



Enseñar la explotación de la tierra,
no la del hombre

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

LA CALIDAD DE LA LUZ Y SU RELACIÓN CON EL CRECIMIENTO Y METABOLISMO SECUNDARIO EN *Thymus vulgaris*.

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

CARLOS DE JESÚS MORALES BECERRIL

Bajo la supervisión de: **DRA. MARÍA TERESA COLINAS LEÓN**

Chapingo, Estado de México.
Diciembre de 2021



APROBADA



Instituto de Horticultura

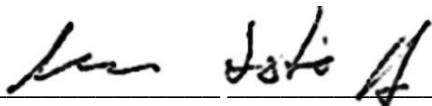
**LA CALIDAD DE LA LUZ Y SU RELACIÓN CON EL CRECIMIENTO Y
METABOLISMO SECUNDARIO EN *Thymus vulgaris*.**

Tesis realizada por **Carlos de Jesús Morales Becerril** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTORA: 

Dra. María Teresa Colinas León

ASESOR: 

Dr. Ramón Marcos Soto Hernández

ASESORA: 

Dra. María Teresa Martínez Damián

ASESOR: 

M. C. Guillermo Mendoza Castelán

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1	Fuentes consultadas.....	3
2	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1	La calidad de la luz induce cambios en el crecimiento y metabolismo secundario vegetal	5
2.1.1	La calidad de la luz y los fotorreceptores vegetales.....	7
2.1.2	La calidad de la luz y el crecimiento vegetal	8
2.1.3	La calidad de la luz y el metabolismo secundario	15
2.2	El tomillo y la respuesta de las lamiaceas a ambientes luminosos controlados.....	22
2.2.1	El Tomillo	22
2.2.2	Usos en la medicina tradicional.....	22
2.2.3	Reportes clínicos y farmacológicos.....	23
2.2.4	Composición química y biosíntesis	25
2.2.5	Influencia de la calidad de la luz en el crecimiento y metabolismo secundario en especies de la familia Lamiaceae	27
2.3	Fuentes consultadas.....	29

3	LA CALIDAD DE LUZ EN EL CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN TOMILLO <i>Thymus vulgaris</i>	38
4	DIFERENCIAS EN LUZ INCIDENTE AFECTAN LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE ESENCIAL EN PLANTAS DE TOMILLO	57

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ejemplos del efecto de tratamientos con luz LED de diferentes colores sobre el crecimiento vegetal.....	9
Cuadro 2. Ejemplos del efecto de tratamientos con luz LED de diferentes colores sobre el metabolismo secundario de diversas especies.	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Enzimas de la ruta del ácido shikímico influenciadas por la calidad de la luz	19
Figura 2. Ruta biosintética de los monoterpenos principales del tomillo.	26

DEDICATORIA

A mis padres: **Luz María y Margarito.**

A mi hermana: **Jazmín Alejandra.**

A mis amigos y a todas las personas que, con su paso por mi vida, han contribuido a la formación de mi ser.

AGRADECIMIENTOS

A la **Doctora María Teresa Colinas León**, quien dirigió el presente trabajo y quien desde hace algunos años ha contribuido en gran medida a mi formación profesional.

Al **Doctor Ramón Marcos Soto Hernández**, asesor de este trabajo y quien me ha involucrado en la pasión por la investigación fitoquímica. Así mismo agradezco a su equipo de trabajo por los apoyos brindados durante la fase de análisis en laboratorio, en especial al **M.C. Rubén San Miguel Chávez** y el **Sr. Domingo González Meraz**.

A la **Doctora María Teresa Martínez Damián**, asesora del presente trabajo, por su disponibilidad y atenciones.

Al **Doctor Guillermo Mendoza Castelán**, asesor de este trabajo, por su disponibilidad, apoyo y por guiarme en el estudio de las plantas medicinales.

Al **Ingeniero Cecilio Bautista Bañuelos**, por su apoyo durante la fase experimental del presente trabajo.

A los profesores y a la Coordinación de Posgrado del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Carlos de Jesús Morales Becerril

Fecha de nacimiento: 2 de octubre de 1996

Lugar de nacimiento: Martínez de la Torre, Veracruz

CURP: MOBC961002HVZR01

Profesión: Ingeniero Agrónomo

Cedula profesional: 12193267



Desarrollo académico

Preparatoria: Telebachillerato “Almanza”, cursando la orientación terminal
“Químico-Biológicas”. 2011-2014.

Licenciatura: Universidad Autónoma Chapingo, Ingeniería Agronómica
Especialista en Fitotecnia. 2014-2019.

Maestría: Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ciencias en
Horticultura. 2020-2021.

RESUMEN GENERAL

LA CALIDAD DE LA LUZ Y SU RELACIÓN CON EL CRECIMIENTO Y METABOLISMO SECUNDARIO EN *Thymus vulgaris*.

En los últimos años el uso de la luz LED ha permitido el desarrollo de modernos sistemas de producción vegetal caracterizados por la obtención de mayores rendimientos, calidad e inocuidad. Sin embargo, el estudio de las respuestas de diversas especies al someterse a cambios en las características de la luz LED aún está en crecimiento. El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de cambios en la calidad de la luz (color) provista por LEDs, en el crecimiento y metabolismo secundario de plantas de tomillo (*Thymus vulgaris*). Se estableció un experimento donde se aplicaron cinco tratamientos de luz (luz blanca, roja, azul, 75% roja – 25% azul y 25% roja, 75% azul) a $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 16 h de fotoperiodo, sobre 10 plantas de tomillo aisladas de la luz solar y de los tratamientos vecinos, durante 35 días; evaluándose al finalizar, características del crecimiento, acumulación de compuestos fenólicos (C.F.) y composición del aceite esencial (A.E.). Los resultados mostraron que la luz roja monocromática o en alta proporción incrementa el crecimiento, pero reduce la acumulación de materia seca, clorofilas y C.F. contrastada con la luz blanca, azul monocromático y en alta proporción. Respecto a la composición del A.E. el presente experimento resulto en cambios notables respecto a lo reportado por la literatura; así mismo, se observó que la mayor concentración de timol (compuesto principal del A.E. de tomillo) fue máxima en los tratamientos con luz blanca y 75% roja – 25% azul. Se concluye que cambios en la calidad de la luz incidente provista por LEDs, causan cambios en el crecimiento y metabolismo secundario de tomillo, que pueden ser aprovechados para el diseño de sistemas de producción vegetal de alta eficiencia.

Palabras clave: *Thymus vulgaris*, luz LED, producción de interior.

GENERAL ABSTRACT
LIGHT QUALITY IN RELATION TO GROWTH AND SECONDARY
METABOLISM OF *Thymus vulgaris*

In recent years, the use of LED light has allowed the development of modern plant production systems characterized by obtaining higher yields, quality and safety. However, the study of many species responses to changes of LED light characteristics is still growing. The objective of this work is to evaluate the effect of changes in light quality provided by LEDs, in the growth and secondary metabolism of thyme plants (*Thymus vulgaris*). In the experiment five light treatments were applied (white, red, blue, 75% red - 25% blue and 25% red, 75% blue) at 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and 16 h photoperiod, on 10 thyme plants isolated from sunlight and neighboring treatments, for 35 days; growth characteristics, accumulation of phenolic compounds (F.C.) and essential oil (E.O.) composition were evaluated. Results showed that monochromatic or high proportion red light increases growth, but reduces dry matter, chlorophylls and F.C. accumulation contrasted with white light, monochromatic blue and in high proportion. Regarding the E.O. composition the present experiment resulted in notable changes respect to reports in literature; Likewise, it was observed that thymol (main compound of thyme E.O.) highest concentration was maximum in white light and 75% red - 25% blue treatments. It is concluded that changes in the incident light quality provided by LEDs cause changes in the growth and secondary metabolism of thyme plants, which can be used for the design of high-efficiency plant production systems.

Key words: *Thymus vulgaris*, LED light, indoor production

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Los reportes de la FAO sobre el crecimiento poblacional en los próximos años, muestran que en 30 años la población mundial habrá crecido 34% y cerca del 70% de ella vivirá en áreas urbanas. Esto, combinado con el efecto del cambio climático crea una visión de un futuro en donde la producción de alimentos deberá modernizarse y adaptarse a tales condiciones.

Recientemente la luz LED se ha consolidado como complemento o sustituto de la luz natural, para ser usada en horticultura. Se ha demostrado que, proveer a la planta de la luz específica (calidad o longitud de onda) que requiere para realizar el proceso de fotosíntesis y fotomorfogénesis, incrementa considerablemente la eficiencia en el uso de ésta, así como de agua y nutrientes, promoviéndose una mayor producción de biomasa e incrementándose la calidad comercial (Alrifai, Hao, Marcone & Tsao, 2019; Casierra y Peña, 2015; Danziger & Bernstein, 2021; Fukuda, 2013). Estos descubrimientos han permitido el desarrollo de técnicas de producción vegetal en espacios cerrados (Gupta & Agarwal, 2017; Massa, Wheeler, Morrow & Levine, 2016; Morrow, 2008), donde la mayoría de los factores ambientales son controlados, en especial la luz (p.e. cuartos de producción o bio-fábricas), mismos, que contribuyen al desarrollo de una agricultura caracterizada por: 1) elevada producción de material vegetal en áreas muy reducidas, siendo entonces, muy eficiente el uso de suelo; 2) cero uso de pesticidas; 3) alta eficiencia en el uso de agua y fertilizantes, ya que utiliza sistemas hidropónicos de alta eficiencia, y 4) plantas con mayor inocuidad y de rápida disponibilidad, gracias a que estos sistemas de producción están altamente mecanizados y establecidos, usualmente, cerca de los consumidores.

Experimentos recientes han demostrado que, además de eficientizar la producción de biomasa, es posible manipular la producción de metabolitos secundarios utilizando diferentes longitudes de onda e intensidades lumínicas (Alrifai *et al.*, 2019; Fukuyama, Ohashi-Kaneko & Watanabe, 2015; Ichimura, Watanabe, Amaki & Yamazaki, 2009; Nishimura, Zobayed, Kozai & Goto, 2007;

Noguchi & Amaki, 2016), lo que abre una vía para incursionar en el uso de la luz LED, por ejemplo, en la producción de plantas medicinales.

Los metabolitos secundarios de especies vegetales han sido utilizados a lo largo de la historia con múltiples fines en beneficio de la humanidad, a tal grado que muchas especies han sido cultivadas con la finalidad de explotar sus características químicas (Avalos y Pérez, 2009); ejemplo de estas son las plantas medicinales, mismas que ejercen su efecto curativo gracias a las moléculas características de su composición química (Mendoza y Lugo, 2010).

El ámbito agronómico puede contribuir a desarrollar técnicas de producción vegetal que permitan aprovechar el potencial genético en combinación con el manejo ambiental, para obtener plantas con características específicas muy homogéneas. Se han desarrollado varios métodos enfocados a producción y explotación de metabolitos secundarios de plantas medicinales, especialmente en aquellas que han demostrado ejercer efectos contra enfermedades específicas o en las que se sabe, producen un fitoquímico de interés. Con la finalidad de incidir en el área de la agronomía mencionada, se establece la meta del presente trabajo: Contribuir con información técnica y científica al naciente desarrollo de métodos de producción agrícola que utilizan a los LED como fuente de energía luminosa que sustituye o complementa a la luz solar, para el crecimiento de plantas con buenas características nutracéuticas, fitoquímicas y otras que resultan de interés para la humanidad. Particularmente se espera contribuir al conocimiento sobre la aplicabilidad de estos métodos de producción sobre tomillo y el mejoramiento de su calidad química.

El tomillo (*Thymus vulgaris*) es una popular especie que pertenece a la familia Lamiaceae, nativa del Mediterráneo y que, debido a sus innumerables usos culinarios y medicinales ha sido distribuida hacia gran parte de mundo (Hosseinzadeh, Jafarikukhdan, Hosseini & Armand, 2015). Se ha comprobado que tales propiedades se deben a los metabolitos secundarios que produce, mismos que están representado por el timol y carvacrol, moléculas principales en el aceite esencial de esta especie (Soković *et al.*, 2009).

La extensa investigación realizada acerca de la fitoquímica de esta planta, su amplia distribución y su fácil cultivo, la posicionan como una buena candidata para establecer experimentos con luz LED. El objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto de la luz LED roja y azul en diferentes proporciones, así como la luz blanca, sobre el crecimiento y metabolismo secundario de *Thymus vulgaris*.

1.1 Fuentes consultadas

- Alrifai, O., Hao, X., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2019). Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(22), 6075-6090.
- Avalos-García, A., & Pérez-Urria Carril, E. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología)*, 2(3).
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J. (2015). Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 29(supl): 84-92.
- Danziger, N., & Bernstein, N. (2021). Light matters: Effect of light spectra on cannabinoid profile and plant development of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Industrial Crops and Products*, 164, 113351.
- Fukuda, N. (2013). Advanced light control technologies in protected horticulture: A review of morphological and physiological responses in plants to light quality and its application. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*. 8: 32-40.
- Fukuyama, T., Ohashi-Kaneko, K., & Watanabe, H. (2015). Estimation of Optimal Red Light Intensity for Production of the Pharmaceutical Drug Components, Vindoline and Catharanthine, Contained in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Environmental Control in Biology*, 53(4), 217-220.
- Gupta, S. D., & Agarwal, A. (2017). Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In *Light emitting diodes for agriculture* (pp. 1-25). Springer, Singapore.
- Hosseinzadeh, S., Jafarikukhdan, A., Hosseini, A., & Armand, R. (2015). The application of medicinal plants in traditional and modern medicine: a review of *Thymus vulgaris*. *International Journal of Clinical Medicine*, 6(09), 635.
- Ichimura, M., Watanabe, H., Amaki, W., & Yamazaki, N. (2009, November). Effects of light quality on the growth and essential oil content in sweet

- basil. In *VI International Symposium on Light in Horticulture 907* (pp. 91-94).
- Massa, G. D., Wheeler, R. M., Morrow, R. C., & Levine, H. G. (2016, May). Growth chambers on the International Space Station for large plants. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 215-222).
- Mendoza-Castelán, G. y Lugo-Pérez, R. 2010. *Farmacia Viviente: Conceptos, Reflexiones y aplicaciones*. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Nishimura, T., Zobayed, S. M., Kozai, T., & Goto, E. (2007). Medicinally important secondary metabolites and growth of *Hypericum perforatum* L. plants as affected by light quality and intensity. *Environmental Control in Biology*, 45(2), 113-120.
- Noguchi, A., & Amaki, W. (2016, May). Effects of light quality on the growth and essential oil production in Mexican mint. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 239-244).
- Soković, M. D., Vukojević, J., Marin, P. D., Brkić, D. D., Vajs, V., & Van Griensven, L. J. (2009). Chemical composition of essential oils of thymus and mentha species and their antifungal activities. *Molecules*, 14(1), 238-249.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La calidad de la luz induce cambios en el crecimiento y metabolismo secundario vegetal

Debido a su carácter sésil y a la gran variación de las condiciones de iluminación, las plantas han tenido que desarrollar métodos a nivel celular y molecular para adaptarse a estos cambios ambientales. La radiación luminosa es la franja del espectro electromagnético que va desde los 400 a los 700 nm, puede ser aprovechada por las plantas y constituye la llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Fukuda, 2013). Las especies vegetales cultivadas responden a las diferentes formas de luz, refiriéndose esto a la longitud de onda, al flujo fotónico y a la combinación de ambas (Casierra y Peña, 2015); es así como, cambios en la intensidad o calidad de la luz inducen cambios en las reacciones de óxido-reducción (redox) de la cadena transportadora de electrones para la fotosíntesis, lo que desemboca en ajustes funcionales y estructurales de la fotosíntesis y el metabolismo (Casierra y Peña, 2015).

Se sabe que la calidad de la luz (entiéndase como longitud de onda o color) influye en el crecimiento, desarrollo y otros aspectos fisiológicos, mediante los procesos de fotosíntesis y fotomorfogénesis que son mediados internamente por moléculas capaces de absorber luz denominadas fotorreceptores (Samuoliené *et al.*, 2011). En la fotosíntesis, las clorofilas -que absorben luz azul y roja- cumplen un papel primario, mientras que, los carotenoides y antocianinas un papel secundario; en los procesos de fotomorfogénesis los fitocromos -absorben luz roja y roja lejana-, criptocromos -absorben luz azul y UV-A- y fototropinas -absorben luz en el mismo espectro que los criptocromos- son los fotorreceptores conocidos (Frankhauser & Chory, 1997; Kami, Lorrain, Hornitschek & Frankhauser, 2010). En este sentido, modificar la calidad de la luz que incide sobre las plantas cultivadas es una herramienta que permite modificar parte del funcionamiento vegetal para lograr una mejora en la calidad y cantidad de los productos cosechados.

Desde mediados del siglo pasado la investigación científica sobre el uso de luz artificial en la producción de plantas hortícolas comenzó a hacerse visible; los resultados de las primeras investigaciones llevaron a establecer el uso de la luz artificial como complemento a la luz natural en invernaderos de producción hortícola (Bian, Yang & Liu, 2014). El uso de la luz artificial en lugar de la luz natural comenzó a tener importancia en las denominadas “granjas verdes”, donde en condiciones cerradas se producen diversas plantas, especialmente condimentos de cocina, microgreens, plantas medicinales y forraje (Alrifai, Hao, Marcone & Tsao, 2019); en el mismo sentido, la NASA ha utilizado estas técnicas para producir hortalizas con la visión de establecerlas en condiciones extraterrestres (Massa, Wheeler, Morrow & Levine, 2016; Mickens *et al.*, 2018).

Las fuentes emisoras de luz han ido evolucionando constantemente, en sus inicios, la investigación científica sobre el papel de la luz en el crecimiento y desarrollo vegetal utilizó lámparas incandescentes, continuando con lámparas de sodio de alta presión (HPSL), lámparas de haluro metálico y lámparas fluorescentes, todas estas con una baja eficiencia en el uso de la energía eléctrica, dado que parte de la energía utilizada era disipada en forma de calor (Gupta & Agarwal, 2017). Actualmente los diodos emisores de luz -LED (light-emitting diode)- se han consolidado como una fuente primaria de radiación luminosa en programas de investigación y producción de plantas, debido principalmente a que presentan múltiples ventajas entre las que se encuentran: larga vida, volumen compacto, baja emisión de calor, ajustabilidad en la intensidad lumínica, alta eficiencia en la conversión de energía y una longitud de onda específica (Morrow, 2008). Cientos de experimentos han sido conducidos utilizando LEDs como fuentes de luminosidad, obteniéndose resultados interesantes y algunas veces contradictorios. Actualmente los conocimientos sobre los efectos de la calidad de la luz en la modificación de ciertos parámetros vegetales han sido utilizados en pro de los objetivos humanos, desarrollándose técnicas y tecnologías para producir alimentos vegetales con mayor rendimiento y calidad.

2.1.1 La calidad de la luz y los fotorreceptores vegetales

El papel de la luz en el crecimiento vegetal es complejo y está totalmente relacionado con los fotorreceptores vegetales. Usualmente se considera que, el papel de la luz es proporcionar a las plantas de la energía necesaria para llevar a cabo la síntesis de azúcares mediante el proceso que conocemos como fotosíntesis, sin embargo, su papel va más allá, siendo la luz responsable, en parte, de procesos que abarcan desde la germinación hasta la fructificación y senescencia. El rol de la luz como modulador de rutas metabólicas se basa en un sistema de señalización que inicia en los fotorreceptores y que incluye modificaciones en la expresión de miles de genes que a su vez generan una respuesta en la fisiología del organismo vegetal (Carvalho, Takaki & Azevedo, 2011).

Las plantas poseen distintos fotorreceptores sensibles a la luz ultravioleta-A, ultravioleta-B, azul rojo y rojo lejano y es a través de estos que pueden detectar la intensidad, calidad, dirección y duración de la luz (Ouzounis, Rosenqvist & Ottosen, 2015). Las clorofilas son los fotorreceptores más abundantes en la tierra (Carvalho *et al.*, 2011), caracterizadas por absorber luz azul (430 nm) y diversas tonalidades del rojo (Azcón-Bieto y Talón, 2013), estos cromóforos utilizan la energía captada para desencadenar el proceso de fotosíntesis. Por otro lado, los fitocromos (A, B, C, D y E) absorben principalmente en la región del rojo y rojo lejano del espectro electromagnético (Azcón-Bieto y Talón, 2013), poseen dos conformaciones fotorreversibles, la que absorbe luz roja denominada P_r (Phytochrome red) y otra que absorbe la luz roja lejana denominada P_{fr} (Phytochrome far red), siendo esta considerada la forma activa en las rutas de señalización que regulan la expresión genética (Möglich, Yang, Ayers & Moffat, 2010); a los fitocromos se les adjudica esencialidad en los procesos de germinación, desetiolación, elongación del tallo y floración; así mismo se ha demostrado su participación en el ajuste del crecimiento y desarrollo vegetal influenciado por el gravitropismo, fototropismo y el efecto huida de la sombra (Ouzounis, Rosenqvist & Ottosen, 2015); en el mismo sentido ha sido reportado su papel en la síntesis de algunos metabolitos

secundarios (Alrifai *et al.* 2019). Los criptocromos y fototropinas participan en conjunto con los fitocromos en muchos de los eventos que estos regulan (Casal, 2013); estos fotorreceptores responden a la luz en la franja del espectro electromagnético que va de UV-A al azul (Möglich *et al.*, 2010), ha sido reportado que los criptocromos participan en la apertura estomatal, la producción de biomasa y la síntesis de antocianinas, carotenoides y clorofilas; mientras que las fototropinas median las respuestas fototrópicas y modulan la elongación del tallo en respuesta a luz azul, antes de que se activen los criptocromos (Alrifai *et al.*, 2019).

En conjunto, los fotorreceptores dirigen el crecimiento y desarrollo vegetal, en función de la calidad de la luz que incide sobre la planta; por ejemplo, un individuo vegetal, que a la sombra de sus vecinos solo recibe una pequeña fracción de la luz solar que incide sobre la población y una alta proporción de la luz reflejada o transmitida por los órganos en las plantas vecinas, responderá a su ambiente luminoso de una manera diferente a un individuo expuesto totalmente a la luz solar (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Es así como en una planta sombreada que recibe una alta proporción rojo lejano (luz no utilizada por sus vecinas) / rojo (luz captada por sus vecinas), se activa el fitocromo y se da el efecto “huida de sombra” que le permitirá competir por luz con una calidad adecuada para llevar a cabo sus procesos metabólicos vitales.

2.1.2 La calidad de la luz y el crecimiento vegetal

Como se mencionó previamente, la exposición de plantas a ambientes lumínicos controlados, resulta en cambios en el rendimiento fotoquímico de estas, así como en su eficiencia fotosintética y por tanto en la síntesis de fotoasimilados que a su vez influyen directamente en el crecimiento y desarrollo vegetal. En las últimas décadas, el uso de la luz LED ha permitido experimentar sobre diferentes especies, contrastando el efecto de un color específico contra luz blanca o natural (cuadro 1).

Cuadro 1. Ejemplos del efecto de tratamientos con luz LED de diferentes colores sobre el crecimiento vegetal

Tratamiento	Especie	Respuesta	Referencia
Azul (20%) y Rojo (80%)	<i>Rosa X hybrida</i>	Incremento en la biomasa de las hojas y decremento en el área foliar y biomasa del tallo.	Terfa <i>et al.</i> (2012)
Rojo	<i>Raphanus sativus</i> L.	Débil elongación del hipocotilo y plantas elongadas	Samuoliené <i>et al.</i> (2011)
Azul con rojo lejano	<i>Chrysanthemum</i> sp.	Decrece la tasa fotosintética, incrementa el número de estomas, pero su tamaño disminuye.	Kim <i>et al.</i> (2004)
Azul (10-30%) y rojo	<i>Oncidium</i> sp.	Mayor acumulación de peso seco y proteínas.	Mengxi <i>et al.</i> (2011)
Azul, rojo y rojo lejano	<i>Oncidium</i> sp.	Mayor número de hojas, expansión foliar, contenido de clorofila y peso fresco y seco.	Chung <i>et al.</i> (2010)
Luz roja	<i>Hypericum perforatum</i>	Mayor altura, número de hojas, área foliar, peso seco, numero de ramas y numero de nudos por rama, comparado contra luz azul.	Nushimura, Zobayed, Kosai & Goto, 2006.
Luz azul	<i>Lactuca sativa</i>	Mayor densidad estomática y mayor tasa de asimilación de CO ₂ , comparado contra luz roja.	Muneer, Kim, Park & Lee (2005)
Luz azul suplementaria	<i>Lactuca sativa</i> L.	Incremento en la concentración de antocianinas, carotenoides y fenoles	Li & Kubota (2009)
Luz azul y roja suplementarias	<i>Diaffenbachia</i> sp.	Incremento en la altura de planta	Heo <i>et al.</i> (2010)
Luz azul suplementaria	<i>Kalanchoe</i> sp.	Decremento en el peso fresco de las hojas e incremento en el contenido de flavonoides.	Nascimento <i>et al.</i> (2013)
Luz azul	<i>Cymbidium</i> sp.	Reducción en el crecimiento foliar y aumento en el contenido de clorofila.	Tanaka <i>et al.</i> (1998)
Luz roja	<i>Cymbidium</i> sp.	Aumento en el crecimiento foliar y decremento en el contenido de clorofila.	Tanaka <i>et al.</i> (1998)
Luz roja	<i>Petunia</i> sp.	Plantas enanas con abundantes ramas laterales largas	Fukuda <i>et al.</i> (2009)
Luz azul	<i>Petunia</i> sp.	Plantas muy altas con flores	Fukuda <i>et al.</i>

Luz azul	Lechuga hoja roja	de	en el ápice. Aumento en el área foliar y peso seco de la parte aérea y de la raíz. Menor valor en la proporción tallo/raíz, así como en el contenido de clorofila. Mayor contenido de carotenoides.	(2009) Johkan, Shoji, Goto, Hashida & Yoshihara (2010)
Luz azul	<i>Plectranthus amboinicus</i>		Dominancia apical marcada. Hojas engrosadas y estrechas. En general, plantas compactas.	Noguchi & Amaki, (2016)
Luz roja	<i>Plectranthus amboinicus</i>		Disminución en la dominancia apical, notable ramificación lateral. Hojas con crecimiento epinástico. Plantas poco compactas.	Noguchi & Amaki, (2016)

Las respuestas en todos los casos fueron comparadas contra tratamientos con luz natural, luz LED blanca o lámparas fluorescentes.

Visto desde la perspectiva en que la luz azul y roja son las longitudes de onda utilizadas por los pigmentos fotosintéticos para generar la energía química que desencadena la síntesis de azúcares, es de esperar que la exposición de plantas a estas calidades de luz resulte en un incremento medible de dicho proceso vegetal. Saito, Shimizu, Nakashima, Miyasaka y Ohdoi (2010) trabajando con lechuga bajo tratamientos de luz led a flujo fotónico de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y concentración de CO_2 de 600 ppm, encontraron que bajo la luz roja monocromática la tasa fotosintética fue superior que en las plantas bajo luz azul monocromática y bajo una combinación de luz azul y roja (83.3% y 16.7% respectivamente); contrastando con estos resultados, Muneer, Kim, Park y Lee (2005) reportaron un incremento en la tasa de asimilación de CO_2 bajo el tratamiento con luz azul respecto a los tratamientos con luz roja y verde, de lechugas a 70 y 180 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. En rábano bajo tratamientos de luz a flujo fotónico de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se encontró que, la tasa de asimilación neta en las hojas a 50 días después de la germinación, es estadísticamente ($P \leq 0.05$) inferior bajo el tratamiento de luz roja monocromática que en los tratamientos que contenían luz azul (5 y 10%) (Samuolienė, Sirtautas, Brazaitytė, Sakalauskaitė, Sakalauskienė & Duchovskis, 2011), en este experimento no se probó el efecto de la luz azul monocromática. En plántulas de tomate bajo

tratamientos con luz LED azul y roja monocromáticas a $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se encontró que el valor la tasa de asimilación neta en el tratamiento bajo luz roja monocromática ($3.07 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es superior al valor medido bajo el tratamiento con luz azul monocromática ($1.75 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Hernández, Eguchi, Deveci & Kubota, 2016). Contrastando con estos resultados, también en jitomate, Lanoue, Leonardos y Grodzinski (2018) observaron un incremento en la tasa de asimilación de CO_2 al tratar las plantas con luz azul a $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, comparado contra el tratamiento con luz roja; el mismo efecto fue reportado en Tomate Cherry a $320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Xiaoying *et al.*, 2012).

Tal parece que la luz roja es menos eficiente para favorecer el proceso fotosintético que la luz azul, esto puede deberse a que la luz roja disminuye la síntesis de clorofilas y carotenoides (Hamdani *et al.*, 2019; Miao *et al.*, 2016) así como la síntesis de la enzima Rubisco (Muneer *et al.*, 2005), además de que disminuye el número de estomas y la conductancia estomática (Muneer *et al.*, 2005; Su, *et al.*, 2014; Lanoue, Leonardos & Grodzinski, 2018) por lo que el intercambio de CO_2 se ve reducido, y en conjunto, todas estas características reducen la asimilación de CO_2 . En el caso de la luz azul, esta promueve una mayor síntesis de clorofilas, pigmentos accesorios y una mayor densidad estomática, por lo que produce un efecto contrario al obtenido bajo luz roja.

Referente al crecimiento, este puede ser medido de diversas maneras, entre las más populares encontramos la altura y los pesos fresco y seco. En brócoli Paniagua-Pardo *et al.* (2015) observaron en una prueba de germinación bajo diversas calidades de luz LED a 550 luxes de intensidad que, la longitud media del hipocótilo fue mayor en el tratamiento bajo luz verde, seguido por los tratamientos con luz roja y luz blanca que no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí (LSD, 0.05) y mínima en el tratamiento con luz azul; el peso fresco fue mayor en los tratamientos bajo luz azul, roja y verde, y menor bajo luz blanca; mientras que en el peso seco no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos. Los autores adjudican la diferencia de crecimiento del hipocótilo a la acción de los criptocromos que, al

estar activos bajo la luz azul, roja y blanca, inhiben el crecimiento del hipocótilo (Wang & Folta, 2013). Resultados similares se obtuvieron en un experimento con plántulas de tomate, bajo tratamientos que contenían diferentes proporciones de luz azul:roja a $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, donde se observó una correlación negativa entre la cantidad de luz azul en el tratamiento y la longitud del hipocótilo; mientras que referente a los pesos fresco y seco, los tratamientos con diferentes proporciones azul:rojo fueron estadísticamente iguales entre sí ($P \leq 0.05$) y diferentes (con mayor valor) a los tratamientos con luz monocromática azul y roja, que a su vez fueron estadísticamente iguales entre sí (Hernández *et al.*, 2016); al igual que Paniagua-Pardo *et al.* (2015) estos autores atribuyen la correlación negativa entre la luz azul y la longitud del hipocótilo al efecto de esta longitud de onda en la activación de los criptocromos.

En un experimento en *Capsicum annum* bajo luz LED azul, roja y azul-roja 1:1 a $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 16 horas de fotoperiodo, se observó que, a los 60 días después del establecimiento, la altura de planta era estadísticamente mayor ($P \leq 0.01$) en el tratamiento bajo luz roja, seguida por el tratamiento bajo la combinación de luz roja-azul y mínima en el tratamiento bajo luz azul; referente al peso fresco y seco de las hojas, este fue mayor bajo el tratamiento de luz roja-azul, seguido por el tratamiento de luz azul y mínimo ($P \leq 0.01$) bajo el tratamiento de luz roja (Gangadhar, Mishra, Pandian & Park, 2012). Al evaluar otras variables como el contenido de carbohidratos totales y la cantidad de clorofilas en las plantas de los diferentes tratamientos, los autores concluyeron que someter las plantas de chile a luz LED azul-roja (proporción 1:1) incrementa el crecimiento de estas, mientras que, si se tratan con luces monocromáticas, la luz azul favorecerá la síntesis de clorofila a y la acumulación de carbohidratos totales, en mayor cantidad que la luz roja.

En lechuga romana se observó que, los pesos fresco y seco son máximos bajo tratamiento con luz LED blanca enriquecida con luz roja, intermedios en los tratamientos de luz LED blanca enriquecida con luz azul o verde y mínimos con

luz LED blanca sin enriquecimiento o en la combinación 1:1 de luz LED roja:azul (Mickens *et al.*, 2018). También en lechuga, cultivar “Greenwave” Saito *et al.* (2010) observaron que, bajo tratamiento con luz roja monocromática o una combinación de luz roja-azul (1:1) se obtiene un mayor número de hojas que en el tratamiento bajo luz azul monocromática a $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; el peso fresco fue máximo en el tratamiento bajo luz roja monocromática, mientras que, en este mismo tratamiento el peso seco fue mínimo, los tratamientos con luz azul monocromática y la combinación azul-rojo no presentaron diferencias estadísticas significativas para ambas variables.

Los resultados presentados sugieren que la luz roja promueve el crecimiento vegetal en tamaño y en algunos casos en peso fresco, mientras que, la luz azul promueve un aumento en el peso seco independientemente del cambio en tamaño de la planta, pues en la mayoría de los casos revisados, las plantas tratadas con luz de este color, son más compactas (cuadro 1). Una posible explicación para este fenómeno radica en un experimento realizado sobre rábano, donde se observó que existe una correlación entre el desarrollo de la parte aérea y la parte subterránea de la planta y la calidad de la luz incidente; relación que esta mediada por las hormonas principales. Esta investigación concluyó que la luz roja mejora el crecimiento de la parte aérea de la planta al estimular la síntesis y acción de las giberelinas, mientras que la luz azul estimula el desarrollo de los órganos de almacenamiento, al promover un mayor flujo de fotosintatos hacia ellos mediado por un incremento en el nivel de ácido indolacético, citocininas y probablemente ácido abscísico (Kara, Kotov & Bukhov, 1997).

Investigaciones posteriores han demostrado que los criptocromos, mediados por la luz azul, reducen el contenido interno de giberelinas activas, al promover la expresión del gen GA2ox1, que codifica una proteína que cataliza la hidroxilación de estas (Zhao *et al.*, 2007). Ubukawa *et al.* (2004) observaron en petunia, que el tratamiento con luz azul produce plantas enanas comparadas con las obtenidas bajo luz de día; así mismo, demostraron que el efecto se

debe a una baja en la concentración interna de GA1 y GA20, promovida por la interrupción del paso entre la GA19-GA20. También en petunia Fukuda *et al.* (2012) encontraron que el contenido de auxinas en el tratamiento bajo luz azul fue ligeramente superior al obtenido en plantas bajo tratamiento de luz roja y el contenido de ácido abscísico (ABA) en los ápices radicales se incrementó después de tres semanas de iniciado el experimento, sin haber diferencias significativas entre los tratamientos.

Resulta importante señalar que el efecto causado por una longitud de onda específica incidente sobre una planta puede cambiar totalmente cuando la intensidad lumínica es diferente. En *Hypericum perforatum* bajo tratamientos con luz LED azul, blanca y roja a 250 y 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, se observó que, en la condición de menor intensidad lumínica, el peso seco de las hojas, así como de los tallos es mayor en el tratamiento con luz roja y menor en los tratamiento con luz blanca y azul, que son estadísticamente iguales entre sí ($P \leq 0.05$); mientras que, bajo la condición de mayor intensidad lumínica es superior en los tratamiento con luz blanca y roja y menor en el tratamiento con luz azul; en cuanto al peso seco de las raíces, bajo 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y a 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, el tratamiento con luz blanca es superior al tratamiento con luz roja, que a su vez es seguido por el tratamiento con luz azul (Nishimura, Zobayed, Kozai & Goto, 2007).

Además de interaccionar con la intensidad lumínica; el efecto de la calidad de la luz sobre el crecimiento de una planta, también interacciona con el genotipo (Dierck *et al.*, 2017; Kyriacou *et al.*, 2019), la temperatura (Liu *et al.*, 2020), la nutrición (Choi *et al.*, 2018; Miyagi, Uchimiya & Kawai-Yamada, 2017), la concentración de CO₂ atmosférico (Miyagi, Uchimiya & Kawai-Yamada, 2017) la presencia o ausencia de factores estresantes (Coubier & Pierik, 2019), entre otros factores ambientales que inciden sobre el organismo tratado.

2.1.3 La calidad de la luz y el metabolismo secundario

La calidad e intensidad de la luz pueden modificar la síntesis y acumulación de metabolitos secundarios en plantas, especialmente cuando se utiliza luz monocromática roja, azul o la combinación de ambas, comparado con la producción bajo luz blanca; el resultado se debe al efecto modulador de enzimas en las vías de síntesis –de metabolitos secundarios- relacionadas con la fotosíntesis, mismas que se activan o inactivan en función de la longitud de onda a la que se exponga la planta (Alrifai *et al.*, 2019).

Existen dos hipótesis que relacionan a la fotosíntesis y el metabolismo primario con el secundario, la primera llamada “flujo de metabolitos en exceso” asegura que la síntesis de metabolitos secundarios se incrementa conforme aumenta la cantidad de carbohidratos disponibles para esta actividad, esto ocurre especialmente cuando la cantidad necesaria de carbohidratos para el crecimiento ha sido completada (Matsuki, 1996). De la mano, la segunda, llamada “hipótesis de recursos limitados” o “hipótesis del balance crecimiento-diferenciación” asegura que cuando las condiciones ambientales (luz, temperatura, humedad, etc.) son óptimas, pero la disponibilidad de nutrientes es baja, el resultado tiende a una alta proporción carbohidratos:nutrientes; en esta condición, la fotosíntesis puede incrementarse hasta el punto en que hay carbohidratos en exceso, mismos que pueden ser incorporados a las rutas de síntesis de metabolitos secundarios (Heyworth *et al.*, 1998).

Del metabolismo del carbono se derivan las principales rutas de biosíntesis de metabolitos secundarios, mismos que se agrupan en cuatro grandes grupos: terpenos, compuestos fenólicos, glucósidos y alcaloides (Ávalos-García y Pérez-Urria, 2009). Existen muchos reportes sobre el efecto del cambio en la calidad de la luz sobre la producción de metabolitos secundarios en diversas especies; algunos de estos se sintetizan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Ejemplos del efecto de tratamientos con luz LED de diferentes colores sobre el metabolismo secundario de diversas especies.

	Condición lumínica	Especie	Efecto	Referencia
Terpenos	LED rojo:azul 1:1, 16 h de fotoperiodo y $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Capsicum annum</i> 'Cheonyang'	Mayor formación de pigmentos y capsaicinoides, respecto a luz roja o fluorescente.	Gangadhar <i>et al.</i> (2012)
	LED azul	Hortalizas hoja verde	de Correlación positiva entre la proporción de luz azul (contra blanco y rojo) y el contenido de carotenoides.	Alrifai <i>et al.</i> (2019)
	LED azul, 16 h de fotoperiodo y $240 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Ocimum basilicum</i>	Incremento de 4.4 veces en la cantidad de aceite esencial, comparado con tratamiento de luz blanca. Mayor concentración de mirceno y linalool.	Ichimura, Watanabe, Amaki, y Yamazaki. (2009)
	Led roja, 16 h de fotoperiodo y $240 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Ocimum basilicum</i>	Decremento en la cantidad de aceite esencial, solo el 0.77% del obtenido en tratamiento con luz blanca. Mayor concentración de α y β -pineno.	Ichimura <i>et al.</i> (2009)
	LED roja, 16 h de fotoperiodo y $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Mentha arvensis</i>	Mayor contenido de mentol, mentona y limoneno, respecto a luz azul y verde.	Nishioka <i>et al.</i> (2008)
	LED roja, 16 h de fotoperiodo y $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Plectranthus amboinicus</i>	Mayor acumulación de monoterpenos como α -pineno, β -pineno y limoneno	Noguchi y Amaki, (2016)
	LED azul, 16 h de fotoperiodo y $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Plectranthus amboinicus</i>	Mayor acumulación de sesquiterpenos como β -farneceno, germancenoD y elemeno	Noguchi y Amaki, (2016)
Compuestos fenólicos	LED azul, 16 h de fotoperiodo y $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Rosa hybrida</i> 'Scarlet', <i>Chrysanthemum morifolium</i> 'Coral Charm' y <i>Campanula portenschlagiana</i>	Una mayor proporción de luz azul, frente a luz roja o blanca, promovió una mayor concentración de fenoles y flavonoides.	Ouzounis <i>et al.</i> (2014)

	LED azul, 18 h de fotoperiodo y 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Jitomate	Aumento en el contenido de antocianinas	Hernández <i>et al.</i> (2016)
	LED azul, 14 h de fotoperiodo y 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Lechuga de hoja roja	Aumento en el contenido de polifenoles y la actividad antioxidante total.	Johkan, Shoji, Goto, Hashida y Yoshihara, (2010)
	LED azul, 16 h de fotoperiodo y 800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Cyclocarya paliurus</i>	Mayor contenido de kaempferol, quercetina e isoquercetina, frente a luz blanca, roja y verde.	Liu, Fang, Yang, Shang, y Fu, (2018)
Glucósidos	LED azul:rojo (2:8), 18 h de fotoperiodo y 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Digitalis purpurea</i>	Máximo contenido de digitoxina y digoxina.	Verma, Gantait, Jeong y Hwang. (2018)
	LED rojo:rojo lejano (1.22) y LED azul, 16 h de fotoperiodo y 120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Stevia rebaudiana</i>	Mayor síntesis de esteviol y giberelinas.	Yoneda <i>et al.</i> (2017)
Alcaloides	LED rojo, 16 h de fotoperiodo y 150-300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	<i>Catharanthus roseus</i>	Mayor síntesis de vindolina y cantarantina	Fukuyama, Ohashi-Kaneko y Watanabe. (2015)

Los terpenos representan al grupo más grande de metabolitos secundarios y son sintetizados por dos rutas principales, la de ácido mevalónico activa en el citosol y la del metileritritol-fosfato (MEP), que funciona en los cloroplastos (Ávalos-García y Pérez-Urria, 2009). Estos se clasifican en monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos, tetraterpenos y politerpenos; donde se incluyen hormonas, pigmentos, esteroides, derivados de esteroides, látex, aceites esenciales y carotenoides, siendo estos últimos muy estudiados en cuanto a la influencia de la luz en su síntesis.

Se ha demostrado que la intensidad luminosa promueve la acumulación de pigmentos, como el α - y β -caroteno y la clorofina b, por estimulación de la actividad enzimática en respuesta a un estrés luminoso (Lefsrud, Kopsell y Sams, 2008). Coincidiendo con lo anterior se ha observado en hojas de

Arabidopsis, que los compuestos activos derivados del β -caroteno se sintetizan bajo una condición de estrés luminoso (Nisar *et al.*, 2015). Lo anterior puede ser explicado por las funciones de los carotenoides, que consisten en coleccionar luz para la fotosíntesis o en desviarla con la finalidad de proteger a las clorofilas de la oxidación (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

Respecto a la calidad de la luz, y de acuerdo con la fórmula $E=hc/\lambda$, donde E es la energía contenida en un fotón (J), h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} Js), c es la velocidad de la luz y λ la longitud de onda (nm), se sabe que, la luz azul contiene una mayor cantidad de energía que la luz roja, por lo que, un vegetal expuesto a una cantidad alta de luz azul sintetizará pigmentos accesorios para proteger al sistema fotosintético de la fotooxidación. Experimentos han demostrado lo anterior. En rábano se observó un incremento en el contenido total de carotenoides cuando se trata a las plantas con luz en proporción 9:1 (rojo:azul) respecto al tratamiento solo con luz roja (Samuoliene *et al.*, 2011). En plántulas de tomate, Hernandez *et al.* (2019) observaron que existe una correlación positiva entre el porcentaje de fotones azules y el contenido de antocianinas cuando se trata a las plántulas con mezclas de diferentes colores de luz. Mientras que, en la hierba de san juan (*Hypericum perforatum*) se ha observado que, bajo tal condición, se promueve la síntesis de antocianinas y flavonoides (Bruni & Sacchetti, 2009).

Además de pigmentos accesorios, la luz azul promueve una mayor síntesis de compuestos fenólicos que no precisamente tienen un papel como cromóforos; esto puede explicarse con el papel que tienen diferentes calidades de luz en la activación e inhibición de la actividad de diversas enzimas. En la principal ruta de síntesis de compuestos fenólicos, la ruta del ácido shikímico, la luz azul y blanca regulan la actividad de la fenilalanina amonio-liasa (PAL) (Cuong, *et al.*, 2019), enzima que participa al inicio de la ruta al promover la conversión de fenilalanina a ácido cinámico en dicotiledóneas y de tirosina a ácido p-cumárico en monocotiledóneas (Vickery y Vickery, 1981), surgiendo de estos dos compuestos un gran número de metabolitos secundarios, como ligninas, fenoles

y cumarinas, así como flavonas y antocianinas (figura 1). Es por ello que se asocia a la luz azul con una mayor expresión de los genes que codifican a la enzima PAL y esta, a su vez, se asocia a un mayor contenido de compuestos fenólicos en las plantas (Alrifai *et al.*, 2019). Otras de las enzimas que participan en esta ruta y cuya síntesis también es influenciada por la calidad de la luz son: C4H (ácido 4-cinámico hidroxilasa), CHI (chalcona isomerasa), FLSII (flavonol sintasa II), ANS (antocianidina sintasa) (Thwe *et al.*, 2014), F3'H (flavonoide 3' hidroxilasa) y FLS (flavonol sintasa) (Kim *et al.*, 2015), 4CL y CHS (Y. Liu *et al.*, 2018).

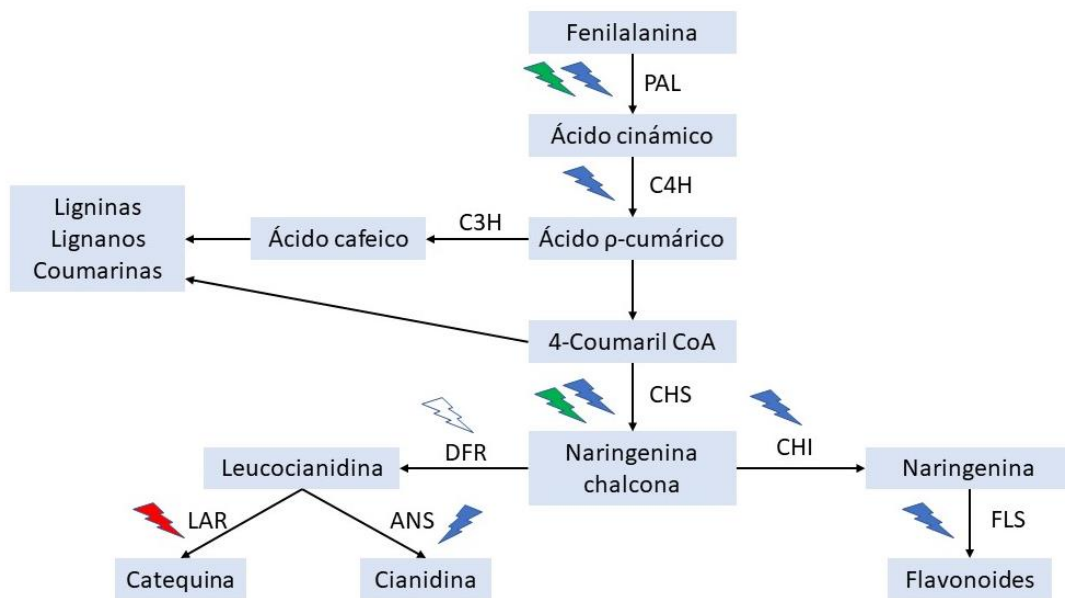


Figura 1. Enzimas de la ruta del ácido shikímico influenciadas por la calidad de la luz

Elaboración propia con base en los datos de Thwe *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015 y Liu *et al.*, 2018. PAL: Fenilalanina amonio liasa, C4H: ácido 4-cinámico hidroxilasa, CHS: quitina sintetasa, DFR: dihidroflavonol 4-reductasa, CHI: chalcona isomerasa, ANS: antocianidina sintasa, FLS: flavonol sintasa.

En otras rutas metabólicas la calidad de la luz también toma cierta importancia. En la ruta que da origen a los carotenoides, la calidad de la luz influye sobre la fitoeno sintasa, enzima que cataliza el paso de geranilgeranil-difosfato a cis-15-fitoeno; de esta molécula se origina el licopeno, que da origen al α -caroteno

(mediante las enzimas licopeno β -ciclase y la licopeno ϵ -ciclase, reguladas positivamente por la luz blanca y azul) y al β -caroteno (mediante la enzima licopeno β -ciclase, regulada positivamente por la luz blanca y roja); del β -caroteno se origina la zeaxantina, posteriormente la anteraxantina y violaxantina, moléculas sintetizadas con el uso de enzimas que son reguladas positivamente por la luz blanca y roja y en menor grado por la luz azul (Tuan *et al.*, 2013). La síntesis de moléculas en el grupo de las xantofilas también es regulada por la luz, ya que es común que exista una conversión reversible de la violaxantina a zeaxantina, pasando por anteraxantina, mediante la enzima violaxantina de-epoxidasa, que se activa en condiciones de alta luminosidad; mientras que en la reacción inversa participa la enzima zeaxantina epoxidasa, que se activa en condiciones de baja luminosidad (Jahns, Latowski & Strzalka, 2009).

En la biosíntesis de terpenoides se ha observado que la calidad de la luz influye sobre las rutas que llevan a la síntesis de moléculas específicas. Peer y Langenheim (1998) adjudicaron a los fitocromos la influencia sobre la producción de monoterpenos; trabajando con *Satureja douglasii* del quimiotipo pulegona, observaron que, al tratar las plantas con luz roja, la cantidad de monoterpenos totales se incrementa, mientras que el efecto contrario se observa al tratarlas con luz roja lejana. Considerando que la forma activa de los fitocromos en las rutas de señalización es aquella que se sintetiza cuando la planta se expone a luz roja (Möglich *et al.*, 2010), puede especularse que, en efecto, los fitocromos tienen influencia sobre la síntesis de monoterpenos. Recientemente en menta mexicana (*Plectranthus amboinicus*) se observó que, plantas tratadas con luz roja tienen una mayor cantidad de monoterpenos, mientras que plantas tratadas con luz azul, acumulan una mayor cantidad de sesquiterpenos (Noguchi & Amaki, 2016). La investigación en este tema aun es escasa, por lo que resulta necesario involucrarse más en la elucidación del papel de la luz sobre la dirección de las rutas biosintéticas en la síntesis de terpenoides; especialmente en quimiotipos donde la síntesis de ciertas moléculas tiene una fuerte influencia genética y una débil influencia ambiental.

Los glucosinolatos, un grupo de metabolitos secundarios presentes en su mayoría en la familia de las brasicas (Ávalos-García y Pérez-Urria, 2009; Agerbirk y Olsen, 2012) resultan de importancia por su función en la defensa de las plantas contra herbívoros y depredadores (Halkier, 2016) así mismo, por los reportes que existen sobre su posible efecto protector contra el cáncer (Soundararajan & Kim, 2018). El papel de la calidad de la luz sobre su síntesis aún no está bien dilucidado, ya que se ha reportado que, la luz azul inhibe la síntesis de éstos en Kale al inhibir la expresión de la enzima AOP2, que participa en el último paso de ruta de síntesis de estas moléculas (Frisch *et al.*, 2015); mientras que, en un estudio sobre brócoli, la luz azul mejoró la concentración de glucosinolatos alifáticos y aromáticos (Kopsell *et al.*, 2014). Alrifai *et al.* (2019) consideran que es posible que la luz azul solo afecte a los glucosinolatos originados de la metionina y fenilalanina (alifáticos y aromáticos), mientras que no afecta a aquellos sintetizados del triptófano (indol-glucosinolatos).

Otro grupo de metabolitos secundarios que han adquirido importancia en las últimas décadas debido a su potencial uso en la medicina, son los cannabinoides, producidos por plantas del género *Cannabis* en los múltiples tricomas glandulares presentes en las flores de las plantas femeninas (Mahlberg & Kim, 2004). Desde que iniciaron los reportes del papel de la luz sobre la producción de cáñamo o marihuana, se informaba que el aumento en la producción de THC (tetrahidrocannabinol, la molécula más psicoactiva de los cannabinoides) y CBD (canabidiol, molécula con potencial medicinal) se lograba con el aumento de la intensidad luminosa (Eaves, 2020; Fairbairn & Liebmann, 1974; Mary & Crombie, 1977; Potter & Duncombe, 2012) y es así; sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que la calidad de la luz tiene también, un alto impacto. Wei *et al.* (2021) encontraron que bajo una intensidad luminosa superior a $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ una alta proporción de luz Rojo:Azul promueve un incremento en la síntesis de CBD en cáñamo. En contraste con estos resultados, también en cáñamo se observó que tratamientos enriquecidos con luz azul o con una mayor proporción de esta frente a luz roja o roja lejana

incrementa el contenido de CBGA (el precursor de los cannabinoides), THCA y CBD (Danziger & Bernstein, 2021). Si bien aún existen dudas sobre el impacto preciso de las diferentes longitudes de onda sobre la ruta de biosíntesis de los diferentes cannabinoides, se ha demostrado que es posible mejorar el rendimiento de estos utilizando técnicas de modificación del ambiente luminoso incidente.

2.2 El tomillo y la respuesta de las lamiaceas a ambientes luminosos controlados.

2.2.1 El Tomillo

El tomillo (*Thymus vulgaris*) es una popular especie que pertenece a la familia Lamiaceae, nativa del Mediterráneo y que, debido a sus innumerables usos ha sido distribuida hacia gran parte de mundo (Hosseinzadeh, Jafarikukhdan, Hosseini & Armand, 2015). Es un arbusto aromático de intenso olor a timol de unos 40 cm de altura, aspecto grisáceo y tallos leñosos; muy poblado de hojas lineares, opuestas, entre aovadas y lanceoladas, diminutas de a lo sumo 1 cm de ancho, aunque pueden parecer más estrechas porque se enrollan sus bordes hacia el envés cuando hay baja humedad en el suelo; envés que es blanquecino por los muchos tricomas blancos que lo cubren; las flores son bilabiadas, color rosa o blancas muy pequeñas y agrupadas en una especie de cabezuela en el extremo de las ramitas (Gasca, 2001).

2.2.2 Usos en la medicina tradicional

Tradicionalmente, esta planta ha sido utilizada en la cocina por sus propiedades culinarias y en la medicina tradicional por sus propiedades curativas. En este ámbito, los extractos acuosos y el aceite esencial han sido utilizados como antisépticos, antimicrobianos, astringentes, desinfectantes, carminativos y tónicos (Hosseinzadeh *et al.*, 2015; Marchese *et al.*, 2016). Así mismo, se ha reportado su uso en el tratamiento de parásitos intestinales, para el tratamiento de enfermedades urinarias infecciosas, laringitis, inflamación, dermatitis, acné, ciática y reumatismo (Amiri, 2012). En el mismo sentido, se han documentado usos tradicionales para el tratamiento de abscesos, ansiedad, artritis, asma,

quemaduras, diarrea, diuresis, dismenorrea, dispepsia, disnea, edemas, epilepsia, fiebre, flatulencias, resfriados, gingivitis, halitosis, indigestión, colitis, insomnio, laringitis, neuralgias, obesidad, infecciones respiratorias y uretritis (Basch, Ulbricht, Hammerness, Bevins & Sollars, 2004).

2.2.3 Reportes clínicos y farmacológicos

Diversos estudios clínicos y farmacológicos han sido conducidos utilizando diversos tipos de extractos de esta especie para probar su efectividad contra diversos patógenos que causan enfermedades en humanos y otros animales. Experimentos *in vitro* han demostrado la efectividad del aceite esencial contra *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus*, *Helicobacter pylori*, *Porphyromonas gingivalis*, *Selenomonas artemidis*, *Streptococcus sobrinus* y *Streptococcus mutans*; el método de acción posiblemente se debe a una perforación de la membrana bacteriana que produce el vaciado celular y por tanto la muerte. Contra hongos, se ha probado su efectividad al suprimir el crecimiento del hongo y la síntesis de aflatoxinas en *Aspergillus parasiticus*, *Aspergillus flavus* y *Candida albicans* (Basch *et al.*, 2004). También *in vitro* se ha comprobado su actividad antiviral contra el virus de Herpes simplex tipo 1 (HSV-1) y tipo 2 (HSV-2) (Nolkemper, Reichling, Stintzing, Carle & Schnitzler, 2006).

Nikolić *et al.* (2014) estudiando las actividades antimicrobianas, antioxidantes y antitumorales de tres especies de *Thymus* (*serpyllum*, *algeriensis* y *vulgaris*) concluyen que sus resultados justifican el uso de estas especies en el tratamiento de pequeñas heridas y desordenes de la cavidad bucal, así como su uso en la higiene de este mismo sitio; así mismo aseguran que la fuerte actividad antioxidante y antitumoral justifican el uso tradicional del tomillo para el tratamiento de diversas enfermedades humanas y abren una puerta al estudio de estas especies como potenciales anticancerígenos.

Otro tipo de estudios, han mostrado la efectividad de los aceites esenciales para inhibir el crecimiento de larvas de coleópteros (Szczepanik, Zawitowska & Szumny, 2012); también, al 1% de concentración, causa 50% de mortalidad en

larvas de la comida (Hosseinzadeh *et al.*, 2015) y se ha asegurado que, dadas sus propiedades citotóxicas, antioxidantes y antimicrobianas, el aceite esencial tiene potencial para ser utilizado en el procesamiento de alimentos (Miladi, Slama, Mili, Zouari, Bakhrouf & Ammar, 2013). Por otro lado, se ha demostrado que el aceite esencial, así como otros metabolitos secundarios principales tienen propiedades antioxidantes (Kulisic, Radonic & Milos, 2005; Lee, Umano, Shibamoto & Lee, 2005). Flavonoides aislados del tomillo se han reportado como inhibidores de la producción de aniones superóxido y protectores de los glóbulos rojos contra daño oxidativo (Haraguchi *et al.*, 1996).

En un estudio sobre el efecto del aceite esencial sobre la alopecia areata, 86 individuos fueron tratados con una mezcla de aceites esenciales de tomillo, romero, lavanda y cedrón, mientras que otro tanto, con un aceite placebo; los resultados mostraron que un 44% de los individuos tratados con la mezcla de aceites presentaron nuevo crecimiento de cabello, comparado contra un 15% en el tratamiento placebo, habiendo una diferencia estadísticamente significativa (Hay, Jamieson & Ormerod, 1998). Otro experimento comparó el efecto de un jarabe de tomillo contra Bromhexina para el tratamiento de tos producida por una infección respiratoria no grave, resultando no haber diferencias estadísticas significativas en la mejora de los síntomas por parte de ambos tratamientos (Knols, Stal & Ree, 1994).

Acerca de la dosificación de esta planta y sus diferentes preparaciones para el uso oral en adultos, se ha reportado que, en decocciones debe usarse 1-2 g de hierba seca por cada 150 ml de agua hirviendo (sin exceder el uso de 10 g por día, para prevenir toxicidad); para extracto etanólico (1:10 planta seca: etanol 70%) 40 gotas hasta tres veces al día; y para el aceite esencial, hasta dos gotas al día (Bash *et al.*, 2004). Sobre el aceite esencial, se ha reportado una LD₅₀ de 2.84 g/kg de peso en ratas (Skramlik, 1959), decreciendo la actividad locomotora y respiratoria a partir de dosis de 0.5 g/ kg de peso (Quereshi *et al.*, 1991).

2.2.4 Composición química y biosíntesis

El aceite esencial representa el grupo de metabolitos secundarios principal en esta planta; diversos autores reportan que está compuesto principalmente por monoterpenos y sesquiterpenos (Hudaib, Speroni, Pietra & Cavrini, 2002; Nikolić *et al.*, 2014). La presencia y cantidad de las moléculas dentro de cada grupo de terpenos están influenciadas por las características genotípicas y del ambiente en que se desarrollan los especímenes; se ha reportado como moléculas principales al timol (40-50% del total del aceite esencial), p-cimeno (15-20.0%), γ -terpineno (3-15%), carvacrol (3-4%), β -cariofileno (2-4%), y δ -cadineno (1-3%) (Hudaib *et al.*, 2002; Nikolić *et al.*, 2014; Soković *et al.*, 2009; Tompson, Chalcat, Michet, Linhart & Ehlers, 2002).

La actividad antioxidante de los extractos de esta planta, ha sido adjudicada al contenido de fenoles y flavonoides, principalmente (Eghdami, Eizadi & Sadeghi, 2013). Mediante extracto de etanol al 70% se ha cuantificado la presencia de polifenoles (Método Folin-Ciocalteu) en orden de 24.70 μ g de equivalentes de ácido gálico en cada 100 μ g de extracto, mientras que, el contenido de flavonoides (Método Woisky y Salatino) en 50.82 J.tg de equivalentes de quercetina dihidratada/500 μ g (Rosell-Cáceres, 2014). Eghdami *et al.* (2013) analizando extracto etanólico al 50% reportan, 32.34 mg GAL/g de contenido total de fenoles y 14.30 (QE)/g de flavonoides.

En la familia Lamiaceae y particularmente en *Thymus vulgaris*, el estudio del metabolismo secundario ha estado centrado en dos moléculas principales: el timol y carvacrol. Al igual que la mayoría de las moléculas presentes en el aceite esencial de esta especie, pertenecen al grupo de los terpenos (Soković *et al.*, 2009), específicamente al de los monoterpenos fenólicos y se ha descubierto que, en las lamiáceas, se sintetizan en tricomas glandulares situados en la parte aérea de las plantas (Vernet *et al.*, 1986; Turner *et al.*, 1999); en el mismo sentido, se ha descrito que, en su mayoría, los procesos de síntesis se dan en hojas fisiológicamente maduras (Peer & Langenheim, 1998).

El estudio de la ruta biosintética de estos dos componentes (timol y carvacrol) ha mostrado que provienen directamente del p-cimeno y γ -terpineno (figura 2) y que es común que exista una correlación positiva entre estos dos grupos de monoterpenos en los diferentes quimio-tipos de tomillo (Hudaib *et al.*, 2002). Así mismo, se ha observado que el mayor rendimiento del aceite esencial, así como la mayor concentración de timol y carvacrol, se obtienen en plantas jóvenes (menores a 2 años) que se encuentren en una etapa avanzada de un periodo de crecimiento vegetativo (Hudaib *et al.*, 2002; Peer & Langenheim, 1998; Vernet *et al.*, 1986).

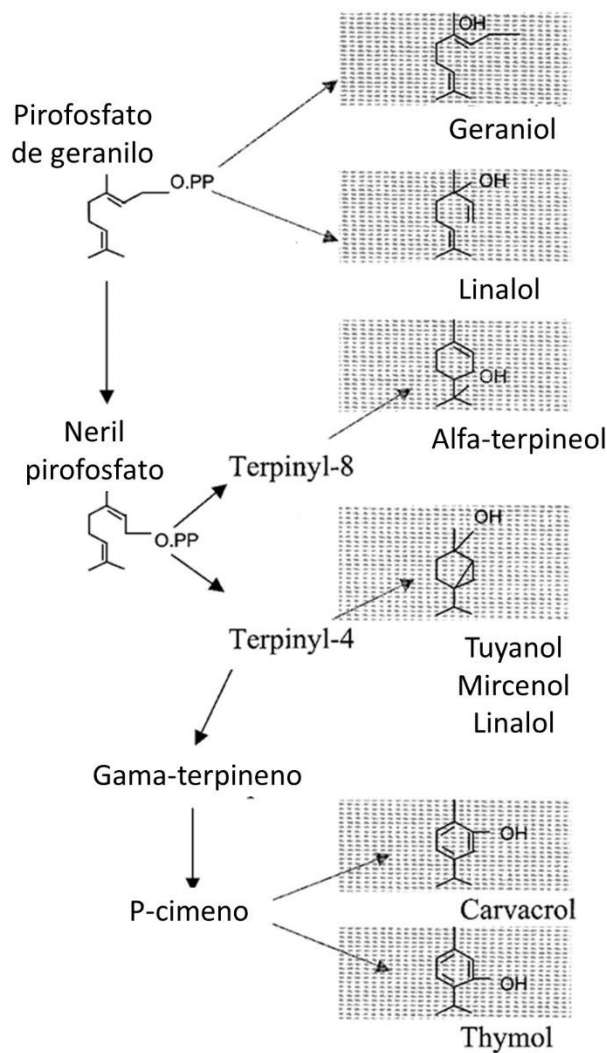


Figura 2. Ruta biosintética de los monoterpenos principales del tomillo.

Tomada de Thompson *et al.*, 2002.

2.2.5 Influencia de la calidad de la luz en el crecimiento y metabolismo secundario en especies de la familia Lamiaceae

Los intentos de dilucidar el efecto de la luz sobre la composición química y las demás características fenotípicas de plantas de la familia lamiácea, tienen mucha historia. Peer y Langenheim (1998) creían que la producción de terpenoides en plantas de *Satureja douglasii* estaba regulada por los fitocromos, para despejar tal cuestión, realizaron un experimento donde se utilizaron fuentes de luz de colores rojo y rojo lejano (lámparas fluorescentes), sobre plantas de esta especie; los autores concluyeron que los fitocromos no controlan la producción de terpenoides en esta especie, sin embargo sí influyen sobre la concentración de algunas moléculas pertenecientes a este grupo (como el timol); así mismo aseguran que, aunque la producción de terpenoides está influenciada por factores ambientales, depende, mayoritariamente, de las características genéticas de la especie.

En años recientes la investigación ha sido dirigida a experimentar con diferentes colores de luz. Un experimento realizado sobre menta japonesa (*Mentha arvensis* L) con luces de colores rojo, azul y verde a $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante 28 días con fotoperiodo de 16 horas, concluyó que, el tratamiento con luz roja, aumento el pesos fresco y seco de tallos y hojas, así como en la longitud del tallo principal y el número y área de hojas verdaderas. La evaluación del contenido de mentol, mentona y limoneno, los metabolitos secundarios principales, mostro que, la luz roja promovió una mayor acumulación de estos, lo que, en palabras de los autores, está directamente relacionado con el mayor crecimiento de las plantas en ese tratamiento (Nishioka *et al.*, 2008).

Los resultados de un experimento con lámparas fluorescentes, realizado sobre *Perilla frutescens* (L.) Britt. var. *Acuta*, mostraron que los tratamientos con luz roja, así como aquellos donde se incluía a esta longitud de onda (rojo-azul y rojo-verde) dieron origen a plantas con mayor número de hojas verdaderas, así como mayor área foliar y pesos fresco y seco, comparados contra los

tratamientos con luz azul, verde y azul-verde. El análisis sobre el aceite esencial mostró que la concentración de perillaldehído y limoneno, los componentes principales del aceite esencial, fue menor en los tratamientos donde la luz roja estaba involucrada; mientras que la concentración de antocianinas fue mayor en los tratamientos sin luz roja (Nishimura *et al.*, 2009).

Trabajando con menta mexicana (*Plectranthus amboinicus*) Noguchi y Amaki (2016), describieron que, un tratamiento con luz azul ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 16 h de fotoperiodo) promueve la dominancia apical y la formación de plantas compactas, comparado con tratamientos de luz roja y verde, que promueven plantas menos compactas y con mayores crecimientos laterales. Referente a la fitoquímica, los autores reportaron que el tratamiento con luz roja promovió una mayor concentración de compuestos con menor tiempo de retención en columna durante la cromatografía de gases, como el α -pineno, β -pineno y limoneno; la luz verde promovió la concentración de compuestos con tiempo de retención en columna intermedio, como borneol y acetato de bornilo; mientras que, la luz azul promovió la acumulación de compuestos cuyo tiempo de retención en columna fue el máximo, como β -farneceno, germancenoD y elemeno. Los autores concluyeron que, la menta mexicana es muy sensible a los cambios en la calidad de la luz, asegurando que, la luz azul promueve la ruta metabólica biosintética de los sesquiterpenoides.

En un experimento realizado sobre *T. vulgaris* con diferentes colores de luces LED a $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se observó que, el contenido de aceite esencial se reduce conforme se reduce la longitud de onda de la luz incidente; el contenido de monoterpenos es superior en el tratamiento con luz azul que en los demás (luz roja, blanca, verde y roja: azul -70:30-), mientras que los sesquiterpenos son máximos en el tratamiento con luz combinada, seguido por la luz verde; y que la concentración de timol aumenta con la luz azul y la de limoneno con luz roja (Tohidi, Rahimmalek, Arzani & Sabzalian, 2019).

Los ejemplos anteriores dejan en claro que es posible observar modificaciones morfogénicas y fitoquímicas con diferentes calidades de luz; sin embargo la

investigación, en especies de esta familia ha estado mayormente dirigida a utilizar fuentes de luz monocromática; resultados de experimentación en otras familias botánicas, ha demostrado que, diferentes proporciones de luz azul y roja, promueven resultados favorables en la producción de plantas con un fenotipo de interés antropocéntrico y mejora en la calidad fitoquímica.

2.3 Fuentes consultadas

- Agerbirk, N., & Olsen, C. E. (2012). Glucosinolate structures in evolution. *Phytochemistry*, 77, 16-45.
- Alrifai, O., Hao, X., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2019). Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(22), 6075-6090.
- Amiri, H. (2012). Essential oils composition and antioxidant properties of three thymus species. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012.
- Avalos-García, A., & Pérez-Urria Carril, E. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología)*, 2(3).
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (2013). Fundamentos de fisiología vegetal. Mc. Graw Hill
- Basch, E., Ulbricht, C., Hammerness, P., Bevins, A., & Sollars, D. (2004). Thyme (*Thymus vulgaris* L.), thymol. *Journal of herbal pharmacotherapy*, 4(1), 49-67.
- Bian, Z. H., Yang, Q. C., & Liu, W. K. (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.
- Carvalho, R. F., Takaki, M., & Azevedo, R. A. (2011). Plant pigments: the many faces of light perception. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(2), 241-248.
- Casal, J. J. (2013). Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annual review of plant biology*, 64, 403-427.
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J. (2015). Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 29(supl): 84-92.
- Choi, J. Y., Kim, S. J., Bok, K. J., Lee, K. Y., & Park, J. S. (2018). Effect of different nutrient solution and light quality on growth and glucosinolate contents of watercress in hydroponics. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 27(4), 371-380.

- Courbier, S., & Pierik, R. (2019). Canopy light quality modulates stress responses in plants. *Iscience*, 22, 441-452.
- Cuong, D. M., Ha, T. W., Park, C. H., Kim, N. S., Yeo, H. J., Chun, S. W., ... & Park, S. U. (2019). Effects of LED lights on expression of genes involved in phenylpropanoid biosynthesis and accumulation of phenylpropanoids in wheat sprout. *Agronomy*, 9(6), 307.
- Danziger, N., & Bernstein, N. (2021). Light matters: Effect of light spectra on cannabinoid profile and plant development of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Industrial Crops and Products*, 164, 113351.
- Dierck, R., Dhooghe, E., Van Huylenbroeck, J., Van Der Straeten, D., & De Keyser, E. (2017). Light quality regulates plant architecture in different genotypes of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. *Scientia Horticulturae*, 218, 177-186.
- Eaves, J., Eaves, S., Morphy, C., & Murray, C. (2020). The relationship between light intensity, cannabis yields, and profitability. *Agronomy Journal*, 112(2), 1466-1470.
- Eghdami, A., Eizadi, M., & Sadeghi, F. (2013). Polyphenolic content and antioxidant activity of hydroalcoholic and alcoholic extract of *Thymus vulgaris*. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 3(5), 94-101.
- Fairbairn, J. W., & Liebmann, J. A. (1974). The cannabinoid content of *Cannabis sativa* L grown in England. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 26(6), 413-419.
- Fankhauser, C., & Chory, J. (1997). Light control of plant development. *Annual review of cell and developmental biology*, 13(1), 203-229.
- Frisch, T., Motawia, M. S., Olsen, C. E., Agerbirk, N., Møller, B. L., & Bjarnholt, N. (2015). Diversified glucosinolate metabolism: biosynthesis of hydrogen cyanide and of the hydroxynitrile glucoside alliarinoside in relation to sinigrin metabolism in *Alliaria petiolata*. *Frontiers in plant science*, 6, 926.
- Fukuda, N. (2013). Advanced light control technologies in protected horticulture: A review of morphological and physiological responses in plants to light quality and its application. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*. 8: 32-40.
- Fukuda, N., Yoshida, T., Olsen, J. E., Senaha, C., Jikumaru, Y., & Kamiya, Y. (2012). Short main shoot length and inhibition of floral bud development under red light can be recovered by application of gibberellin and cytokinin. In VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956 (pp. 215-222).

- Fukuyama, T., Ohashi-Kaneko, K., & Watanabe, H. (2015). Estimation of Optimal Red Light Intensity for Production of the Pharmaceutical Drug Components, Vindoline and Catharanthine, Contained in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Environmental Control in Biology*, 53(4), 217-220.
- Gangadhar, B. H., Mishra, R. K., Pandian, G. and Park, 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.
- 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.
- Gasca, J. M. G. (2001). Tomillo (*Thymus vulgaris* L.). *Medicina naturista*, (3), 53-55.
- Gupta, S. D., & Agarwal, A. (2017). Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In *Light emitting diodes for agriculture* (pp. 1-25). Springer, Singapore.
- Halkier, B. A. (2016). General introduction to glucosinolates. *Advances in Botanical Research*, 80, 1-14.
- Hamdani, S., Khan, N., Perveen, S., Qu, M., Jiang, J., & Zhu, X. G. (2019). Changes in the photosynthesis properties and photoprotection capacity in rice (*Oryza sativa*) grown under red, blue, or white light. *Photosynthesis research*, 139(1), 107-121.
- Haraguchi, H., Saito, T., Ishikawa, H., et al. (1996). Antiperoxidative components in *Thymus vulgaris*. *Planta Med*, 62(3), 217-221.
- Hay, I.C., Jamieson, M., Ormerod, A.D. (1998). Randomized trial of aromatherapy. Successful treatment for alopecia areata. *Arch Dermatol*, 134(11), 1349-1352.
- Hernández, R., Eguchi, T., Deveci, 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.
- Heyworth, C. J., Iason, G. R., Temperton, V., Jarvis, P. G., & Duncan, A. J. (1998). The effect of elevated CO₂ concentration and nutrient supply on carbon-based plant secondary metabolites in *Pinus sylvestris* L. *Oecologia*, 115(3), 344-350.
- Hosseinzadeh, S., Jafarikukhdan, A., Hosseini, A., & Armand, R. (2015). The application of medicinal plants in traditional and modern medicine: a

- review of *Thymus vulgaris*. *International Journal of Clinical Medicine*, 6(09), 635.
- Hudaib, M., Speroni, E., Di Pietra, A. M., & Cavrini, V. (2002). GC/MS evaluation of thyme (*Thymus vulgaris* L.) oil composition and variations during the vegetative cycle. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 29(4), 691-700.
- Ichimura, M., Watanabe, H., Amaki, W., & Yamazaki, N. (2009, November). Effects of light quality on the growth and essential oil content in sweet basil. In *VI International Symposium on Light in Horticulture 907* (pp. 91-94).
- Jahns, P., Latowski, D., & Strzalka, K. (2009). Mechanism and regulation of the violaxanthin cycle: the role of antenna proteins and membrane lipids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1787(1), 3-14.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S. N., & Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45(12), 1809-1814.
- Kami, C., Lorrain, S., Hornitschek, P., & Fankhauser, C. (2010). Light-regulated plant growth and development. *Current topics in developmental biology*, 91, 29-66.
- Kara, A. N., Kotov, A. A., & Bukhov, N. G. (1997). Specific distribution of gibberellins, cytokinins, indole-3-acetic acid, and abscisic acid in radish plants closely correlates with photomorphogenetic responses to blue or red light. *Journal of plant physiology*, 151(1), 51-59.
- Kim, Y. J., Kim, Y. B., Li, X., Choi, S. R., Park, S., Park, J. S., ... & Park, S. U. (2015). Accumulation of phenylpropanoids by white, blue, and red light irradiation and their organ-specific distribution in Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(30), 6772-6778.
- Knols, G., Stal, P.C., Van Ree, J.W. (1994). Productive coughing complaints: Sirupus Thymi or Bromhexine? A double-blind randomized study. *Huisarts en Wetenschap*, 37, 392-394.
- Kobayashi, M., Akutsu, S., Fujinuma, D., Furukawa, H., Komatsu, H., Hotota, Y., ... & Miyashita, H. (2013). Physicochemical properties of chlorophylls in oxygenic photosynthesis—succession of co-factors from anoxygenic to oxygenic photosynthesis. *Photosynthesis*, 47-90.
- 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.

- Kulisic, T., Radonic, A., & Milos, M. (2005). Antioxidant properties of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and wild thyme (*Thymus serpyllum* L.) essential oils. *Italian journal of food science*, 17(3), 315.
- Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Pannico, A., Graziani, G., Soteriou, G. A., Giordano, M., ... & Roupheal, Y. (2019). Genotype-specific modulatory effects of select spectral bandwidths on the nutritive and phytochemical composition of microgreens. *Frontiers in plant science*, 10, 1501.
- Lee, S. J., Umamo, K., Shibamoto, T., & Lee, K. G. (2005). Identification of volatile components in basil (*Ocimum basilicum* L.) and thyme leaves (*Thymus vulgaris* L.) and their antioxidant properties. *Food Chemistry*, 91(1), 131-137.
- Liu, X., Xue, C., Kong, L., Li, R., Xu, Z., & Hua, J. (2020). Interactive Effects of Light Quality and Temperature on Arabidopsis Growth and Immunity. *Plant and Cell Physiology*, 61(5), 933-941.
- Liu, Y., Fang, S., Yang, W., Shang, X., & Fu, X. (2018). Light quality affects flavonoid production and related gene expression in *Cyclocarya paliurus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 179, 66-73.
- Mahlberg, P. G., & Kim, E. S. (2004). Accumulation of cannabinoids in glandular trichomes of *Cannabis* (Cannabaceae). *Journal of Industrial Hemp*, 9(1), 15-36.
- Marchese, A., Orhan, I.E., Daglia, M., Barbieri, R., Lorenzo, A.D., Nabavi, S.F., Gortzi, O., Izadi, M., Nabavi, S.M. (2016). Antibacterial and antifungal activities of thymol: a brief review of the literature, *Food Chemistry*.
- Mary, W., & Crombie, L. (1977). The influence of photosynthesis and SKF inhibitors on cannabinoid production in *Cannabis sativa*. *Phytochemistry*, 16(9), 1369-1371.
- Massa, G. D., Wheeler, R. M., Morrow, R. C., & Levine, H. G. (2016, May). Growth chambers on the International Space Station for large plants. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 215-222).
- Matsuki, M. (1996). Regulation of plant phenolic synthesis: from biochemistry to ecology and evolution. *Australian Journal of Botany*, 44(6), 613-634.
- Mengxi, L., Zhigang, X., Yang, Y., & Yijie, F. (2011). Effects of different spectral lights on *Oncidium* PLBs induction, proliferation, and plant regeneration. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 106(1), 1-10.
- Miao, Y. X., Wang, X. Z., Gao, L. H., Chen, Q. Y., & Mei, Q. U. (2016). Blue light is more essential than red light for maintaining the activities of

photosystem II and I and photosynthetic electron transport capacity in cucumber leaves. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(1), 87-100.

- Mickens, M. A., Skoog, E. J., Reese, L. E., Barnwell, P. L., Spencer, L. E., Massa, G. D., & Wheeler, R. M. (2018). A strategic approach for investigating light recipes for 'Outredgeous' red romaine lettuce using white and monochromatic LEDs. *Life sciences in space research*, 19, 53-62.
- Miladi, H., Slama, R. B., Mili, D., Zouari, S., Bakhrouf, A., & Ammar, E. (2013). Essential oil of *Thymus vulgaris* L. and *Rosmarinus officinalis* L.: Gas chromatography-mass spectrometry analysis, cytotoxicity and antioxidant properties and antibacterial activities against foodborne pathogens.
- Miyagi, A., Uchimiya, H., & Kawai-Yamada, M. (2017). Synergistic effects of light quality, carbon dioxide and nutrients on metabolite compositions of head lettuce under artificial growth conditions mimicking a plant factory. *Food Chemistry*, 218, 561-568.
- Möglich, A., Yang, X., Ayers, R. A., & Moffat, K. (2010). Structure and function of plant photoreceptors. *Annual review of plant biology*, 61, 21-47.
- Morrow R.C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*. 43: 1947-1950
- Muneer, S., Kim, E. J., Park, J. S., & Lee, J. H. (2014). Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). *International journal of molecular sciences*, 15(3), 4657-4670.
- Nikolić, M., Glamočlija, J., Ferreira, I. C., Calhelha, R. C., Fernandes, Â., Marković, T., ... & Soković, M. (2014). Chemical composition, antimicrobial, antioxidant and antitumor activity of *Thymus serpyllum* L., *Thymus algeriensis* Boiss. and *Reut* and *Thymus vulgaris* L. essential oils. *Industrial Crops and Products*, 52, 183-190.
- Nishimura, T., Ohyama, K., Goto, E., & Inagaki, N. (2009). Concentrations of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments. *Scientia horticulturae*, 122(1), 134-137.
- Nishimura, T., Zobayed, S. M., Kozai, T., & Goto, E. (2006). Effect of light quality of blue and red fluorescent lamps on growth of St. John's wort (*Hypericum perforatum*). *J. SHITA* 18(3): 225-229.
- Nishimura, T., Zobayed, S. M., Kozai, T., & Goto, E. (2007). Medicinally important secondary metabolites and growth of *Hypericum perforatum* L. plants as affected by light quality and intensity. *Environmental Control in Biology*, 45(2), 113-120.

- Nishioka, N., Nishimura, T., Ohyama, K., Sumino, M., Malayeri, S. H., Goto, E., ... & Morota, T. (2008, October). Light quality affected growth and contents of essential oil components of Japanese mint plants. In *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions 797* (pp. 431-436).
- Noguchi, A., & Amaki, W. (2016, May). Effects of light quality on the growth and essential oil production in Mexican mint. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 239-244).
- Nolkemper, S., Reichling, J., Stintzing, F. C., Carle, R., & Schnitzler, P. (2006). Antiviral effect of aqueous extracts from species of the Lamiaceae family against Herpes simplex virus type 1 and type 2 in vitro. *Planta medica*, 72(15), 1378-1382.
- Ouzounis, T., Fretté, X., Rosenqvist, E. and Ottosen, C.O. (2014). Spectral effects of supplementary lighting on the secondary metabolites in roses, chrysanthemums, and campanulas. *Plant Physiology*. 171: 1491–1499.
- Ouzounis, T., Rosenqvist, E., & Ottosen, C. O. (2015). Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: a review. *HortScience*, 50(8), 1128-1135.
- Paniagua-Pardo, G., Hernández-Aguilar, C., Rico-Martínez, F., Domínguez-Pacheco, F. A., Martínez-Ortiz, E., & Martínez-González, C. L. (2015). Efecto de la luz led de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.). *Polibotánica*, (40), 199-212.
- Peer, W. A., & Langenheim, J. H. (1998). Influence of phytochrome on leaf monoterpene variation in *Satureja douglasii*. *Biochemical systematics and ecology*, 26(1), 25-34.
- Peer, W. A., & Langenheim, J. H. (1998). Influence of phytochrome on leaf monoterpene variation in *Satureja douglasii*. *Biochemical systematics and ecology*, 26(1), 25-34.
- Potter, D. J., & Duncombe, P. (2012). The Effect of Electrical Lighting Power and Irradiance on Indoor-Grown Cannabis Potency and Yield. *Journal of forensic sciences*, 57(3), 618-622.
- Qureshi, S., Shah, A.H., Al-Yahya, M.A., et al. (1991). Toxicity of *Achillea fragrantissima* and *Thymus vulgaris* in mice. *Fitoterapia*, 62(4), 319-323.
- Rosell Cáceres, G. (2014). Determinación del contenido total de polifenoles-flavonoides y actividades antioxidante y antibacteriana in vitro del extracto etanólico al 70% de *Thymus vulgaris* L." Tomillo" frente a *Staphylococcus aureus* CEPA ATCC 25923.

- Saito, Y., Shimizu, H., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2010). The effect of light quality on growth of lettuce. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(26), 294-298.
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Sakalauskaitė, A., Sakalauskienė, S. and Duchovskis, P. (2011). The impact of red and blue light-emitting diode illumination on radish physiological indices. *Cent. Eur. J. Biol.* 6(5): 821-828.
- Skramlik, E.V. (1959). Toxicity and toleration of volatile oils. *Pharmazie*, 14, 435-445.
- Soković, M. D., Vukojević, J., Marin, P. D., Brkić, D. D., Vajs, V., & Van Griensven, L. J. (2009). Chemical composition of essential oils of thymus and mentha species and their antifungal activities. *Molecules*, 14(1), 238-249.
- Soundararajan, P., & Kim, J. S. (2018). Anti-carcinogenic glucosinolates in cruciferous vegetables and their antagonistic effects on prevention of cancers. *Molecules*, 23(11), 2983.
- Su, N., Wu, Q., Shen, Z., Xia, K., & Cui, J. (2014). Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings. *Plant Growth Regulation*, 73(3), 227-235.
- Szczepanik, M., Zawitowska, B. and Szumny, A. (2012). Insecticidal Activities of *Thymus vulgaris* Essential Oil and Its Components (Thymol and Carvacrol) against Larvae of Lesser Mealworm, *Alphitobius diaperinus* Panzer (Coleoptera: Tenebrionidae). *Allelopathy Journal*, 30, 129-142.
- Thompson, J. D., Chalchat, J. C., Michet, A., Linhart, Y. B., & Ehlers, B. (2003). Qualitative and quantitative variation in monoterpene co-occurrence and composition in the essential oil of *Thymus vulgaris* chemotypes. *Journal of chemical ecology*, 29(4), 859-880.
- Tohidi, B., Rahimmalek, M., Arzani, A., Sabzalian, M.R. (2019). Thymol, carvacrol, and antioxidant accumulation in *Thymus* species in response to different light spectra emitted by light-emitting diodes. *Food Chemistry*.
- Tuan, P. A., Thwe, A. A., Kim, Y. B., Kim, J. K., Kim, S. J., Lee, S., ... & Park, S. U. (2013). Effects of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(50), 12356-12361.
- Turner, G., Gershenzon, J., Nielson, E. E., Froehlich, J. E., & Croteau, R. (1999). Limonene synthase, the enzyme responsible for monoterpene biosynthesis in peppermint, is localized to leucoplasts of oil gland secretory cells. *Plant physiology*, 120(3), 879-886.

- Thwe, A. A., Kim, Y. B., Li, X., Seo, J. M., Kim, S. J., Suzuki, T., ... & Park, S. U. (2014). Effects of light-emitting diodes on expression of phenylpropanoid biosynthetic genes and accumulation of phenylpropanoids in *Fagopyrum tataricum* sprouts. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(21), 4839-4845.
- Ubukawa, M., Fukuda, N., Oyama-Okubo, N., Koshioka, M., Mander, L. N., Sase, S., & Nishimura, S. (2004). Effect of light source and quality on endogenous gibberellin level and GA3 response of petunia (*Petunia hybrida* Vilm.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 73(5), 441-446.
- Verma, S. K., Gantait, S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2018). Enhanced growth and cardenolides production in *Digitalis purpurea* under the influence of different LED exposures in the plant factory. *Scientific reports*, 8(1), 1-12.
- Vernet, P., Gouyon, R. H., & Valdeyron, G. (1986). Genetic control of the oil content in *Thymus vulgaris* L: a case of polymorphism in a biosynthetic chain. *Genetica*, 69(3), 227-231.
- Wang, Y., & K.M. Folta, 2013. "Contributions of green light to plant growth and development". *American Journal of Botany*, 100(1): 70-78.
- Wei, X., Zhao, X., Long, S., Xiao, Q., Guo, Y., Qiu, C., ... & Wang, Y. (2021). Wavelengths of LED light affect the growth and cannabidiol content in *Cannabis sativa* L. *Industrial Crops and Products*, 165, 113433.
- Xiaoying, L., Shirong, G., Taotao, C., Zhigang, X., & Tezuka, T. (2012). Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED). *African Journal of Biotechnology*, 11(22), 6169-6177.
- Yoneda, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., Ohdoi, K., & Shimizu, H. (2017). Impact of blue, red, and far-red light treatments on gene expression and steviol glycoside accumulation in *Stevia rebaudiana*. *Phytochemistry*, 137, 57-65.
- Zhao, X., Yu, X., Foo, E., Symons, G. M., Lopez, J., Bendehakkalu, K. T. ... & Lin, C. (2007). A study of gibberellin homeostasis and cryptochrome-mediated blue light inhibition of hypocotyl elongation. *Plant physiology*, 145(1), 106-118.

3 LA CALIDAD DE LUZ EN EL CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN TOMILLO *Thymus vulgaris*

Enviado a la revista Agro Ciencia

Carlos de Jesús **Morales Becerril**¹, María Teresa **Colinas León**^{1*}, Ramón Marcos **Soto Hernández**²; María Teresa **Martínez Damián**¹, Guillermo **Mendoza Castelán**¹

RESUMEN

Nuevos métodos de producción vegetal que utilizan luz artificial para suplir o complementar la luz del sol, han demostrado que cambios en la calidad- longitud(es) de onda- de la luz incidente, producen cambios en el crecimiento, desarrollo y metabolismo secundario de las plantas, esto dependiendo del genotipo y otras condiciones ambientales, y han sido poco estudiados en plantas medicinales y comestibles. El presente trabajo tuvo como objetivo determinar la respuesta de plantas de tomillo (*Thymus vulgaris*), a diferentes calidades de luz. Se trataron plantas de tomillo con luz roja (670 nm), azul (450 nm), blanca y dos proporciones azul:rojo, por 16 horas al día a una intensidad de $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Los tratamientos se aislaron de la luz solar y entre ellos. Se encontró que la luz roja monocromática promovió la formación de plantas poco

¹Universidad Autónoma Chapingo-Departamento de Fitotecnia. Km. 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco Estado de México, México. C.P. 56230.

²Colegio de Posgraduados-Área de Botánica. Km. 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco Estado de México, México. C.P. 56230.

* Autor para correspondencia. lozcol@gmail.com

compactas, con baja acumulación de clorofilas, materia seca y compuestos fenólicos, respecto al tratamiento con luz blanca. La luz azul monocromática generó plantas compactas y con una mayor acumulación de clorofilas y materia seca que la luz roja, pero similares al tratamiento con luz blanca; respecto a los compuestos fenólicos, la acumulación es superior bajo estos últimos tratamientos que en los demás. Se encontró que el cultivo de plantas de tomillo bajo una calidad de luz 75A:25R resulta en un crecimiento compacto y mejora la acumulación de compuestos fenólicos.

Palabras clave: *Thymus vulgaris*, luz LED, materia seca, metabolismo secundario.

INTRODUCCIÓN

Las últimas décadas se han caracterizado, en lo que a producción de alimentos vegetales se refiere, por la búsqueda de métodos que permitan obtener elevadas cantidades de biomasa de alta calidad, inocua y amigable con el ambiente, en espacios pequeños y con una gran eficiencia en el uso de agua, fertilizantes y demás insumos requeridos por el proceso de producción. Los huertos verticales, las biofábricas y la denominada producción vegetal de interiores (SPVI), parecen ser los métodos de producción que mejor cumplen los mencionados objetivos (Bures *et al.* 2018). El ambiente lumínico es uno de los parámetros que se maneja con mayor cuidado en estos sistemas de producción, ya que la fotosíntesis y fotomorfogénesis dependen en su mayoría de la calidad (longitud de onda), intensidad y duración de la incidencia luminosa (Casierra y Peña, 2015; Alrifai *et al.*, 2019). La tecnología de iluminación LED, por su elevada eficiencia en el uso de energía eléctrica, baja emisión de calor y alta manipulación de la intensidad y calidad de la luz emitida (Gupta y Agarwal, 2017), se ha posicionado como la fuente de luz más utilizada en estos sistemas de producción, sustituyendo o complementando (en algunos casos) a la luz del sol.

Los SPVI se han utilizado, principalmente, para la producción de hortalizas de alto valor económico o de aquellas plantas cuya elevada cotización se debe a sus propiedades fitoquímicas útiles, como la medicina o la alimentación. Los reportes muestran que la eficiencia de un SPVI en la producción de biomasa o metabolitos secundarios tiene una fuerte dependencia del genotipo (Alrifai *et al.* 2019), es decir, las diferentes especies, e incluso diferentes cultivares, responden de manera particular cuando se establecen en estos sistemas, debido principalmente al efecto de la calidad de la luz incidente. Esto, en lugar de una limitante, representa una oportunidad técnica y científica para la investigación; que se pretende aprovechar en el presente trabajo.

El tomillo (*Thymus vulgaris*), una especie de la familia Lamiaceae, es utilizado en la cocina y en la medicina tradicional por sus metabolitos secundarios (Hosseinzadeh *et al.* 2015). Es una planta muy ramificada, de una altura máxima de 50 cm, rica en compuestos fenólicos y cuyo aceite esencial está compuesto principalmente por los monoterpenos timol y carvacrol, mismos que le otorgan su aroma característico (Gasca, 2001).

Sobre el papel de la calidad de la luz en los SPVI la investigación se ha dirigido principalmente a uso de luz azul (420-480 nm), roja (620-700 nm), combinaciones de estas y luz blanca, siendo secundario el uso de otras longitudes de onda (Landi *et al.* 2020). En lamiáceas la investigación se ha concentrado en aquellas especies con uso culinario. En albahaca (*Ocimum sp.*) la luz azul, en comparación con luz roja y blanca, promueve la formación de plantas más compactas (Matysiak y Kowalski, 2019). Así mismo se ha reportado que con luz roja es posible mejorar la capacidad antioxidante de los extractos de esta planta (Taulavuori *et al.* 2016).

En menta mexicana (*Plectranthus amboinicus*), Noguchi y Amaki (2016) descubrieron que, la luz azul ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) promueve la dominancia apical y la formación de plantas compactas, en comparación con tratamientos de luz roja y verde, que promueven plantas menos compactas y con mayores crecimientos laterales.

En este trabajo se aplicó luz LED blanca, roja, azul, 75A:25R y 75R:25A a $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sobre plantas jóvenes de tomillo, con el objetivo principal de evaluar su efecto sobre el crecimiento y acumulación de compuestos fenólicos y flavonoides. Con ello se pretende contribuir al conocimiento sobre el efecto de calidad de la luz a baja intensidad lumínica sobre esta especie, con miras a tener bases sólidas para su cultivo en SPVI; así como abonar al conocimiento científico en esta área de la fisiología vegetal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció durante los meses de abril a julio de 2021, en un invernadero. Se utilizaron plántulas de tomillo (*Thymus vulgaris*) obtenidas a partir de semilla (Vita®).

Las semillas se germinaron en condiciones de invernadero, con un sustrato compuesto por 70% turba y 30% perlita. Las primeras dos semanas después de la germinación se utilizó agua corriente para el riego de las plántulas. 14 días después de la germinación las plántulas se establecieron en macetas de 4" de diámetro con sustrato compuesto por una mezcla de 50% turba, 48% perlita y 2% vermicomposta; aplicando desde esta fecha, y hasta finalizado el experimento fertilizante Ultrasol® Multipropósito (NO_3^- : 9%, NH_4^+ : 9%, P_2O_5 : 18%, K_2O : 18%, MgO : 1%, EDTA-Fe: 0.04%, EDTA-Mn: 0.02%, EDTA-Zn: 0.02%, B: 0.01%, EDTA-Cu: 0.01%, Mo: 0.01%) a 1000 mg L^{-1} , una vez por semana y regando con agua corriente cada 2 días. Las plantas se mantuvieron en condiciones de luz natural por 28 días, en los cuales se les realizó dos desputes (a los

10 y 24 días) para promover la ramificación y homogenización de la parte aérea. Posteriormente se llevaron a condiciones de luz totalmente controladas donde permanecieron por 35 días hasta el inicio de los análisis de crecimiento y metabolismo secundario.

Como fuente de luz de los colores azul y rojo y sus combinaciones, se utilizaron cintas de LEDs tipo RGB 5050 con 30 módulos por metro (5 m), montadas sobre placas de madera de 15x40 cm; que permiten modificar el espectro lumínico entre los 400 y 700 nm, ajustadas a los requerimientos de cada tratamiento. Como fuente de luz blanca se utilizó cinta LED blanca tipo 3528, con 60 módulos por metro. La altura de las placas se ajustó para que incidieran sobre las plantas, $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidad luminosa, medida con radiómetro Apogee® modelo QMSW-SS. El fotoperiodo fue de 16 horas, iniciando a las 6:00 y finalizando a las 22 h.

Los tratamientos se establecieron en cajas de 80x40x80 cm de largo, ancho y altura respectivamente, con interior color blanco con la finalidad de que la luz se refleje y distribuya homogéneamente. La circulación de aire se dio mediante un ventilador de 4" y 12v colocado en la cara posterior a lo largo de la cámara, que se encendía por 10 min cada hora entre las 6:00-11:00 y 18:00-22:00, y por 15 min entre las 12:00 y las 17:00. Dentro de las cajas, en la parte superior se colocó la placa con los LEDs correspondiente a cada tratamiento.

La unidad experimental consistió en una planta de tomillo. Se establecieron 5 tratamientos con 10 repeticiones cada uno. El diseño experimental fue completamente al azar. Los tratamientos fueron: luz azul (tratamiento 5) y roja (tratamiento 3) monocromáticas, una combinación de 75% luz azul:25% luz roja (tratamiento 3) y 75% luz roja:75% luz azul (tratamiento 4), y un ambiente de luz blanca (tratamiento 1).

Dentro de cada cámara, las plantas se rotaban todos los días, con la finalidad de disminuir el error debido a la incidencia de la luz sobre las repeticiones, dentro de cada tratamiento. Así mismo, las plantas y placas -tratamientos- se rotaron entre cámaras cada cuatro días, con la finalidad de disminuir los errores debidos a las diferencias entre cámaras.

Después de 35 días de iniciados los tratamientos con luz LED se midió la altura de plantas; número de ramas (terciarias, cuaternarias y subsecuentes); índice relativo de clorofila, usando un medidor de unidades SPAD de la marca KONICA MINOLTA®, modelo SPAD-502Plus (cada medida -una repetición- salió del promedio de 10 tomas al azar a lo largo y ancho de la planta); Peso fresco y seco de la parte aérea y de 30 hojas en específico, para el secado se utilizó una estufa de la marca Aparatos Márquez®, a 60°C y hasta peso constante, mientras que las valoraciones del peso se obtuvieron en una balanza analítica de la marca METTLER® modelo AJ150L; y área foliar de una muestra de 30 hojas (dada la dificultad de separar todas las hojas de la planta, por su diminuto tamaño y la rapidez con la que se deshidratan), se tomó una muestra de 30 hojas de la parte baja de las ramas formadas durante la exposición tratamientos), se utilizó un integrador de área foliar de la marca LI-COR®, modelo LI-3100.

Para la extracción de compuestos fenólicos se utilizó 2 g de material vegetal fresco y triturado, por repetición. Se colocó en tubos de ensayo y se agregó 10 ml de MeOH 80%; se cubrieron y se llevaron a un baño con ultrasonido en un ciclo de 10 min encendido, 5 min apagado y 10 min encendido; finalmente se separó el material vegetal del extracto mediante centrifugación 1000 g por 5 min. Para la cuantificación de los compuestos fenólicos totales (C.F.T.) del sobrenadante se tomó una alícuota de 20 μ L, que se incubó con 480 μ L de agua, 25 μ L de solución del reactivo Folin-Ciocalteu 1:1 y

975 μ L de solución de carbonato de sodio a 2.5%, por una hora a temperatura ambiente. La absorbancia del producto colorido fue medida a 740 nm en un espectrofotómetro, contra un blanco que no contenía ni ácido gálico ni extracto. El valor de concentración de los C.F.T. se calculó a partir de una curva estándar obtenida con diferentes concentraciones de ácido gálico (coeficiente de correlación $R^2=0.9905$).

Para la cuantificación de flavonoides totales (F.T.) se tomó una alícuota de 20 μ L del extracto usado en la cuantificación de C.F.T. y se incubó por 40 min a temperatura ambiente con 980 μ L de MeOH 80%, 2 ml de acetato de potasio 1M y 2 ml de cloruro de aluminio al 10%. La absorbancia se midió a 415 nm con un espectrofotómetro contra un blanco que no contenía ni quercetina ni extracto de la muestra. El valor de concentración de los F.T. se calculó a partir de una curva estándar obtenida con diferentes concentraciones de quercetina (coeficiente de correlación $R^2=0.96$).

Se realizó análisis de varianza (ANAVA) para cada una de las variables consideradas, con un nivel de significancia de 0.05; en caso de resultar significativo se procedió con una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P\leq 0.05$). Para comparar a los diferentes tratamientos contra el tratamiento de luz blanca, se usó la prueba de Dunnett ($P\leq 0.05$). Se utilizó el programa estadístico SAS® versión 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cambios promovidos por los tratamientos, fueron estadísticamente significativos ($P\leq 0.05$) para la altura, el número de ramas, los pesos fresco y seco y la compactación de las plantas de tomillo. La altura fue máxima en el tratamiento 75R:25A y menor en todos los demás tratamientos (cuadro 1); esta proporción R:A (Rojo:Azul) también generó el mayor peso fresco, siendo, para esta variable, estadísticamente igual a los tratamientos de luz blanca y 25R:75A. Estos resultados se explican considerando que el

crecimiento de una planta está influenciado, entre muchos otros factores, por la actividad de los fitocromos (estimulados por la luz roja, roja lejana y azul) y la de los criptocromos (estimulados por luz azul y verde) y el balance entre estas (Stutte, 2009; Azcón-Bieto y Talón, 2013). La luz blanca promueve un balance similar al de la luz natural, mientras que tratamientos monocromáticos con luz roja o azul inducen un marcado desbalance, que desemboca en una reducción en el crecimiento (Landi *et al.* 2020); en el caso de las combinaciones R:A, la proporción es la que determina un mayor o un menor crecimiento (Hernández *et al.* 2016). Parece ser que, en tomillo, una mayor proporción de luz roja, promueve un aumento en esta variable. Los resultados aquí obtenidos coinciden parcialmente con los reportados en plántulas de tomate, en donde un decremento en la proporción R:A disminuye el crecimiento, siendo máximo en el tratamiento con luz roja monocromática (Hernández *et al.* 2016)

Tratamiento	Altura (cm)	Número de ramas	Compactación (g m ⁻²)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
Blanco	19.10 b [†]	31.50 b	1.90 a	3.57 ab	0.36 a
Rojo	19.47 b	32.75 ab	1.10 b	2.57 b	0.21 c
75R:25A	28.02 a	43.25 a	0.94 b	4.35 a	0.25 bc
75A:25R	18.97 b	36.00 ab	1.69 a	3.20 ab	0.32 ab
Azul	16.40 b	36.50 ab	1.67 a	2.55 b	0.27 bc
C.V. [¶]	16.1	14.54	7.81	16.84	11.73

Cuadro 1. Efecto de luz incidente sobre el crecimiento de plantas de tomillo.

[†]Medias seguidas con la misma letra en cada columna no son diferentes (Tukey, P≤0.05). [¶]C.V.: coeficiente de variación.

El peso seco fue mayor en los tratamientos con luz blanca y 75A:25R y menor en los tratamientos restantes. Una mayor acumulación de peso seco en el tratamiento policromático y bajo una alta proporción A:R, ha sido observada también en *Menta longifolia* (Sabzalian *et al.* 2014), *Oncidium sp.* (Chung *et al.* 2010) y pepino (Miao *et al.* 2016). Este efecto ha sido relacionado al proceso fotosintético, ya que se ha demostrado que la luz blanca en sí misma y la luz azul (comparada contra la luz roja) permiten o promueven una mayor proporción clorofila a/b (Hamdani *et al.* 2019), el correcto funcionamiento de los estomas (Lanoue *et al.* 2018), la adecuada distribución de los cloroplastos (Su *et al.* 2014), mayor abundancia de la enzima Rubisco (Landi *et al.* 2020) y elevada tasa de asimilación neta (Lanoue *et al.* 2018).

La compactación es la relación que existe entre el peso seco y la altura de la planta, y representa un parámetro de calidad en aquellas plantas que después de cosechadas se deshidratan para su conservación y posterior uso; como en este caso, el tomillo. Los resultados muestran que, aunque existieron diferencias entre los tratamientos, solo la luz blanca mantuvo un valor máximo (cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación entre los efectos de diferentes colores de luz respecto a luz blanca, sobre variables de crecimiento en tomillo.

Parámetro	Blanca	Roja	75R:25A	25R:75A	Azul
Altura (cm)	19.1	= [†]	31.83%	=	=
No. ramas	31.5	=	27.16%	=	=
Compactación (g m ⁻¹)	1.90	-42.10%	-50.52%	=	-11.77%
Peso fresco (g)	1.57	=	=	=	=
Peso seco (g)	0.36	-41.66%	-30.55%	=	-25%

Área foliar (cm ²)	7.42	=	=	=	=
Clorofila estimada (SPAD)	34.55	=	=	=	=
Peso específico de hojas (mg cm ⁻²)	2.72	-25.73%	=	-13.02%	=

†El símbolo “=” indica que no hay diferencias estadísticas (Dunnette $P \leq 0.05$) entre tal tratamiento y el tratamiento con luz blanca para la variable indicada. Los porcentajes indican la magnitud de la variación positiva o negativa respecto al tratamiento con luz blanca.

Otro parámetro cuyo aumento es deseable en el cultivo del tomillo, es la ramificación. Los resultados muestran que existen diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre el tratamiento blanco y 75R:25A (cuadro 2), siendo este último en el que se observa la media más alta. Una mayor ramificación está relacionada con una mayor brotación de yemas axilares, promovida por un cambio en el balance de las hormonas auxinas/citocininas, que tiende hacia las citocininas (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Esta tendencia en el tratamiento 75R:25A puede tener dos explicaciones: 1) la mayor altura de las plantas bajo este tratamiento, reduce la concentración de auxinas (movimiento basípeto desde el ápice) en las yemas más bajas de las ramas, mientras que la concentración de citocininas (movimiento acrópeto desde la raíz) no se altera, lo que promueve su brotación; y 2) el desbalance hormonal es efecto de la calidad de la luz incidente. Los antecedentes sobre el efecto de la calidad de la luz en el balance hormonal que promueve la brotación de yemas son muy escasos.

El efecto de la calidad de la luz incidente sobre las hojas de las plantas de tomillo resultó en diferencias estadísticamente significativas para todas las variables evaluadas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 3. Efecto del color de luz incidente sobre parámetros foliares en tomillo.

Tratamiento	Peso fresco (mg)	Peso seco (mg)	Clorofila estimada (SPAD)	Área foliar (cm ²)	Peso específico (mg cm ⁻²)
Blanco	215.02 a [†]	20.20 a	34.55 ab	7.42 ab	2.72 ab
Rojo	160.57 e	16.27 d	33.20 b	8.09 a	2.02 c
75R:25A	187.40 c	18.72 c	33.95 ab	6.54 b	2.87 a
75A:25R	167.07 d	16.05 d	37.25 ab	6.76 b	2.37 bc
Azul	204.55 b	19.47 b	37.52 a	6.70 b	2.91 a
C.V. [‡]	1.29	1.40	5.40	6.66	7.09

[†]Medias seguidas con la misma letra en cada columna no son diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). [‡]C.V.: coeficiente de variación.

El peso fresco y seco de estos órganos se comportó de manera similar. Los valores mayores se obtuvieron en el tratamiento con luz blanca y los menores en el tratamiento de luz roja en el caso del peso fresco y de luz roja y 75A:25R para el peso seco (cuadro 3). Una disminución de estas variables por efecto de la luz roja monocromática, se reportó por Gangadhar *et al.* (2012) en plantas de Chile, argumentan que el mayor peso seco observado en los tratamientos policromáticos (A:R, blanco) frente a los monocromáticos, se debe a que la luz azul y roja juntas (en los tratamientos policromáticos) aumentan la eficiencia del proceso fotosintético, dado que son precisamente estas longitudes de onda las que absorbe la clorofila. Sin embargo, nuestros resultados no coinciden con los observados en otras lamiáceas como menta japonesa (Nishioka *et al.* 2008) y perilla (Nishimura *et al.* 2009), donde la luz roja aumentó el peso fresco y seco de hojas.

La mayor área foliar fue obtenida bajo el tratamiento de luz roja; la menor, en los demás tratamientos a excepción del blanco, que es comparable estadísticamente ($P \leq 0.05$) a ambos grupos (cuadro 3). En perilla (Nishimura *et al.* 2009) y menta japonesa (Nishioka *et al.* 2008) ya se había reportado un incremento en el área foliar bajo luz roja, comparado con otros colores de luz. Varios estudios han adjudicado la expansión foliar promovida por luz roja a la influencia que tiene esta sobre los canales de calcio y potasio en las células de la epidermis, permitiendo un flujo de iones que, mediante un proceso osmótico, promueve el crecimiento (Volkenburgh, 1999).

El peso específico de las hojas, resultado del cociente entre la materia seca de la hoja y su área foliar, se ha usado como un estimador de la fotosíntesis, de la intercepción y absorción de luz y como un indicador de la acumulación de carbohidratos en estos órganos (González-Pérez *et al.* 2018). En el presente trabajo la exposición a luz roja o 75A:25R, resultó en un menor peso específico de las hojas (cuadro 3) comparado con los demás tratamientos. En el caso del tratamiento con luz roja, el área foliar es mayor y el peso seco de hojas y el contenido de clorofila es igual al tratamiento 75A:25R, lo que indica que, la disminución del peso específico de las hojas se debe a una mayor expansión foliar sin un aumento en la fotosíntesis.

Las diferencias en la calidad de la luz en los tratamientos, generaron cambios en la concentración de compuestos fenólicos (figura 1). En los tratamientos de luz azul y las combinaciones A:R se presentó una mayor concentración de estos metabolitos secundarios que en los tratamientos con luz roja y blanca. En el caso particular de los flavonoides, las mayores concentraciones se obtuvieron en los tratamientos 75A:25R y azul, mientras que bajo luz roja la concentración fue la menor (figura 1). Contrastando contra luz blanca, los resultados muestran que, los tratamientos con luz azul y 25R:75A

incrementan la concentración de compuestos fenólicos (cuadro 4). En el caso de los flavonoides, respecto a la luz blanca, la luz roja disminuye su concentración, mientras que la luz azul la incrementa (cuadro 4).

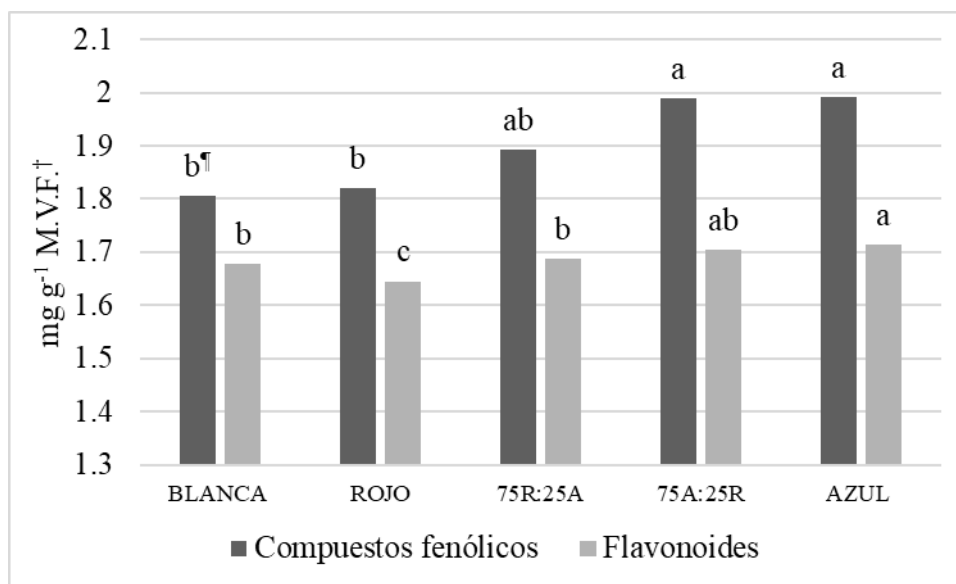


Figura 1. Efecto de luz incidente sobre el contenido de compuestos fenólicos en tomillo.
[†]M.V.F.: Material vegetal fresco. [†]Columnas de la misma variable con la misma letra, no son diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

Las rutas de biosíntesis de los compuestos fenólicos son fácilmente alteradas por las condiciones luminosas en que se encuentran las plantas (Alrifai *et al.* 2019; Landi *et al.* 2020). Muchos reportes coinciden en que la luz azul incrementa la biosíntesis y concentración de compuestos fenólicos, mientras que la luz roja produce el efecto contrario, en cultivos como lechuga (Johkan *et al.* 2010), fresa (Choi *et al.* 2015) y albahacar (Taulavuori *et al.* 2016).

Cuadro 4. Comparación entre los efectos de diferentes colores de luz respecto a luz blanca, sobre la concentración de algunos metabolitos secundarios en tomillo.

Parámetro	Blanca	Roja	75R:25A	25R:75A	Azul
[Compuestos fenólicos] (mg g ⁻¹ M.V.F. [†])	1.80	= [¶]	=	+10.15%	+10.26%
[Flavonoides] (mg g ⁻¹ M.V.F.)	1.67	-1.96%	=	=	+2.12%

[†]Material vegetal fresco. [¶]El símbolo “=” indica que no hay diferencias estadísticas (Dunnnett $P \leq 0.05$) entre tal tratamiento y el tratamiento con luz blanca para la variable indicada. Los porcentajes indican la magnitud de la variación positiva o negativa respecto al tratamiento con luz blanca.

El papel de la luz azul en la biosíntesis de compuestos fenólicos está relacionado con la síntesis de enzimas clave en la ruta, como la PAL (fenilalanina amonio-liasa), enzima importante al inicio de la ruta del ácido shikímico (Kim *et al.* 2015). Así mismo se ha reportado un incremento, bajo luz azul contrastada con blanca y roja, en la expresión de los genes que codifican a las enzimas: C4H (ácido 4-cinámico hidroxilasa), CHI (chalcona isomerasa), FLSII (flavonol sintasa II), ANS (antocianidina sintasa) (Thwe *et al.* 2014), F3'H (flavonoide 3' hidroxilasa) y FLS (flavonol sintasa) (Kim *et al.* 2015), mismas que participan en diversas rutas de la biosíntesis de compuestos fenólicos.

Respecto a los flavonoides, también se ha reportado un comportamiento similar al de los compuestos fenólicos en general; la luz azul incrementa su síntesis (Taulavuori *et al.* 2016). Liu *et al.* (2018) encontraron que el incremento en la síntesis de flavonoides bajo luz azul y verde (respecto a luz blanca y roja) correlaciona con una mayor expresión de

los genes que codifican a las enzimas PAL, 4CL y CHS. Dichas enzimas participan en la ruta de síntesis de este grupo de polifenoles, lo que explica el comportamiento descrito.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con luz blanca y la combinación 75A:25R, dieron origen a plantas compactas y con una mayor acumulación de materia seca; mientras que, la luz roja o 75R:25A, promovieron plantas con menor acumulación de materia seca y poco compactas. En los tratamientos con luz azul y 75A:25R se obtuvo mayor cantidad de compuestos fenólicos en general y flavonoides. El tratamiento de plantas de tomillo con una combinación de luz 75A:25R, da origen a plantas con un crecimiento compacto y mayor concentración de compuestos fenólicos.

LITERATURA CITADA

- Alrifai, O., X. Hao, M. F. Marcone, and R. Tsao. 2019. Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. *Journal of agricultural and food chemistry*. 67.
- Azcón B., J. y M. Talón. 2013. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Segunda Edición. Mc. Graw Hill- Interamericana de España, S.L. Madrid, España. 652 p.
- Bures, S., M. Urrestarazu, and S. Kotiranta. 2018. Iluminación artificial en agricultura. Artículo técnico.
- Casierra P. F., y J. Peña O. 2015. Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 29: 84-92.

- Choi, H. G., B. Y. Moon, and N. J. Kang. 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.
- Chung, J. P., C. Y. Huang, and T. E. Dai. 2010. Spectral effects on embryogenesis and plantlet growth of *Oncidium* 'Gower Ramsey'. *Scientia horticulturae*. 124: 511-516.
- Gangadhar, B. H., R. K. Mishra, G. Pandian, & S. W. Park. 2012. Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annuum*) under different light-emitting diode treatments. *HortScience*. 47: 1729-1735.
- Gasca, J. M. G. 2001. Tomillo (*Thymus vulgaris* L.). *Medicina naturista* 3: 53-55.
- González P., J. S., A. E. Becerril R., A. Quevedo N., C. Velasco C., y D. Jaén C. 2018. Peso específico de hoja y concentración de nitrógeno durante la fenología del ciruelo japonés CV. Methley. *Agro Productividad*. 11.
- Gupta, S. D., and A. Agarwal. 2017. Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In *Light emitting diodes for agriculture* (pp. 1-25). Springer, Singapore.
- Hamdani, S., N. Khan, S. Perveen, M. Qu, J. Jiang, and X. G. Zhu. 2019. Changes in the photosynthesis properties and photoprotection capacity in rice (*Oryza sativa*) grown under red, blue, or white light. *Photosynthesis research*. 139: 107-121.
- Hernández, R., T. Eguchi, M. Deveci, and C. Kubota. 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.

- Hosseinzadeh, S., A. Jafarikukhdan, A. Hosseini, and R. Armand. 2015. The application of medicinal plants in traditional and modern medicine: a review of *Thymus vulgaris*. *International Journal of Clinical Medicine*. 6: 635.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. N. Hashida, and T. Yoshihara. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45: 1809-1814.
- Kim, Y. J., Y. B. Kim, X. Li, S. R. Choi, S. Park, ..., and S. U. Park. 2015. Accumulation of phenylpropanoids by white, blue, and red light irradiation and their organ-specific distribution in Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Journal of agricultural and food chemistry*. 63: 6772-6778.
- Landi, M., M. Zivcak, O. Sytar, M. Brestic, and S. I. Allakhverdiev. 2020. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *BBA-Bioenergetics*. 1861.
- Lanoue, J., E. D. Leonardos, and B. Grodzinski. 2018. Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in plant science*. 9: 756.
- Liu, Y., S. Fang, W. Yang, X. Shang, and X. Fu. 2018. Light quality affects flavonoid production and related gene expression in *Cyclocarya paliurus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 179: 66-73.
- Matysiak, B., & A. Kowalski. 2019. White, blue and red LED lighting on growth, morphology and accumulation of flavonoid compounds in leafy greens. *Zemdirbyste-Agriculture*. 106.

- Miao, Y. X., X. Z. Wang, L. H. Gao, Q. Y. Chen, and Q. U. Mei. 2016. Blue light is more essential than red light for maintaining the activities of photosystem II and I in cucumber leaves. *Journal of Integrative Agriculture*. 15: 87-100.
- Nishimura, T., K. Ohyama, E. Goto, and N. Inagaki. 2009. Concentrations of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments. *Scientia horticulturae*. 122: 134-137.
- Nishioka, N., T. Nishimura, K. Ohyama, M. Sumino, ... & T. Morota. 2008. Light quality affected growth and contents of essential oil components of Japanese mint plants. In *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions 797* (pp. 431-436).
- Noguchi, A., and W. Amaki. 2016. Effects of light quality on the growth and essential oil production in Mexican mint. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 239-244).
- Sabzalian, M. R., P. Heydarizadeh, M. Zahedi, M. Agharokh, M. Sahba, and B. Schoefs. 2014. High performance of vegetables, flowers, and medicinal plants in a red-blue LED incubator for indoor plant production. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Stutte, G. W. 2009. Light-emitting Diodes for Manipulating the Phytochrome Apparatus. *Hortscience*. 44: 231-234.
- Su, N., Q. Wu, Z. Shen, K. Xia, and J. Cui. 2014. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings. *Plant Growth Regulation*. 73: 227-235.
- Taulavuori, K., V. Hyöky, J. Oksanen, E. Taulavuori, and R. Julkunen-Tiitto. 2016. Species-specific differences in synthesis of flavonoids and phenolic acids under

increasing periods of enhanced blue light. *Environmental and experimental botany*. 121: 145-150.

Thwe, A. A., Y. B. Kim, X. Li, J. M. Seo, S. J. Kim, T. Suzuki, ... and S. U. Park. 2014. Effects of light-emitting diodes on expression of phenylpropanoid biosynthetic genes and accumulation of phenylpropanoids in *Fagopyrum tataricum* sprouts. *Journal of agricultural and food chemistry*. 62: 4839-4845.

Volkenburgh, E. V. 1999. Leaf expansion—an integrating plant behaviour. *Plant, Cell & Environment*. 22: 1463-1473.

4 DIFERENCIAS EN LUZ INCIDENTE AFECTAN LA COMPOSICIÓN DEL ACEITE ESENCIAL EN PLANTAS DE TOMILLO

DIFFERENCES IN INCIDENT LIGHT AFFECT ESSENTIAL OIL COMPOSITION IN THYME PLANTS

Resumen

Existen reportes que indican que cambios en la calidad de la luz (color o longitud de onda), inducen cambios en la composición química del aceite esencial en diversas especies, resaltando la luz roja, roja lejana y azul como promotoras de estos cambios. Se realizó el presente trabajo con el objetivo de identificar si cinco diferentes calidades de luz producen cambios en la concentración de los componentes principales del aceite esencial de tomillo (*Thymus vulgaris*). El experimento consistió en el tratamiento de plantas de tomillo por 35 días con luz blanca, roja, azul, una combinación 75% roja – 25% azul y 75% azul – 25% roja, a $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 16 horas de fotoperiodo, establecidas en macetas de 4" dentro de cámaras de aislamiento. Los resultados mostraron que, la concentración de los componentes principales en el aceite esencial de tomillo, cambio notablemente entre los diferentes tratamientos, incrementándose la concentración del timol (el componente mayoritario) en los tratamientos con luz blanca y 75R:25A. Así mismo, se observó que la composición del aceite esencial obtenida bajo estos tratamientos, cambia drásticamente al compararse contra la composición química de esta especie referida en la literatura. Se concluye que cambios en la calidad de la luz incidente sobre plantas de tomillo, producen cambios notables en la composición química de su aceite esencial.

Palabras clave: *Thymus vulgaris*, calidad de luz, terpenoides.

Abstract

Many reports conclude that changes in light quality (color or wavelength) induce changes in the essential oil chemical composition of some species, standing out red, far red and blue light as promoters of these changes. The present work was carried out with objective of identifying if five different light qualities produce changes in concentration of the main components of thyme essential oil. The experiment consisted in treating thyme plants for 35 days with white, red, blue light, a combination of 75% red - 25% blue and 75% blue - 25% red, at $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and 16 h of photoperiod, established in 4" pots inside insulation chambers. Results showed, the concentration of the main components in the thyme essential oil, changed notably between the different treatments, increasing the concentration of thymol (the main component) in treatments with white light and 75R: 25A. Likewise, it was observed that the composition of the essential oil obtained under these treatments changes dramatically compared to the chemical composition of this species referred in literature. It is concluded that changes in the incident light quality on thyme plants produce notable changes in the chemical composition of their essential oil.

Key words: *Thymus vulgaris*, light quality, terpenoids.

Introducción

El tomillo (*Thymus vulgaris*) es una popular especie que pertenece a la familia Lamiaceae, nativa del Mediterráneo y que, debido a sus innumerables usos ha sido distribuida hacia gran parte de mundo (Hosseinzadeh *et al.*, 2015). Se ha reportado que produce hasta 1.2% (en peso fresco) de aceite esencial, mismo que está compuesto por timol (40-50% del total del aceite esencial), p-cimeno (15-20.0%), γ -terpineno (3-15%), carvacrol (3-4%), β -cariofileno (2-4%), y δ -cadineno (1-3%) (Hudaib *et al.*, 2002; Nikolić *et al.*, 2014; Soković *et al.*, 2009; Tompson *et al.*, 2002). Entre las múltiples propiedades adjudicadas al aceite esencial encontramos: actividad antioxidante (Nikolić *et al.*, 2014; Kulisic *et al.*, 2005), antibiótica (Basch *et al.*, 2004; Nikolić *et al.*, 2014), antiviral (Nolkemper *et al.*, 2006), antitumoral (Nikolić *et al.*, 2014) y antitusiva (Knols *et al.*, 1994). Diversos autores (Marchese *et al.*, 2016; Martínez-Pabón y Ortega-Cuadros, 2020; Muñoz-Acevedo *et al.*, 2009) coinciden en que estas propiedades se deben a la riqueza de timol en el aceite esencial.

Investigaciones previas han demostrado que cambios en la calidad de la luz que incide sobre las plantas, producen cambios en el crecimiento, desarrollo y metabolismo secundario. Entre los experimentos para dilucidar el efecto de la calidad de luz sobre la composición química de plantas de la familia lamiácea está el de Peer y Langenheim (1998), quienes para saber si la producción de terpenoides en plantas de *Satureja douglasii* estaba regulada por los fitocromos, trataron plantas con fuentes de luz de colores rojo y rojo lejano (lámparas fluorescentes). Los autores concluyeron que los fitocromos no controlan la producción de terpenoides en esta especie, sin embargo, sí influyen sobre la concentración de algunas moléculas pertenecientes a este grupo (como el timol); así mismo aseguran que, aunque la producción de terpenoides está influenciada por factores ambientales, depende, mayoritariamente, de las características genéticas de la especie.

En menta japonesa (*Mentha arvensis* L) el tratamiento con luz de color rojo (150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, fotoperiodo de 16 horas) incrementó el contenido de mentol,

mentona y limoneno, contrastado con los tratamientos con luz azul y verde (Nishioka *et al.*, 2008). En *Perilla frutescens* (L.) Britt. var. Acuta, los tratamientos con luz roja, así como aquellos donde se incluía a esta longitud de onda (rojo-azul y rojo-verde) dieron origen a plantas con menor concentración de perillaldehído y limoneno, los componentes principales del aceite esencial (Nishimura *et al.*, 2009).

Trabajando con menta mexicana (*Plectranthus amboinicus*) Noguchi y Amaki (2016), describieron que, el tratamiento con luz roja ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 16 h de fotoperiodo) promovió una mayor concentración de compuestos con menor tiempo de retención en columna durante la cromatografía de gases, como el α -pineno, β -pineno y limoneno; la luz verde promovió la concentración de compuestos con tiempo de retención en columna intermedio, como borneol y bornil-acetato; mientras que, la luz azul promovió la acumulación de compuestos cuyo tiempo de retención en columna fue el máximo, como β -farneseno, germancenoD y elemeno. Los autores concluyeron que, la menta mexicana es muy sensible a los cambios en la calidad de la luz, asegurando que, la luz azul promueve la ruta metabólica biosintética de los sesquiterpenoides.

Los ejemplos anteriores dejan en claro que es posible observar modificaciones fitoquímicas al tratar plantas con diferentes calidades de luz, lo que da una oportunidad a la investigación dirigida a mejorar la calidad de los aceites esenciales de importancia antropocéntrica. El objetivo del presente trabajo es describir los cambios en la composición del aceite esencial de plantas de tomillo al ser tratadas con diferentes calidades de luz a baja intensidad.

Materiales y métodos

Ubicación, material vegetal y condiciones del cultivo

El experimento se estableció durante los meses de abril a julio de 2021, en uno de los invernaderos del Instituto de Horticultura dentro del campus central de la

Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizaron plántulas de tomillo (*Thymus vulgaris*) obtenidas a partir de semilla (Vita®).

Las semillas se germinaron en condiciones de invernadero, con un sustrato compuesto por 70% turba y 30% perlita. Las primeras dos semanas después de la germinación se utilizó agua corriente para el riego de las plántulas. 14 días después de la germinación las plántulas se establecieron en macetas de 4" de diámetro con sustrato compuesto por una mezcla de 50% turba, 48% perlita y 2% vermicomposta; aplicando desde esta fecha, y hasta finalizado el experimento fertilizante Ultrasol® Multipropósito (NO₃⁻: 9%, NH₄⁺: 9%, P₂O₅: 18%, K₂O: 18%, MgO: 1%, EDTA-Fe: 0.04%, EDTA-Mn: 0.02%, EDTA-Zn: 0.02%, B: 0.01%, EDTA-Cu: 0.01%, Mo: 0.01%) a 1000 mg L⁻¹, una vez por semana y regando con agua corriente cada 2 días. Las plantas se mantuvieron en condiciones de luz natural por 28 días, en los cuales se realizaron dos despuntes (a los 10 y 24 días) para promover la ramificación y homogenización de la parte aérea. Posteriormente se llevaron a condiciones de luz totalmente controladas donde permanecieron por 35 días hasta el inicio de los análisis de crecimiento y metabolismo secundario.

Tratamientos y diseño experimental

La unidad experimental consistió en una planta de tomillo. Se establecieron 5 tratamientos con 10 repeticiones cada uno. El diseño experimental fue completamente al azar. Los tratamientos consistieron en luz azul y roja monocromáticas, así como una combinación de 75% luz azul:25% luz roja y 75% luz roja:75% luz azul, y un ambiente de luz blanca.

Como fuente de luz de los colores azul y rojo y sus combinaciones, se utilizaron cintas de LEDs tipo RGB 5050 con 30 módulos por metro (5 m), montadas sobre placas de madera de 15x40 cm; que permiten modificar el espectro lumínico entre los 400 y 700 nm, ajustadas a los requerimientos de cada tratamiento. Como fuente de luz blanca se utilizó cinta LED blanca tipo 3528, con 60 módulos por metro. La altura de las placas se ajustó para que incidieran sobre las plantas, 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidad luminosa, medida con

radiómetro Apogee® modelo QMSW-SS. El fotoperiodo fue de 16 horas, iniciando a las 6:00 y finalizando a las 22 h.

Los tratamientos se establecieron en cajas de 80x40x80 cm de largo, ancho y altura respectivamente, cuyo interior es de color blanco con la finalidad de que la luz se refleje y distribuya homogéneamente. La circulación de aire se dio mediante un ventilador de 4" y 12v colocado en la cara posterior a lo largo de la cámara, que se encendía por 10 min cada hora entre las 6:00-11:00 y 18:00-22:00, y por 15 min entre las 12:00 y las 17:00. Dentro de las cajas, en la parte superior se colocó la placa con la placa de LEDs correspondiente a cada tratamiento. La temperatura dentro del invernadero se mantuvo debajo de 28°C, utilizando ventiladores activados por un sensor de temperatura. Dentro de las cajas las plantas se rotaban todos los días y cada cuarto día los tratamientos se cambiaban de caja con la finalidad de disminuir el error experimental.

Variables medidas

Después de 35 días de iniciados los tratamientos con luz LED se cosecho y pesó la parte aérea de las plantas. Para la extracción de aceite esencial se trituró la parte aérea de la planta y se agregó acetato de etilo (Sigma®) en proporción de 7.4 ml por cada gramo de material vegetal, se dejó reposar por 30 min y posteriormente se separaron los residuos de material vegetal.

Los extractos se llevaron a volumen de 10 mL con acetato de etilo, secados con sulfato de sodio anhidro y filtrados. Para analizar los aceites se utilizó un cromatógrafo marca Agilent Technologies, acoplado a un detector de masas HP 5973, con una columna HP5/30 m x 0.225 mm de diámetro interno. La temperatura inicial del horno fue de 60°C y se mantuvo por 1 min para después incrementar de forma lineal a 260°C, a velocidad de 7°C/min, la cual se mantuvo por un minuto. El flujo constante de helio, con pureza de 99.999 %, fue de 1 mL/min. La temperatura del inyector en modo "splitless" fue de 260 °C. La energía de ionización fue de 70 eV. Las temperaturas de la fuente de iones y del cuadrupolo fueron de 250 °C y 150 °C, respectivamente. La temperatura de la interfase fue de 280 °C. El volumen de inyección fue de 1 µL. La

identificación de los compuestos se hizo mediante la comparación de los espectros de masas de los picos de interés con los de la biblioteca NIST 2011.

Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza y posteriormente una prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$), para cada una de las variables. La identificación de compuestos en los extractos del aceite esencial se realizó por triplicado.

Resultados y discusión

Los resultados mostraron que, los compuestos principales en el aceite esencial obtenido en la presente investigación fueron: timol (38-52%), β -terpineno (14-23%), Ácido sulfuroso, dodecil 2-propil éster (6-20%), perilleno (4-7%) y timol acetato (3-8%). A excepción del contenido de timol, la presencia y concentración de las demás moléculas contrasta con lo reportado en la literatura, ya que varios autores coinciden en que el aceite esencial de tomillo está compuesto por: por timol (40-50%), p-cimeno (15-20.0%), γ -terpineno (3-15%), carvacrol (3-4%), β -cariofileno (2-4%), y δ -cadineno (1-3%) (Hudaib *et al.*, 2002; Nikolić *et al.*, 2014; Soković *et al.*, 2009; Tompson *et al.*, 2002). La diferencia en los resultados la adjudicamos al efecto de los tratamientos, ya que, a diferencia de los reportes previos, en donde el cultivo del tomillo se realizó bajo luz natural, en este trabajo las plantas fueron tratadas con una baja intensidad luminosa de diferentes longitudes de onda, y ya previamente se ha reportado que estos cambios influyen fuertemente sobre la composición del aceite esencial (Milenković *et al.*, 2021; Nishioka *et al.*, 2008; Noguchi y Amaki, 2016).

El efecto de la calidad de la luz sobre la concentración de los compuestos principales (figura 1), es notorio. La concentración del timol fue mayor en el tratamiento con luz blanca y con luz 75R:25A, y menor en los demás tratamientos. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Tohini *et al.* (2020) quienes reportan un mayor incremento en la concentración de timol en tomillo bajo el tratamiento con luz azul y no con luz roja. Tales diferencias pueden adjudicarse a la gran diferencia en la intensidad luminosa bajo la que se

realizaron nuestros experimentos, ya que Tohini *et al.* (2020) trabajaron con una intensidad de $300 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mientras que en la presente investigación se utilizaron $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

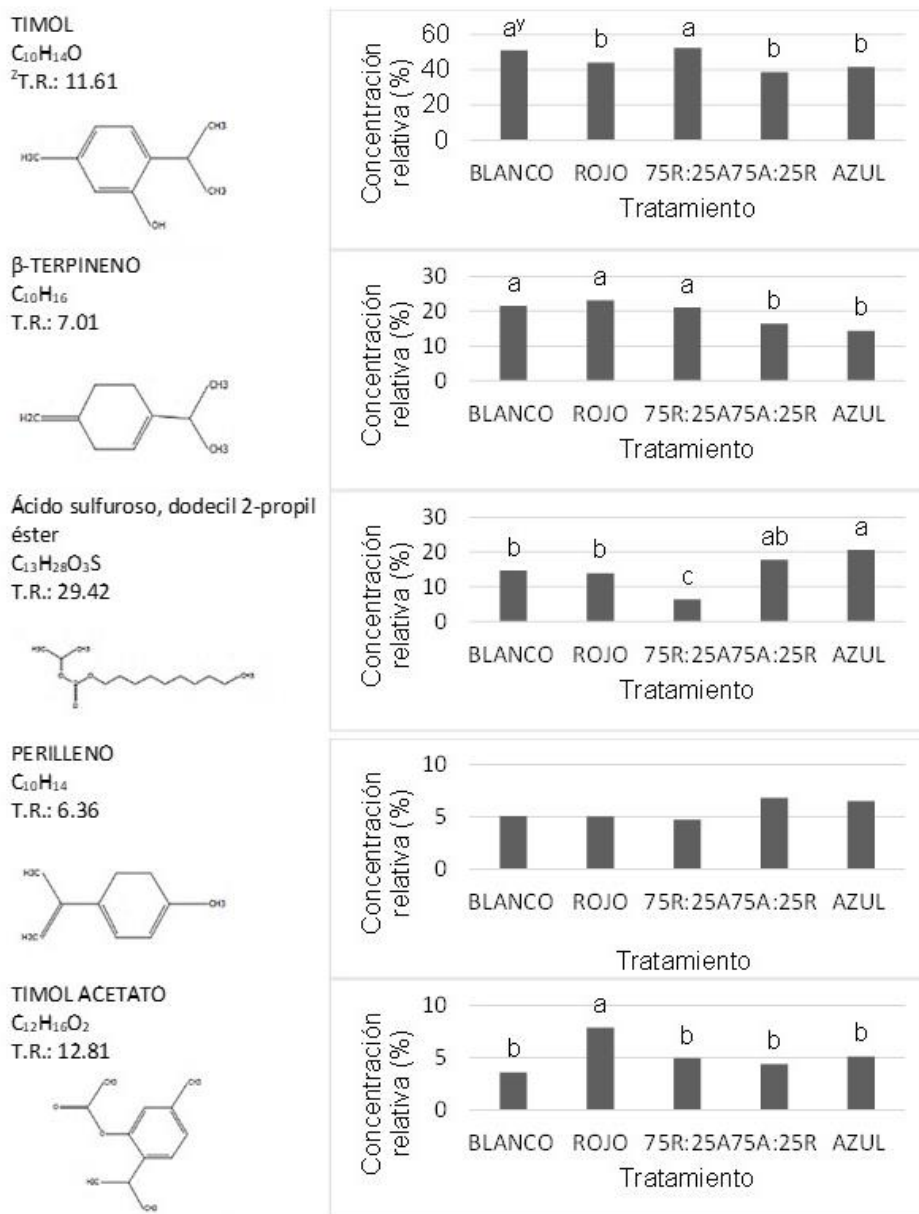


Figura 3. Efecto de la calidad de la luz sobre los compuestos principales en el aceite esencial de tomillo. $^2\text{T.R.}$: Tiempo de retención en la columna. y Barras en un mismo gráfico, con letras diferentes no son iguales estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el caso del β -terpineno, la mayor concentración se obtuvo bajo luz roja, siendo la media de este tratamiento, estadísticamente igual ($P \leq 0.05$) a las medias de los tratamientos con luz 75R:25A y luz blanca. El timol acetato tuvo su máxima concentración bajo el tratamiento con luz roja, siendo menor en los demás. Para el perilleno, la luz azul y el tratamiento con mayor proporción de luz azul, promovieron una mayor concentración.

Si se consideran las diferencias que existen en los tiempos de retención en la columna del cromatógrafo de gases de estos tres compuestos, observamos que aquellos con un tiempo de retención en la columna menor a la media (15 min), se concentran más bajo el tratamiento con luz roja o 75R:25A; mientras que, el ácido sulfuroso dodecil 2-propil ester, cuyo tiempo de retención en la columna es superior a la media, se concentró más en el tratamiento con luz azul. Esta conclusión coincide con lo descrito por Noguchi y Amaki (2016) quienes observaron el mismo fenómeno en menta mexicana (*Plectranthus amboinicus*).

Conclusiones

Después de 35 días de tratamiento con luz LED a $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, las plantas de tomillo muestran cambios en la composición del aceite esencial entre los diferentes tratamientos. El contenido de timol, se incrementa bajo los tratamientos con luz blanca y 75R:25A, con respecto a los tratamientos con luz roja, azul y 75A:25R.

Fuentes consultadas

- Basch, E., Ulbricht, C., Hammerness, P., Bevins, A., & Sollars, D. (2004). Thyme (*Thymus vulgaris* L.), thymol. *Journal of herbal pharmacotherapy*, 4(1), 49-67.
- Hosseinzadeh, S., Jafarikukhdan, A., Hosseini, A., & Armand, R. (2015). The application of medicinal plants in traditional and modern medicine: a review of *Thymus vulgaris*. *International Journal of Clinical Medicine*, 6(09), 635.

- Hudaib, M., Speroni, E., Di Pietra, A. M., & Cavrini, V. (2002). GC/MS evaluation of thyme (*Thymus vulgaris* L.) oil composition and variations during the vegetative cycle. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 29(4), 691-700.
- Knols, G., Stal, P.C., Van Ree, J.W. (1994). Productive coughing complaints: Sirupus Thymi or Bromhexine? A double-blind randomized study. *Huisarts en Wetenschap*, 37, 392-394.
- Kulisić, T., Radonić, A., & Milos, M. (2005). Antioxidant properties of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and wild thyme (*Thymus serpyllum* L.) essential oils. *Italian journal of food science*, 17(3), 315.
- Marchese, A., Orhan, I. E., Daglia, M., Barbieri, R., Di Lorenzo, A., Nabavi, S. F., ... & Nabavi, S. M. (2016). Antibacterial and antifungal activities of thymol: A brief review of the literature. *Food chemistry*, 210, 402-414.
- Martínez-Pabón, M. C., & Ortega-Cuadros, M. (2020). Timol, mentol y eucaliptol como agentes para el control microbiológico en cavidad bucal: una revisión exploratoria. *Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas*, 49(1).
- Milenković, L., Ilić, Z. S., Šunić, L., Tmušić, N., Stanojević, L., Stanojević, J., & Cvetković, D. (2021). Modification of light intensity influence essential oils content, composition and antioxidant activity of thyme, marjoram and oregano. *Saudi Journal of Biological Sciences*.
- Muñoz-Acevedo, A., Kouznetsov, V. V., & Stashenk, E. E. (2009). Composición y capacidad antioxidante in-vitro de aceites esenciales ricos en Timol, Carvacrol, trans-Anetol o Estragol. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 41(3), 287-294.
- Nikolić, M., Glamočlija, J., Ferreira, I. C., Calhelha, R. C., Fernandes, Â., Marković, T., ... & Soković, M. (2014). Chemical composition, antimicrobial, antioxidant and antitumor activity of *Thymus serpyllum*

L., *Thymus algeriensis* Boiss. and Reut and *Thymus vulgaris* L. essential oils. *Industrial Crops and Products*, 52, 183-190.

Nishimura, T., Ohyama, K., Goto, E., & Inagaki, N. (2009). Concentrations of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments. *Scientia horticulturae*, 122(1), 134-137.

Nishioka, N., Nishimura, T., Ohyama, K., Sumino, M., Malayeri, S. H., Goto, E., ... & Morota, T. (2008, October). Light quality affected growth and contents of essential oil components of Japanese mint plants. In *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions 797* (pp. 431-436).

Noguchi, A., & Amaki, W. (2016, May). Effects of light quality on the growth and essential oil production in Mexican mint. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134* (pp. 239-244).

Nolkemper, S., Reichling, J., Stintzing, F. C., Carle, R., & Schnitzler, P. (2006). Antiviral effect of aqueous extracts from species of the Lamiaceae family against Herpes simplex virus type 1 and type 2 in vitro. *Planta medica*, 72(15), 1378-1382.

Peer, W. A., & Langenheim, J. H. (1998). Influence of phytochrome on leaf monoterpene variation in *Satureja douglasii*. *Biochemical systematics and ecology*, 26(1), 25-34.

Soković, M. D., Vukojević, J., Marin, P. D., Brkić, D. D., Vajs, V., & Van Griensven, L. J. (2009). Chemical composition of essential oil of thymus and mentha species and their antifungal activities. *Molecules*, 14(1), 238-249.

Thompson, J. D., Chalchat, J. C., Michet, A., Linhart, Y. B., & Ehlers, B. (2003). Qualitative and quantitative variation in monoterpene co-occurrence and composition in the essential oil of *Thymus vulgaris* chemotypes. *Journal of chemical ecology*, 29(4), 859-880.

Tohidi, B., Rahimmalek, M., Arzani, A., & Sabzalian, M. R. (2020). Thymol, carvacrol, and antioxidant accumulation in *Thymus* species in response to different light spectra emitted by light-emitting diodes. *Food chemistry*, 307, 125521.