

La luz y su efecto en las plantas

Carlos Eligio Hernández-Navarrete
Humberto Aguirre-Becerra

La radiación electromagnética es una combinación de campo eléctrico y campo magnético. Ambos fenómenos existen de forma independiente en la naturaleza; sin embargo, su interacción produce lo que conocemos como ondas electromagnéticas. La radiación solar que llega a nuestro planeta puede dividirse en tres secciones; la luz es la zona del espectro visible para el ser humano, comprendido entre el rojo (700 nm) y el violeta (420 nm), pasando por el naranja (600 nm), el amarillo (570 nm), el verde (520 nm) y el azul (480 nm) (Figura 1). A la derecha de la luz visible encontramos la radiación ultravioleta (100 nm-400 nm), y a la izquierda, los infrarrojos (700 nm a 1 mm). Específicamente, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400 nm-700 nm) es necesaria para el metabolismo primario de las plantas, ya que interactúa con la clorofila y otros pigmentos antena (moléculas que captan la energía luminosa y proporcionan color a las plantas) durante el proceso de fotosíntesis para transformar la luz en moléculas de glucosa que, posteriormente, formarán parte de otras cadenas bioquímicas para generar biomasa.

Sin embargo, niveles deficientes o excesivos de radiación solar tienen un efecto perjudicial en los organismos fotosintéticos, ocasionando problemas en su desarrollo (metabolismo primario) y activando su metabolismo secundario que está relacionado con su defensa ante el estrés biótico y abiótico. Adicionalmente, las plantas responden a la cantidad de luz y longitudes de onda específicas a

través de diferentes fotorreceptores englobados en cinco grupos: fototropinas, fitocromos, criptocromos, zeitlupes y UVR8, los cuales están relacionados con fenómenos como la elongación (alargamiento de las plantas), fototropismo (inclinación de las plantas hacia la fuente de luz), ciclo circadiano (reloj interno), defensa ante niveles excesivos de radiación ultravioleta (UV), entre otros (Meisel *et al.*, 2011).

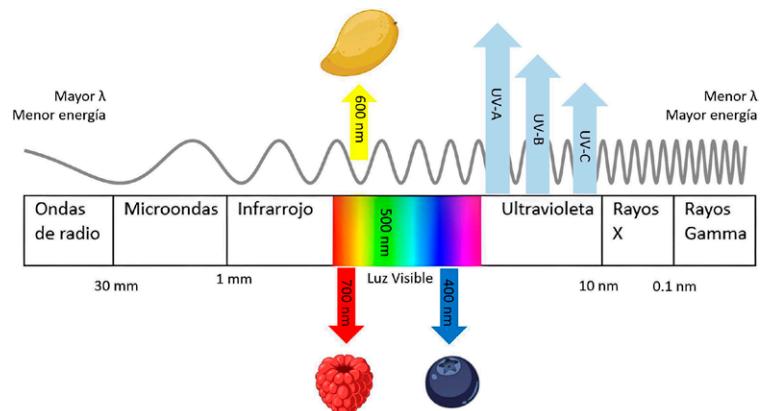


Figura 1. Fenómeno electromagnético y sus longitudes de onda.

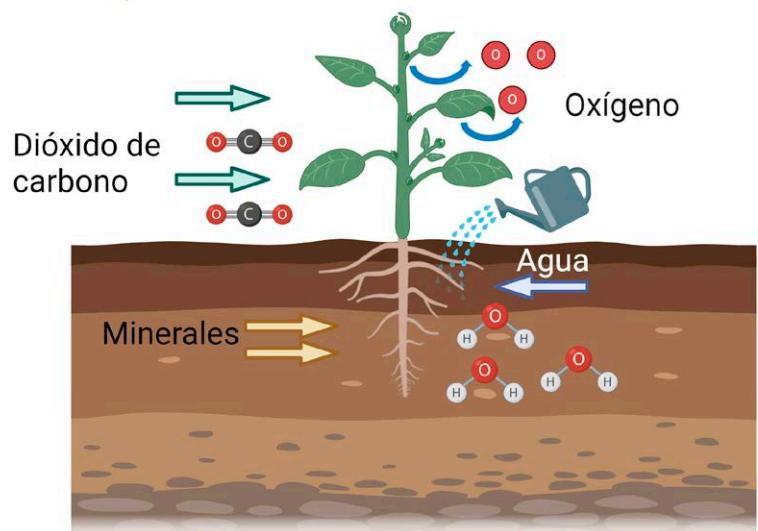
CARACTERÍSTICAS DE LA LUZ

La luz está compuesta de paquetes individuales de energía llamados fotones. La cantidad de energía almacenada en estos paquetes dependerá de su longitud de onda: los fotones de una longitud de onda corta tendrán mayor energía, mientras que los de onda larga tendrán menos energía. El término "luz" aplica para el intervalo del espectro electromagnético que el ser humano puede ver; por ejemplo, el color rojo de una frambuesa es de 620 nm a 750 nm, el color azul del cielo o de una mora abarca entre los 380 nm y 500 nm, mientras que el color amarillo de un mango va de 570 nm a 581 nm. A la derecha de este intervalo, con menor longi-

tud de onda, pero mayor contenido de energía, se encuentra la radiación UV (100 nm-400 nm), que se divide en UV-A (315 nm-400 nm), UV-B (280 nm-320 nm) y UV-C (100 nm-280 nm). El 95 % de la radiación UV que llega a la superficie de nuestro planeta corresponde a UV-A, mientras que el otro 5 % corresponde a UV-B. La capa de ozono filtra por completo la radiación UV-C (Meisel *et al.*, 2011). A la izquierda del intervalo de luz visible se encuentran la radiación



Figura 2. Explicación gráfica del proceso de fotosíntesis.



rojo lejano e infrarroja. Estos tres intervalos de radiación electromagnética (infrarrojos, luz visible y UV) son importantes para el metabolismo de las plantas.

FOTOSÍNTESIS

El proceso de fotosíntesis se lleva a cabo en todo tipo de plantas, tanto marinas como terrestres. En términos generales, consiste en la transformación de la energía de la radiación PAR en energía química almacenada en forma de azúcares. Dicho de otra

manera: es el mecanismo por el cual las plantas producen su alimento (Figura 2). La fotosíntesis consta de dos etapas: la fase luminosa y la fase oscura. Durante la fase lumínica se crean moléculas portadoras de energía (ATP y NADPH) que se utilizarán durante la fase oscura para crear moléculas de glucosa mediante agua y dióxido de carbono, liberando oxígeno como un subproducto. Los pigmentos antena de las plantas clorofilas (verde), xantofilas (amarillo) y carotenoides (anaranjado) son los encargados de absorber la energía de la luz (Soto-Hernández, 2020). De estos tres pigmentos, la mayoría de las plantas tienen clorofila-a y clorofila-b en mayor cantidad. La clorofila absorbe las longitudes de onda correspondientes al rojo lejano, rojo, azul y UV-A, reflejando las longitudes intermedias, por lo que las plantas se ven de color verde.

Las plantas vasculares son aquellas que cuentan con tejidos que transportan agua y nutrientes entre sus hojas, raíces, tallo, flores, etcétera. En estas plantas han surgido tres vías para fijar el carbono durante la fotosíntesis: C₃, C₄ y CAM. Aquellas que utilizan el rubisco (enzima que cataliza la asimilación de CO₂ atmosférico) como método de fijación del carbono se denominan plantas C₃ por el compuesto de tres carbonos (3-PGA), que se produce en el ciclo de Calvin. Cabe mencionar que aproximadamente el 85 % de las plantas en el planeta entran en esta clasificación; por ejemplo, tomate, espinaca, pepino, alfalfa, arroz, eucalipto y acelgas. En las plantas C₄, las reacciones que dependen de la luz y del ciclo de Calvin se encuentran separadas físicamente: las primeras se llevan a cabo en las células del mesófilo (parte esponjosa del centro de la hoja), y las segundas se llevan a cabo alrededor de las venas de la hoja conocidas como células del haz vascular. Ejemplos de plantas C₄ son sorgo, caña de azúcar, amaranto y maíz.

Finalmente, las plantas CAM son aquellas adaptadas a ambientes secos, como las cactáceas y las piñas, que utilizan la vía del metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) que en lugar de separar en forma física las reacciones dependientes de la luz y el ciclo de Calvin, los separan temporalmente, es decir, primero las reacciones dependientes de la

luz y posteriormente el ciclo de Calvin, recogiendo la luz solar durante el día y fijando moléculas de CO₂ durante la noche (Martinez-Aguirre *et al.*, 2020).

FOTORRECEPTORES

Los fotorreceptores son moléculas receptoras de luz que tienen la capacidad de captar diferentes longitudes de onda y transforman las señales lumínicas en señales bioquímicas. Posteriormente, dependiendo de la ruta metabólica que se active, se desencadenarán cambios fisiológicos, por ejemplo, elongación y fototropismo. Hasta la fecha se conocen cinco grupos de fotorreceptores: fototropinas, fitocromos, criptocromos, zeitluples y UVR8; cada uno de ellos reacciona a longitudes de onda específicas. Los fitocromos son cromoproteínas capaces de absorber luz principalmente en las regiones rojo (660 nm), rojo lejano (730 nm) y azul (440 nm-485 nm), y son claves para el ciclo circadiano de las plantas. Estos fotorreceptores ayudan a las plantas a distinguir entre el día y la noche; por ejemplo, durante el día, la radiación solar contiene todas las longitudes de onda, mientras que en el atardecer predomina el rojo y el naranja. Al captar el color rojo, los fitocromos se activan, mientras que, al ir del rojo al rojo lejano, se desactivan. Estas proteínas se encuentran principalmente en tejidos meristemáticos, aquellos compuestos por células indiferenciadas con alta capacidad de división, encargadas del crecimiento vegetal y que posteriormente pueden diferenciarse para crear diferentes tejidos. Los procesos que son mediados por los fitocromos son la germinación de las semillas, la regulación de la floración y la inhibición de la elongación del tallo. Estos procesos son activados por pulsos pequeños de luz visible roja (Júnior y Gomes, 2023).

En células vegetales existen dos familias de moléculas que captan y transmiten la luz azul: los criptocromos y las fototropinas. Los criptocromos son fotorreceptores que captan la luz azul (450 nm), la radiación UV-A (355 nm-366 nm) y, en algunos casos, la luz verde (500 nm-550 nm). Los procesos que regulan

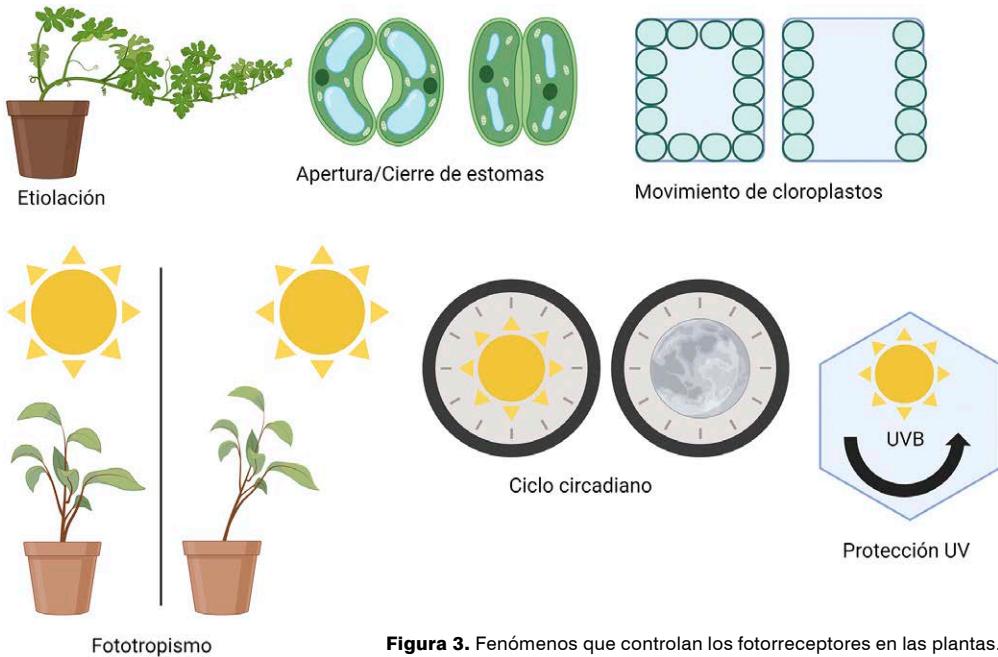


Figura 3. Fenómenos que controlan los fotorreceptores en las plantas.

son el ciclo circadiano, la biosíntesis de antocianinas, la dormancia (suspensión temporal de crecimiento y desarrollo), la germinación de semillas, la apertura de estomas, el fotoperiodo de la floración, la elongación del hipocótilo y la adaptación a ambientes ricos en luz verde y deficientes de luz roja y azul.

Las fototropinas son receptoras de luz azul (450 nm) y radiación UV-A (355 nm-366 nm). Estas moléculas controlan el fototropismo en que participa activamente la hormona auxina causando que la planta se dirija hacia la fuente de luz (Figura 3), al grado de que en algunas ocasiones llega a producir malformaciones.

Los fotorreceptores del grupo UVR8 desencadenan respuestas fotomorfogénicas a la radiación UV-B (280 nm-315 nm) al regular la transcripción de un conjunto de genes. Este conjunto de fotorreceptores es el de más reciente descubrimiento y sigue siendo ampliamente estudiado; sin embargo, se sabe que su función principal está relacionada con la producción de compuestos bioactivos que le confieren protección a la planta ante niveles altos de radiación UV. Finalmente, los fotorreceptores de la familia zeitlupe desempeñan un papel importante en el control de la degradación y la estabilidad de los

componentes asociados con la regulación del reloj circadiano y el control fotoperiódico de la floración, además, son reguladores positivos de la elongación del hipocótilo (es el tallo de la plántula presente en la semilla), que se localizan en el citosol o el núcleo de las células (Páez et al., 2021).

RELACIÓN DE LA LUZ CON LOS METABOLITOS

PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Los metabolitos primarios son de suma importancia para las plantas ya que tienen un papel directo en su desarrollo; por ejemplo, en procesos como el crecimiento, la reproducción, la fotosíntesis, la respiración, entre otros. Estos metabolitos se originan mediante la fotosíntesis debido a la interacción de CO₂ y agua con la luz, produciendo carbohidratos, ATP, almidón, proteínas, lípidos y aminoácidos (Páez et al., 2021).

Las plantas, al someterse a una situación de estrés, como el generado por ciertas longitudes de onda y niveles no adecuados de iluminación durante determinados períodos de tiempo, comienzan a producir una mayor cantidad de compuestos bioactivos, llamados metabolitos secundarios, que le ayudarán a defenderse de estas condiciones adversas (Landi et al., 2020). Por ejemplo, la planta conocida como gobernadora (*Larrea tridentata*) produce ácido

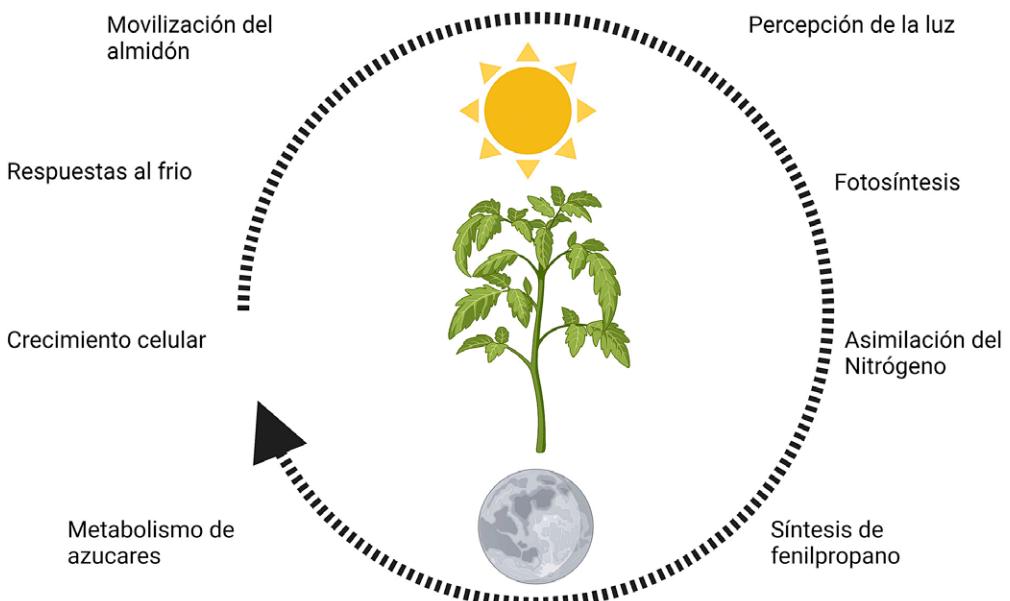


Figura 4. Ciclo circadiano y fenómenos que controla.

nordihidroguayaráctico que la protege de hongos fitopatógenos y de herbívoros. Cabe mencionar que estos metabolitos secundarios son benéficos para la salud humana, ya que se les han atribuido propiedades antinflamatorias, anticarcinogénicas, antihipertensivas, entre otras, por lo cual la activación del metabolismo secundario de las plantas de los cultivos es un tema de interés en la comunidad científica.

CICLO CIRCADIANO

Las plantas, y todos los seres eucariotes tienen un reloj interno que les permite regular todo lo que pasa en su interior en dependencia del ciclo de luz y oscuridad también conocido como fotoperiodo. Este reloj interno, formalmente conocido como ciclo circadiano, puede considerarse un sistema de dos componentes: la entrada, que sincroniza a un oscilador central, y la salida que conecta al oscilador con diversos procesos fisiológicos, metabólicos y de desarrollo. En plantas, este reloj interno regula gran parte del transcriptoma. A nivel celular, los osciladores son el resultado de los ciclos de retroalimentación tanto positivos como negativos, en los cuales, los genes de expresión (genes reloj) inhiben su propia transcripción. La importancia del ciclo circadiano radica en el control de una gran

cantidad de acciones involucradas en el desarrollo y fisiología que les permite a las plantas anticipar eventos periódicos, por ejemplo, la fotosíntesis, la respiración, la floración y la movilización de nutrientes, entre otros (Su *et al.*, 2021) (Figura 4).

EFFECTO PERJUDICIAL DE LA LUZ EN PLANTAS

El efecto de niveles no adecuados de radiación solar o de fuentes artificiales de iluminación puede ser perjudicial para las plantas en dependencia de su intensidad o longitud de onda. Por ejemplo, un incremento en la exposición de radiación UV-B puede generar un impacto negativo en su desarrollo vegetativo y provocar cambios metabólicos que repercuten en la producción de biomasa, reflejándose en una menor área foliar o una disminución del crecimiento y, en casos extremos, desencadenando necrosis, fenómeno que significa la muerte las células de las hojas, lo que percibimos como un cambio de color del verde al amarillo (clorosis), hasta llegar a un café o negro (necrosis) (Figura 5). Adicionalmente, la radiación UV-B puede causar daños en biomoléculas como el ADN. Por otra parte, niveles altos de radiación UV fomentan la creación

de moléculas dañinas llamadas radicales libres que pueden dañar las proteínas y otros componentes celulares importantes. (Mendoza-Paredes *et al.*, 2022; Fontana *et al.*, 2023).

Entre los mecanismos de defensa de las plantas están los procesos de fotorreparación y capacidad antioxidante, que conjuntamente proporcionan protección a la radiación UV y a otros tipos de estrés. Adicionalmente, las hojas de las plantas que se encuentran expuestas a una gran cantidad de luz comienzan a inclinarse, de manera que la superficie que se encuentra expuesta a la luz sea la mínima posible. Otro mecanismo de defensa es transformar el 30 % de la energía disponible en azúcar y liberar el resto como calor (Caicedo-López *et al.*, 2021).

CONCLUSIÓN

La luz forma parte fundamental de la vida en la tierra. En las plantas, la radiación PAR permite llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, uno de los procesos biológicos más importantes en la naturaleza y del cual depende la vida humana. En términos generales, es de suma importancia la relación intrínseca entre la luz y la bioquímica vegetal, destacando la sensibilidad de las plantas a las variaciones en la calidad, intensidad de la luz y fotoperiodo, que impactan en su desarrollo y en la producción de biomasa y metabolitos secundarios. Actualmente, la comunidad científica busca crear condiciones de iluminación óptimas para las plantas a través de tecnologías como las lámparas fluorescentes, de alta presión de sodio y LED, que sustituyan o complementen la radiación solar.

R E F E R E N C I A S

Caicedo-López LH, Aranda AL, Gómez CE, Márquez EE y Zepeda HR (2021). Elicitores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana. Revista Bioética 29:76-86.



Figura 5. Efecto negativo de la radiación en las plantas.

Fontana JL y Scozzina EF (2023). El lado oscuro de la iluminación L ED. La luz de LEDs y las plantas. *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica claves del desarrollo* 8(1):85-98.

Júnior JL y Gomes LD (2023). Respostas à sinalização luminosa mediada pelos fitocromos. *Botânica no inverno*. 12:132-139

Martinez-Aguirre CA, Zambrano-Demera YE y Pluas-Mora RJ (2020). Fotosíntesis artificial. Una tecnología de la revolución energética. *Dominio de la ciencia* 6:151-159.

Meisel L, Urbina D y Pinto M (2011). Fotorreceptores y respuestas de plantas a señales lumínicas. En *Fisiología vegetal*. Ediciones Universidad de La Serena, Chile.

Mendoza-Paredes JE, Castillo-González AM, Valdés-Aguilar LA, Avitia-García E y García-Mateos MR (2022). Efecto de diferentes relaciones de luz azul:roja en el crecimiento de plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Biotecnia* 24(1):87-96.

Páez OM, Flórez RV y Guillermo RG (2021). Fundamentos de la floración mediada por luz y potencialidades de las mallas fotoselectivas y huellas espectrales en floricultura. Productos relevantes del proyecto Fortalecimiento de la competitividad del sector floricultor colombiano mediante el uso de ciencia tecnología e innovación aplicada en Cundinamarca. Cundinamarca: Unisalle.

Landi M, Zivcak M, Sytar O, Brestic M y Allakhverdiev S (2020). Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergética* 1861:2-20

Su C, Wang Y, Yu Y y Wang L (2021). Coordinative regulation of plants growth and development by light and circadian clock. *aBIOTECH* 2, 176-189.

Soto-Hernández M (2021). La fotosíntesis. *Logos* 8:22-23.

**Carlos Eligio Hernández-Navarrete
Humberto Aguirre-Becerra
Universidad Autónoma de Querétaro
chernandez192@alumnos.uaq.mx**