto, H., ... y Suresh, V. (2022). Conformación y ajuste de las condiciones de iluminación en la agricultura de ambiente controlado: una revisión. *AEC Ciencia y Tecnología Agrícola*, 2(1), 3-16.

- Ofelia Sam, M. d. (2002). Caracterización anatómica de las hojas de la albahaca blanca (*Ocimum basilicum* L.). *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 39-42.
- Oomah, B., Cardador, A., Loarca, G. Fenólicos y actividades antioxidantes en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L). *J. 2005; 85: 935-942*
- Olvera-Novoa, M.A., Martínez Palacios, C., Real de León, E., 1993. Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos. México: FAO.
- PauletteChaux-Terán, M., Vivar-Montaño, K. S., Gresely-Santi, F. A., LeonardoRobles-Hidrovo, J., González-Quiñonez, L. A., & Erazo-Velasco, I. E. (2023). Análisis de optimización de la tecnología de iluminación en el sector público para la ciudad de Esmeraldas. *Engineering & technology studies*, 368-370.
- Páez, O. M., Flórez, R. V., y Guillermo, R.-G. J. (2021). Fundamentos de la floración mediada por luz y potencialidades de las mallas fotoselectivas y huellas espectrales en floricultura. En V. J. R, *Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia tecnología e innovación aplicada en Cundinamarca* (pág. 268 y 269). Cundinamarca: Unisalle.
- Paradiso, R., y Proietti, S. (2022). Manipulación de la calidad de la luz para controlar el crecimiento de las plantas y la fotomorfogénesis en la horticultura de invernadero: el estado del arte y las oportunidades de los sistemas LED modernos. *Journal of Plant Growth Regulation* , 41 (2), 742-780.
- Pellegrini, N., Proietti, S., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic Biol Med.* 1999; 26 (9-10):1231-7.
- Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, A., Spinelli, F., Nicola, S., Marcelis, L. F. (2020). Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Elsevier*.
- Rangel Osorio, J., y Orozco Villafuerte, J. (2014). Establecimiento de cultivos in vitro de albahaca (*ocimum basilicum*) para la producción de aceite esencial.
- Reyes-Pérez J.J, Ramírez Gaybor A. (2016). Respuesta de variedades de ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.) a la salinidad en las etapas iniciales de crecimiento. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 65-72.
- Romero-Bastidas, M., Nieto-Garibay, A., Hernández-Montiel, L. G., Troyo-Diéguez, E., Ramírez-Serrano, R., Y Murillo-Amador, B. (2016). Acondicionamiento térmico de semillas en la germinación, emergencia, vigor y etapa vegetativa de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Nova scientia*, 8(16), 181-212. Recuperado en 11 de diciembre de 2023, de

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052016000100181&lng=es&tlng=es.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052016000100181&lng=es&tlng=es)

- Ruiz, C., Díaz, C., y Rojas, R. (2015). Composición química de aceites esenciales de 10 plantas aromáticas peruanas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(2), 81-94.
- SADER (29 de junio de 2023). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/hablemos-de-la-agricultura-en-mexico-parte-1>
- Sarfaraz, D., Rahimmalek, M., Sabzalian, M. R., Gharibi, S., Matkowski, A., y Szumny, A. (2023). Composición del aceite esencial y actividad antioxidante del orégano y la mejorana según los efectos de diferentes diodos emisores de luz. *MDPI*.
- SENASICA. (14 de diciembre de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/senasica/articulos/conoce-que-es-la-agricultura-prottegida?idiom=es#:~:text=La%20agricultura%20prottegida%20es%20aquella,cli ma%20ocasionan%20a%20los%20cultivos>.
- Shafiq, I., Hussain, S., Raza, M. A., Iqbal, N., y Asghar, M. A. (2021). Respuesta fotosintética de cultivos a la calidad e intensidad de la luz. *ScienceDirect*.
- Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture* 16, 144-158.
- Sipos, L., Balázs, L., Székely, G., Jung, A., Sárosi, S., Radácsi, P. y Csambalik, L. (2021). Optimización de la producción de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en entornos con iluminación LED: una revisión. *Scientia Horticulturae*, 289, 110486.
- Stapleton, A. E. (1992). *Ultraviolet Radiation and Plants: Burning Questions*. American Society of Plant Physiologists.
- Strickland, J.D., Parsons, T.R., 1972. *A practical handbook of seawater analysis*.
- Sutulienė, R., Laužikė, K., Pukas, T., & Samuolienė, G. (2022). Effect of light intensity on the growth and antioxidant activity of sweet basil and lettuce. *Plants*, 11(13), 1709.
- Vázquez-Hernández, M., Parola-Contreras, I., Montoya-Gómez, L., Torres-Pacheco, I., Schwarz, D., Guevara-González, R., 2019. Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production. *Scientia Horticulturae* 250, 223-229.
- Vélez-Carranza M.C, Burgos-Briones G.A, Alcívar-Cedeño U.E. (2021). Diseño de una planta a escala piloto para la producción de aceite esencial de Albahaca Morada (*Ocimum Sanctum*) para su uso en la industria alimentaria. *Ciencias Técnicas y Aplicadas*

- Villaverde, I. C. (2018). Optimización de la extracción de aceites esenciales por destilación en corriente de vapor. Universidad Politécnica de Madrid.
- Vodnik, D., Vogrin, Ž., Šircelja, H., Grohar, M. C., Medič, A., y be, K. C.-S. (2023). Phenotyping of basil (*Ocimum basilicum* L.) illuminated with UV-A light of different wavelengths and intensities. *ScienceDirect*.
- Xiao-Xue, F., Xu, Z.-G., Liu, X.-Y., Tang, C.-M., Wang, L.-W., y Han, X.-I. (2013). Efectos de la intensidad de la luz sobre el crecimiento y desarrollo foliar de plantas jóvenes de tomate cultivadas bajo una combinación de luz roja y azul. *ScienceDirect*.
- Xuedong P., Zhou Hong, Li Xu, Wang Wenhai, Huang Huahong (2011). Led lamp for tissue culture of arethusa (China patent No. WO2011091760A1). <https://patentimages.storage.googleapis.com/7b/c3/92/65a0731e119528/WO2011091760A1.pdf>
- Zita, A. 2020. ¿Qué es la fotosíntesis? Proceso y fases (en línea, sitio web). Consultado 24 oct. 2023. Disponible en <https://www.todamateria.com/fotosintesis/>.