UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Efecto de diferentes longitudes de radiación ultravioleta en el crecimiento de plantas de tomate ((Solanum lycopersicum L.).

Por:

YADIRA EVELYN VILLEGAS RODRIGUEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Septiembre 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Efecto de diferentes longitudes de radiación ultravioleta en el crecimiento de plantas de tomate ((Solanum lycopersicum L.).

Por:

YADIRA EVELYN VILLEGAS RODRIGUEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité Asesor:

DR. ANTONIO JUAREZ MALDONADO
Asesor Principal

DR. YOLANDA GONZALEZ GARCIA
Asesor Principal Externo

DRA. MICHELLE IVONNE RAMOS ROBLES
Coasesor

DRA. ELDA BARBARITA COMPANIONI GONZALEZ
Coasesor

DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Septiembre 2026

Derechos de Autor y Declaración de No Plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor Principal	Asesor Principal
Yadira Evelyn Villegas Rodríguez	Dr. Antonio Juárez Maldonado

DEDICATORIA

A mi familia por ser mi mayor apoyo, por creer en mí y acompañarme durante cada etapa de mi formación. Por estar presentes, por motivarme a seguir adelante. Este logro también es de ustedes.

AGRADECIMIENTOSA mi mamá, Pilar Rodríguez Rangel, quiero agradecerle de todo corazón por su amor, apoyo y confianza incondicional. Gracias por estar conmigo en cada momento, por tus consejos, por tus sacrificios y por impulsarme siempre a seguir adelante, incluso cuando las cosas parecían difíciles.

A mis hermanos Lupita Villegas Rodríguez, Jazmín Villegas Rodríguez, Tadeo Villegas Rodríguez y Fátima Villegas Rodríguez, gracias por acompañarme durante esta etapa, por su cariño, por los momentos compartidos y por estar presentes en mi vida. Cada uno de ustedes forma parte importante de este logro y de la persona en la que me eh convertido.

A mi asesor de tesis, Dr. Antonio Juárez Maldonado, le agradezco sinceramente por su orientación, paciencia, conocimientos, y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por sus observaciones, recomendaciones y por compartir su experiencia, que fueron fundamentales para poder llevar a cabo y concluir esta investigación.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi alma mater, agradezco la oportunidad de haberme formado profesionalmente dentro de sus aulas. Gracias por los conocimientos, experiencias y aprendizajes que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal y que hoy me permiten concluir esta etapa como ingeniera.

A mis amigos, Luis Ángel Lemus, Elizabeth Lechuga, Edith Solís, Carlos Martínez, Balam Quitze Fátima Villegas, Alberto Guerrero, Jonattan y Oscar Paz, gracias por haber formado parte de esta etapa tan importante de mi vida. Gracias por las risas, las pláticas, los momentos difíciles, los consejos, el apoyo y por hacer que los años de universidad fueran mucho más especiales. Me quedo con cada experiencia y con los recuerdos.

De manera muy especial, quiero agradecer a Armando Mata, por haberme impulsado a entrar a esta carrera y universidad, por motivarme a dar ese primer paso que, con el tiempo, se convirtió en uno de los caminos más importantes de mi vida. Gracias por haber creído en mí.

A mi profesor Etelberto Cortez por haber sido parte importante de mi formación durante esta etapa universitaria. Gracias por compartir conmigo sus conocimientos, por sus enseñanzas. Más allá de las clases y los conocimientos adquiridos, valoro cada consejo, cada palabra de motivación y cada experiencia que me permitió crecer tanto profesional como personalmente.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS IX
ÍNDICE DE CUADROS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
RESUMEN X
Abstract XI
1. INTRODUCCIÓN 12
1.1 Objetivo General 15
1.2 Objetivos específicos 15
1.3. Hipótesis 15
1.4. Justificación 16
2. REVISIÓN DE LITERATURA 17
2.1 Cultivo de Tomate *(Solanum Lycopersicum)* 17
2.3 Ondas de calor y factores abióticos en el cultivo. 18
2.4 Radiación Ultravioleta 19
2.5 Radiacion UV-A y su efecto en plantas de tomate 22
2.6 Radiación UV-B y su efecto en plantas de tomate 23
2.7 Radiacion UV-C y su efecto en plantas de tomate 24
2.8 Estudios enfocados a la radiación ultravioleta y su efecto en las plantas. 25
3. MATERIALES Y MÉTODOS 28
3.1 Área de estudio 28
3.2 Material Vegetal 28
3.3 Características de la lámpara 28
3.4 Desarrollo del cultivo 28
4. RESULTADOS 31
5. DISCUSIÓN 50
6. CONCLUSIONES 57
7. LITERATURA CITADA 58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Altura de plantas de tomate expuestas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A. 31
Figura 2. Número de hojas por planta de tomate, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A. 32
Figura 3. Diámetro promedio de tallo (mm) de plantas de tomate expuestas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A. 33
Figura 4. Número de racimos por planta de tomate, sometidas a diferentes tiempos de exposición, a radiación UV-A. 34
Figura 5. Peso fresco promedio (g) de plantas de tomate expuestas a radiación UV-A. 35
Figura 6. Peso seco promedio (g) de plantas de tomate expuestas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A. 36
Figura 7. Altura en plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B. 37
Figura 8. Número de hojas por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, bajo diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B. 38
Figura 9. Diámetro del tallo (mm) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B. 39
Figura 10. Número de racimos por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, bajo diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B. 40
Figura 11. Peso fresco (g) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B. 41
Figura 12. Peso seco (g) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B. 42
Figura 13. Altura de plantas de tomate a los 30 días del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C. 44
Figura 14.Número de hojas por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, bajo diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C. 45
Figura 15. Diámetro de tallo (mm) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C. 46
Figura 16.Numero de racimos por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C. 47
Figura 17.Fresco de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C. 48
Figura 18. Peso seco de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C. 49

RESUMEN

La radiación ultra violeta (UV) ha emergido como una herramienta prometedora en la agricultura moderna para modular el crecimiento y la calidad de los cultivos hortícolas, como el tomate *(Solanum lycopersicum L).* Este trabajo tiene como objetivo sustentar la investigación: Impacto de diferentes longitudes de radiación ultravioleta en el crecimiento de plantas de tomate, que busca determinar los tiempos óptimos de exposición a radiación UV sobre el desarrollo inicial de plántulas de tomate, evaluando diferentes rangos (de 1 a 5 horas).

El análisis de diversas fuentes científicas permitió identificar que los efectos de la radiación UV-A, UV-B y UV-C varían según la longitud de onda, la intensidad y el tiempo de exposición. La radiación UV-A se asocia con mejoras en la acumulación de compuestos antioxidantes y estimulación del crecimiento radicular y foliar. La UV-B, en dosis moderadas, puede activar respuestas de defensa antioxidante y mejorar la tolerancia al estrés abiótico, aunque en el exceso puede ser dañina. Por su parte la UV-C, aplicada artificialmente, tiene un alto poder germicida y se emplea principalmente en la etapa poscosecha, aunque también se han documentado efectos positivos sobre el vigor inicial cuando se aplica a exposiciones cortas.

Los estudios revisados también destacan que factores como el tipo de suelo, el espectro lumínico, la humedad y la etapa fenológica influyen en la respuesta de las plantas de tomate a la radiación UV. Asimismo, se ha observado que una exposición controlada puede inducir la síntesis de metabolitos secundarios, fortalecer las defensas de la planta y favorecer la aclimatación en etapas tempranas del desarrollo.

Palabras Clave: Plántulas de tomate, radiación UV, UV-A, UV-B, UVC, crecimiento vegetal, tiempo de exposición lumínica.

ABSTRACT

Ultraviolet (UV) radiation has emerged as a promising tool in modern agriculture for modulating the growth and quality of horticultural crops, such as the tomato (*Solanum lycopersicum* L). This work aims to support the research: "Impact of different ultraviolet radiation wavelengths on the growth of tomato plants," which seeks to determine the optimal UV radiation exposure times for the initial development of tomato seedlings, evaluating different ranges (from 1 to 5 hours).

The analysis of diverse scientific sources allowed us to identify that the effects of UV-A, UV-B, and UV-C radiation vary according to the wavelength, intensity, and exposure time. UV-A radiation is associated with improvements in the accumulation of antioxidant compounds and stimulation of root and foliar growth. UV-B, in moderate doses, can activate antioxidant defense responses and improve tolerance to abiotic stress, although in excess it can be harmful. For its part, UV-C, artificially applied, has a high germicidal power and is mainly used in the post-harvest stage, although positive effects on initial vigor have also been documented when applied at short exposures.

The reviewed studies also highlight those agronomic factors such as soil type, light spectrum, humidity, and the phenological stage influence the response of tomato plants to UV radiation. Likewise, it has been observed that a controlled exposure can induce the synthesis of secondary metabolites, strengthen the plant's defenses, and favor acclimatization in early stages of development.

Keywords: Tomato seedlings, UV radiation, UV-A, UV-B, UV-C, plant growth, light exposure time.

1. INTRODUCCIÓN

El Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas más valorados a nivel mundial por su amplio uso en la alimentación humana, su versatilidad en la cocina y su aporte nutricional. Este cultivo es fundamental para la seguridad alimentaria, ya que aporta vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes que contribuyen a la prevención de enfermedades crónicas (FAO 2023). Esta relevancia se refleja en su volumen de producción: a nivel global, el cultivo supera los 192 millones de toneladas anuales (FAO, 2023), lo que lo posiciona como una de las principales hortalizas.

Dentro de este panorama internacional, México juega un papel significativo como productor y exportador. México se consolidó como el 8º productor mundial. A nivel nacional la producción supero los 3.63 millones en 2023 (SIAP, 2023). Las estimaciones para 2024 indican un crecimiento continuo, proyectando un incremento del 8.8% en la producción nacional (SADER, 2024). La diversidad genética del tomate ha permitido la adaptación del cultivo a distintas condiciones agroclimáticas y tipos de suelo. Existen numerosas variedades y tipos comerciales, que se clasifican de acuerdo a su forma, tamaño, color y uso. En México se cultivan principalmente tres tipos de variedades: el tomate bola, utilizado para exportación e industria procesadora, el cherry para ensaladas y el saladette que se caracteriza por su forma alargada y ligeramente ovalada, es uno de los preferidos por los productores y es práctico para manejar y comercializar (Seminis, s. f.; Montes de Oca Rodriguez, 2011).

El cultivo de tomate se desarrolla en una amplia gama de condiciones ambientales, sin embargo, para alcanzar los altos rendimientos requiere climas cálidos, suelos fértiles y bien drenados, así como un manejo adecuado de riego y nutrición (Martínez Mendoza et al., 2020). Se desarrolla mejor en suelos ligeramente ácidos, con un pH entre 6.0 y 6.8, ya que en este rango puede absorber los nutrientes de forma más eficiente (Rutom, 2025).

En sistemas protegidos, como los invernaderos, el tomate ha encontrado condiciones favorables para su producción, ya que se logra un mayor control de los factores ambientales.

Esta diversidad en su proceso de producción es resultado de procesos de selección y mejoramiento genético que han favorecido características como resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a estrés ambiental y mejor calidad del fruto (Gonzales y Ramírez, 2022).

La radiación ultravioleta (UV) forma parte del espectro electromagnético con longitudes de onda que van desde 100 a 400 nm, dividida entre tres categorías según su longitud y energía: UV-C (100-280 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-A (315-400 nm) (Fernández et al., 2023). Cada uno tiene efectos diferentes en las plantas.

La radiación UV-C es la más energética y potencialmente dañina, sin embargo, la capa de ozono terrestre absorbe casi en su totalidad esta radiación, impidiendo que llegue la superficie terrestre (González y Ramírez, 2022). Su uso se ha enfocado principalmente en frutos después de la cosecha, debido a su capacidad para inducir respuestas de defensa que prolongan la vida de anaquel y mejoran la calidad. En tomate maduro, la exposición a UV-C incrementó la síntesis de compuestos fenólicos y antioxidantes, además de activar rutas metabólicas como la del fenilpropano (Li et al., 2023). Asimismo, este tipo de radiación ha mostrado eficacia en la inhibición de patógenos, la producción de micotoxinas y promoviendo la acumulación de compuestos anti fúngicos (Arroyo et al., 2019; Gonzales Aguilar et al., 2001).

Estudios han demostrado que la UV-B, aunque en dosis altas puede afectar negativamente el crecimiento, reduciendo biomasa, área foliar y altura de las plantas, también estimulan la síntesis de compuestos fenólicos y flavonoides que funcionan como protectores frente al estrés oxidativo (Krizek et al., 1997). Este balance entre daño y activación defensiva depende principalmente de la intensidad y duración de la exposición.

Por su parte, la UV-A es considerada menos dañina y ha mostrado resultados positivos en el tomate bajo condiciones controladas. Se ha observado que este rango de radiación estimula la floración y fructificación, induce la expresión de genes relacionados con la fotosíntesis y favorece la acumulación de compuestos antioxidantes sin afectar el rendimiento final (Poudel et al., 2021). De igual forma la suplementación con UV-A se ha asociado con un aumento en la tolerancia frente a enfermedades, en cultivo de tomate, como la marchitez vascular causada por *Fusarium oxyporum*, donde se ha reportado una reducción de la severidad de más de 35%, acompañada de incrementos en flavonoides y otros metabolitos secundarios de defensa (Mao et al., 2023).

El estudio de los efectos de diferentes longitudes de onda de radiación UV en el tomate es fundamental, ya que permite comprender cómo estas influyen en el crecimiento, desarrollo, resistencia a patógenos y calidad de fruto. En un contexto de alta demanda de alimentos con valor agregado y producción sostenible, la aplicación estratégica de radiación UV representa una alternativa innovadora para mejorar tanto el rendimiento como las propiedades funcionales del tomate, contribuyendo al mismo tiempo a reducir el uso de agroquímicos y a atender las exigencias del mercado e internacional.

1.1 Objetivo General

Determinar el efecto de diferentes longitudes de onda de radiación ultravioleta y tiempos de exposición sobre el crecimiento de plantas de tomate *(Solanum lycopersicum. L.).*

1.2 Objetivos específicos

1. Comparar las características morfológicas como altura de la planta, diámetro de tallo, numero de hojas y el número de racimos en plantas de tomate expuestas a diferentes longitudes de onda de radiación ultravioleta y tiempos de exposición.

2. Evaluar el impacto de la radiación UV en plantas de tomate en un corto plazo, que va desde el trasplante hasta la floración.

3. Identificar posibles daños o estrés en las plantas de tomate por exposición a los diferentes tiempos y/o tipos de radiación UV.

1.3. Hipótesis

La radiación ultravioleta tendrá impactos diferentes en función del tiempo de exposición y de la longitud de onda, se espera que al menos un tratamiento estimule el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate *(Solanum lycopersicom* L.*),* mejorando parámetros agronómicos.

1.4. Justificación

El estudio de los efectos de la radiación ultravioleta (UV) en las plantas de tomate es esencial debido a las aplicaciones que tiene en su crecimiento, desarrollo y resistencia a patógenos. La radiación UV-A (315-400 nm) ha mostrado efectos positivos al estimular la producción de compuestos antioxidantes y mejorar la tolerancia al estrés biótico como la infección por el hongo *Fusarium oxysporum* (García et al., 2023). Por otro lado, la radiación UV-B (280-315 nm) puede inducir la síntesis de metabolitos secundarios y mejorar la calidad nutricional de los frutos, aunque en dosis controladas para evitar daños (Liu et al., 2020).

La radiación UV-C (100-280) aunque generalmente considerada perjudicial, en dosis bajas ha mostrado potencial para reducir la producción de micotoxinas en frutos de tomate lo que sugiere aplicaciones en el control de calidad (Zhang et al., 2019). Comprender cómo estas diferentes longitudes de onda afectan al tomate permitirá optimizar las prácticas agrícolas y aprovechar sus beneficios en la mejora de la productividad y la calidad del cultivo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cultivo de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial debido a su valor nutricional y a su importancia económica. Este fruto, además de su compleja composición nutrimental, es una fuente relevante de licopeno, vitamina C, flavonoides y otros compuestos bioactivos que lo hacen fundamental en la dieta humana (FAO, 2023).

Dentro de los principales países productores se encuentran China, India, Estados Unidos y México. En el caso de México, el tomate representa un rubro clave en las exportaciones agrícolas, especialmente en estados como Sinaloa, Baja California y San Luis Potosí (SIAP, 2022).

El cultivo de tomate requiere suelos drenados y con textura que favorezca la aireación, preferentemente de tipo franco-arenoso o franco-limoso, con un pH óptimo entre 6.0y 6.8 para un mejor aprovechamiento de nutrientes (Ramirez *et al*., 2021). Asimismo, necesita climas templados con temperaturas promedio entre 18 y 27 ºC (Vega *et al*., 2022). Por otra parte, el tomate es exigente en cuanto a luminosidad, ya que la intensidad y la calidad lumínica influyen directamente en la tasa fotosintética y en la síntesis de pigmentos (Kusuma *et al*., 2020).

2.2 Plagas y enfermedades del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

El manejo agronómico del tomate incluye prácticas como la fertilización balanceada, control adecuado de riego, y la protección fitopatógenos que frecuentemente afectan su productividad. El tomate es susceptible a un amplio conjunto de plagas; entre las más comunes se encuentran la mosca blanca *(Bemisia Tabaci*), los trips *(Frankiniella occidentalis)* y el pulgón *(Myzus percicae)*.

En cuanto a las enfermedades destacan el tizón tardío causado por *Phytopthora infestans*, la marchitez vascular y el mildiu (Ramírez *et al*., 2021). Asimismo, se reportan incidencias de *Alternaria solani y Botrytis cinerea,* así como las bacterias *Ralstonia solanacearum* y *Clavibacter michiganesis* (Rincon *et al*., 2012; Garrindo-

Ramirez *et al*., 2014). Las infecciones virales, como el virus del mosaico del tomate (ToMV) y el virus del rizado amarillo (Tomato yelow leaf curl virus), también representan una amenaza importante, especialmente en regiones tropicales (Rojas *et al*., 2018).

Las pérdidas por plagas y enfermedades pueden traducirse en reacciones significativas de rendimiento y calidad; por ello se promueve el manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE) (Panno *et al.,* 2021). El MIPE, combina monitoreo constante, rotación de cultivos, uso de trampas, aplicaciones selectivas de biocontroladores, control biológico y prácticas agronómicas que reduzcan su incidencia. Este enfoque permite reducir el uso de pesticidas, mejora la sostenibilidad y disminuye la resistencia de patógenos a los químicos (Gonzales-Celedon *et al*., 2011).

En este sentido, el uso de radiación ultravioleta se ha explorado recientemente como una herramienta indirecta para mejorar la resistencia del tomate frente a patógenos. Por ejemplo, ciertas longitudes de onda, especialmente en el rango UV-A, estimulan respuestas defensivas mediante la activación de fitoalexinas y enzimas antioxidantes (Liu *et al.,* 2023). Este tipo de respuestas fisiológicas abre la posibilidad de aplicar la radiación UV como parte del manejo fitosanitario sostenible.

2.3 Ondas de calor y factores abióticos en el cultivo

El tomate es particularmente sensible al estrés térmico, especialmente en las altas temperaturas conocidas como ondas de calor, que afectan negativamente la germinación, floración y amarre de frutos (Camejo et al., 2012). Las ondas de calor, definidas como periodos prolongados con temperaturas por encima del umbral fisiológico, inducen estrés oxidativo al aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno, lo que provoca deterioro de pigmentos fotosintéticos y daño celular (Wahid *et al.,* 2007). Bajo estas condiciones, las plantas reducen su tasa fotosintética e incrementan la transpiración, comprometiendo la eficiencia en el uso del agua (Camejo *et al.*, 2012).

El impacto de las ondas de calor no solo depende de la temperatura máxima, si no de la radiación solar y la humedad relativa. La interacción de estos factores

determina el grado de estrés que enfrenta la planta. Los cambios térmicos afectan la conducta estomática y la integridad de las membranas celulares, mientras que el exceso de radiación puede generar foto inhibición (Gil et al., 2018). En consecuencia, las estrategias agronómicas como el uso de coberturas, el sombreado o la modificación espectral de la luz (por medio de mallas o filtros UV) se han convertido en herramientas eficaces para mitigar los efectos del estrés térmico y radiactivo (Hernández *et al*., 2021).

2.4 Radiación Ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) es una fracción del espectro electromagnético comprendida entre 100 y 400 nanómetros (nm), con una energía mayor que la luz visible pero menor que la radiación ionizante.

La radiación UV se clasifica en tres rangos principales según su longitud de onda (OMS, 2022):

1. UV-A (315-400 nm): Es la fracción que llega con mayor intensidad a la superficie terrestre.
2. UV-B (280-215 nm): es parcialmente absorbida por la capa de ozono
3. y UV-C (100-280 nm): es prácticamente bloqueada por completo (Diffey, 2002).

En términos fijos, la radiación UV-A posee menor energía, pero puede penetrar más profundamente en los tejidos biológicos, mientras que la UV-B es más energética y causa efectos biológicos más directos (Hollosy, 2002). Por su parte, la UV-C tiene el potencial de destruir microorganismos, lo que la hace útil en aplicaciones de desinfección y control de patógenos (López- Pozos et al., 2016).

En el contexto agrícola, la radiación UV ha pasado de ser vista como un factor dañino a ser considerada útil para modular fisiología vegetal. Estudios recientes indican que en dosis controladas de radiación UV pueden activar mecanismos de defensa, aumentar la producción de metabolitos secundarios y mejorar la tolerancia al estrés ambiental (Jansen y Bornman, 2012; Robson *et al*., 2019). De esta manera, la radiación ultravioleta no solo afecta el crecimiento y la morfología de las plantas,

sino también su resistencia ante patógenos y condiciones adversas, lo que la convierte en un factor ambiental relevante para el manejo de cultivos como el tomate.

2.4.1 Efectos generales de la radiación ultravioleta en las plantas

El impacto de la radiación UV en las plantas depende de la longitud de onda, intensidad, duración de exposición y la especie. Historicamente, se consideraba como un factor únicamente perjudicial, capaz de degradar el ADN, los pigmentos fotosintéticos y las membranas celulares (Bornman et al., 2015). Sin embargo, investigaciones han demostrado que las plantas poseen mecanismos de percepción y respuesta específicos que les permiten aclimatarse a diferentes niveles de radiación UV (Hideg *et al*., 2013).

Cuando una planta recibe radiación UV, se desencadenan respuestas fisiológicas como la acumulación de compuestos fenológicos, flavonoides y antocianinas, los cuales funcionan como filtros naturales que reducen la penetración de la radiación en los tejidos internos (Jansen *et al*., 2019). Asimismo, esta radiación UV puede inducir la activación de genes de defensa antioxidante y la reparación del ADN, aumentando la tolerancia a otros tipos de estrés, como el térmico o el hídrico (Kataria *et al.,* 2019).

Por otro lado, exposiciones prologadas o intensas a radiación UV-B pueden inhibir la fotosíntesis al disminuir la actividad de la enzima Rubisco (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) reduciendo la eficiencia cuántica del proceso (Barta et al., 2001). Este efecto suele observarse bajo condiciones naturales de alta radiación o en experimentos donde se simulan escenarios de adelgazamiento de capa de ozono. Por el contrario, dosis moderadas UV-A o UV-B pueden tener efectos benéficos, como el aumento de la acumulación de compuestos bioactivos y el refuerzo de las paredes celulares (Verdaguer *et al.,* 2017).

La capacidad de las plantas para percibir y responder a la radiación UV esta mediada por fotoreceptores específicos, principalmente el UVR8 (Ultraviolet Resistance Locus 8), que detecta la radiación UV-B y desencadena la cascada de

señalización molecular (Jenkins, 2017). Este receptor permite a las plantas modular su morfología, acumulación de pigmentos y mecanismos de defensa, ajustándose a las condiciones de factores ambientales. En el caso del tomate, se ha observado que la activación del UVR8 contribuye a una mayor producción de flavonoides y lignina, compuestos clave en la producción contra radiación y patógenos (Lopez-Lefebre *et al*., 2021).

Además de las respuestas fisiológicas, la radiación UV tiene efectos importantes en el metabolismo secundario de las plantas, la exposición controlada de la UV-B estimula síntesis de compuestos antioxidantes, incrementando el valor nutracéutico de los frutos. Esto ha llevado al uso experimental de lámparas UV en invernaderos para aumentar el contenido de licopeno y polifenoles en tomates como estrategia para mejorar su calidad nutricional y prolongar su vida postcosecha (Escobar-Bravo *et al*., 2020).

La radiación UV también influye en las interacciones planta-microorganismo. En estudios realizados. Se observó que niveles bajos de UV-B reducen la incidencia de enfermedades fúngicas en cultivos hortícolas, posiblemente al fortalecer la cutícula y reducir la susceptibilidad de los tejidos. Por lo tanto, el papel de la radiación UV no se limita a in factor de estrés, si no que puede considerarse una señal ambiental que regula el equilibrio entre crecimiento y defensa (Verdaguer *et al.,* 2017).

2.4.2 Implicaciones agronómicas de la radiación ultravioleta

En el cultivo de tomate, el estudio de la radiación UV adquiere relevancia por su influencia directa en la fisiología y su potencial para mejorar la resistencia a factores bióticos y abióticos. Mientras que la exposición moderada a radiación UV-A puede estimular germinación y favorecer la síntesis de licopeno, un antioxidante en la calidad del fruto (Katerji *et al*., 2018). En contraste, dosis elevadas de UV-B pueden causar daños celulares y alterar la fotosíntesis, aunque también pueden inducir respuestas de adaptación beneficiosas si se aplican a niveles controlados (Liu *et al*., 2023).

La comprensión de los efectos de la radiación UV en el tomate permite explorar nuevas estrategias en la agricultura protegida, como el uso de filtros selectivos o lámparas UV que emiten longitudes específicas. Estas tecnologías ofrecen la posibilidad de modular el crecimiento vegetal y la calidad del fruto sin recurrir a agroquímicos, favoreciendo un manejo más sostenible. Por ello, el impacto de las diferentes longitudes de radiación ultravioleta sobre el crecimiento de las plantas de tomate constituye un tema de investigación relevante y con aplicaciones prácticas tanto en la fisiología vegetal como en la producción agrícola.

2.5 Radiación UV-A y su efecto en plantas de tomate

La radiación UV-A (315-400 nm), es la fracción menos energética del espectro ultravioleta y la que más alcanza la superficie terrestre. En el cultivo de tomate, múltiples estudios han demostrado que la exposición moderada a esta longitud de onda puede estimular el crecimiento y la actividad fisiológica. Garrido-Ramírez (2018) observó que su aplicación en etapas vegetativas incrementa significativamente la altura de la planta, el número de hojas y el diámetro de tallo, además favorecer la acumulación de biomasa. Este efecto se asocia con una activación de rutas metabólicas relacionadas con la fotosíntesis y la producción de pigmentos.

De igual forma, Katerji et al. (2018) encontró que la radiación UV-A promueve la expansión foliar y el alargamiento de los tallos en plántulas cultivadas en interiores, al inducir la síntesis de fitohormonas de crecimiento como auxinas y giberelinas. Además, el aumento de radiación UV-A estimula la actividad de la enzima Rubisco, mejorando la eficiencia fotosintética y el contenido de clorofila.

Investigaciones recientes de Liu y Li (2023) y Juárez-Maldonado *et al*. (2023) demostraron que el tomate expuesto a radiación UV-A desarrolla una mayor tolerancia a *Fusarium oxysporum*, debido a la activación de las vías del ácido salicílico y del ácido jasmónico, responsables de la defensa vegetal. Los resultados mostraron incrementos en los niveles de flavonoides, polifenoles y enzimas antioxidantes, los cuales contribuyen tanto al crecimiento como a la resistencia a enfermedades.

La radiación UV-A también se ha vinculado con un aumento del peso fresco y seco de la planta. Escobar-Hernández *et al.* (2024) reportaron que la exposición a longitudes de onda especificas dentro del rango UV-A modificó favorablemente el sistema antioxidante y el metabolismo del carbono, lo que se tradujo en mayor biomasa aérea. En conjunto, estos hallazgos indican que la UV-A, cuando se aplica de manera regulada, puede emplearse como una herramienta agronómica para mejorar el crecimiento, el vigor y la resistencia del tomate en condiciones de invernadero.

2.6 Radiación UV-B y su efecto en plantas de tomate

La radiación UV-B (280-315 nm) es más energética y puede inducir tanto efectos benéficos como daños fisiológicos, dependiendo de la dosis y el tiempo de exposición. En tomate, una exposición controlada a UV-B ha demostrado estimular la síntesis de compuestos secundarios como flavonoides y antocianinas que actúan como filtros solares naturales (Verdaguer *et al*., 2017). Estos compuestos aumentan la tolerancia al estrés oxidativo y mejoran la calidad nutricional de los frutos, incrementando el contenido de licopeno y carotenoides.

Sin embargo, cuando la intensidad de la radiación UV-B es alta o prolongada, puede reducir la tasa fotosintética y afectar el crecimiento vegetativo. Barta et al. (2024) reportaron que la exposición excesiva a UV-B disminuye la actividad del fotosistema II y la eficiencia de la Rubisco, lo cual reduce la acumulación de biomasa. A pesar de ello, las plantas pueden adaptarse mediante mecanismos de reparación del ADN y aumento en la síntesis de antioxidantes (Kataria *et al*., 2019).

El tomate expuesto a radiación UV-B desarrolla hojas más gruesas y cutículas reforzadas, lo que reduce la perdida de agua y la incidencia de enfermedades (Robson *et al.,* 2019; Bornman *et al*., 2015). Además, la radiación UV-B moderada induce la expresión del fotorreceptor UVR8, que regula la morfología y promueve la síntesis de fenoles protectores (Jenkins, 2017).

Por otra parte, la exposición intermitente a UV-B puede mejorar parámetros agronómicos como la altura, diámetro de tallo, y peso seco total (Schreiner *et al.,* 2012). Se observó en un incremento del 10% en altura y del 15% en el peso seco

con dosis leves de UV-B comparadas con plantas sin tratamiento (Escobar-Bravo *et al*., 2020). Estos resultados sugieren que, en niveles adecuados, la UV-B puede ser una señal ambiental que activa rutas metabólicas de defensa y crecimiento, más que un simple factor de daño.

2.7 Radiación UV-C y su efecto en plantas de tomate

La radiación UV-C (100-280 nm) es la fracción más energética del espectro ultravioleta, aunque la capa de ozono impide que alcance naturalmente la superficie terrestre. En el ámbito agrícola, la radiación UV-C se utiliza experimentalmente por sus propiedades germicidas y su capacidad para activar mecanismos de defensa en las plantas. En el cultivo de tomate, esta radiación ha sido aplicada tanto en las etapas vegetativas como en poscosecha, mostrando efectos positivos en la reducción de microrganismos patógenos y en la mejora de la calidad del fruto (Liu *et al*., 2012; Costa *et al*., 2006).

Estudios realizados en tomate demuestran que la exposición breve a radiación UV-C incrementan la actividad antioxidante y retrasa el deterioro poscosecha, debido al aumento de compuestos fenólicos y la estimulación de enzimas antioxidantes como la peroxidasa (POX) y la polifenol oxidasa (PPO) (Liu *et al*., 2012; Maharaj *et al*., 2014). Estos efectos se asocian a la activación de rutas metabólicas relacionadas con la defensa vegetal y al refuerzo de las paredes celulares. Además, en otras hortalizas como el brócoli, se ha observado un comportamiento similar, donde el tratamiento UV-C retrasa la senescencia y mantiene la calidad poscosecha (Costa *et al.,* 2006).

Por otro lado, investigaciones más recientes han demostrado que dosis bajas de UV-C pueden inducir resistencia a patógenos en tomate. Vásquez et al. (2020) observaron que la aplicación de radiación UV-C de baja intensidad en plantas de tomate redujo significativamente la incidencia del hongo *Botrytis cinerea,* asociándose con un incremento en la actividad de la fenilalanina amonio liasa (PAL) y en el contenido de fenoles totales, lo que refuerza la capacidad defensiva de los tejidos vegetales. De forma similar, Arul (2007) describió que en frutos de tomate

tratados con UV-C, la superficie epidérmica sufre modificaciones que limitan la colonización fúngica, explicando así la reducción de infecciones poscosecha.

Darras et al. (2020) reportaron además que dosis bajas de radiación de radiación UV-C pueden estimular el crecimiento, la fotosíntesis y el rendimiento de plantas de tomate, siempre que las exposiciones se mantengan dentro de un rango seguro. Estos hallazgos respaldan el potencial del UV-C como un elicitor capaz de activar respuestas fisiológicas beneficiosas sin comprometer el desarrollo vegetal.

En el ámbito morfológico, la radiación UV-C puede inducir cambios en la estructura epidérmica y en la cutícula del tomate, generando tejidos más compactos y resistentes. No obstante, exposiciones prolongadas o intensas pueden causar estrés oxidativo, severo y necrosis foliar, por lo que su uso debe ser dosificado (Darras *et al*., 2020). A nivel agronómico, la radiación UV-C se considera una herramienta potencial para el manejo fitosanitario sostenible, al reducir el uso de fungicidas y mejorar la calidad de los frutos destinados al mercado (Dyshlyuk et al., 2020; Vasquez et al., 2020).

2.8 Estudios enfocados a la radiación ultravioleta y su efecto en las plantas

La aplicación de la radiación ultravioleta (UV) mediante lámparas controladas se ha convertido en una herramienta experimental clave para evaluar respuestas fisiológicas, bioquímicas y productivas en diferentes especies vegetales. Su utilización permite modular la exposición y analizar de forma precisa los efectos de las distintas longitudes de onda sobre parámetros como la altura, diámetros de tallo, biomasa, contenido de pigmentos, y la capacidad antioxidante de las plantas. La radiación UV aplicada con lámparas puede actuar tanto como un estímulo de crecimiento como un factor que induce mecanismos de defensa, dependiendo de las dosis, el tiempo y la etapa fenológica del cultivo (Verdaguer *et al*., 2017; Jenkins, 2017).

En cultivos de hoja como lechuga (*Lactuca sativa*), la suplementación con radiación UV-B mediante lámparas ha mostrado resultados promisorios en la mejora de la calidad nutricional. Lyncoskoufis et al. (2022) reportaron que el uso de lámparas UV-B en sistemas hidropónicos aumento el contenido de antocianinas y compuestos

fenólicos, generando hojas con mayor capacidad antioxidante. Asimismo, Zhang et al. (2021) observaron que la combinación de radiación UV-A y UV-B con iluminación LED blanca produjo más compactas y con mayor concentración de flavonoides y clorofilas. Sin embargo, exposiciones prolongadas redujeron ligeramente el peso fresco, lo que demuestra que el balance entre la intensidad y el tiempo de exposición es fundamental para obtener efectos positivos (Lyncoskoufis *et al.,* 2022; Zhang *et al*., 2021).

En el caso del pepino (*Cucumis sativus*)*,* Quian et al. (2020) emplearon lámparas UV-A en cultivos bajo invernadero y observaron una reducción en la longitud de los entrenudos y un aumento en la robustez del tallo, sin afectar el rendimiento de los frutos. Las plantas tratadas mostraron un fenotipo más compacto y resistente, adecuado para la producción intensiva bajo condiciones protegidas. Los resultados indicaron además una mejora en la fotosíntesis y en la acumulación de compuestos antioxidantes en hojas jóvenes, confirmando que la exposición a lámparas UV-A estimula rutas metabólicas asociadas con la defensa y el crecimiento equilibrado. (Quian *et a*l., 2020).

En fresa (*Fragaria* × *ananassa*), el uso de lámparas UV-B ha sido explorado como una alternativa para mejorar la calidad y prolongar la vida poscosecha. Zhu et al. (2023) demostró que la radiación UV-B antes de la cosecha incremento el contenido de antocianinas, polifenoles y ácido ascórbico en los frutos, además de retrasar la aparición de hongos durante el almacenamiento. Este tipo de tratamiento lumínico, aplicado en dosis controladas, permite aumentar el valor nutracéutico sin afectar el rendimiento. De igual manera, estudios de Pinheiro et al. (2014) evidenciaron que lámparas UV-C utilizadas en la etapa postcosecha reducen significativamente la carga microbiana superficial y prolongada la vida útil de tomates y fresas almacenados a baja temperatura (Zhu *et al.,* 2023; Pinheiro., 2014).

En cultivos aromáticos y en hojas finas, como la albahaca *(Ocimum basilicum)*, la exposición a radiación UV-A y UV-B con lámparas LED han mostrado incrementos notables en aceites esenciales y fenoles totales. Dou et al. (2019) encontraron que la radiación UV-B de 0.8 $kJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ (Kilojulios por metro cuadrado por día)

aplicada con lámparas fluorescentes durante siete días elevo el contenido de eugenol y rosmarínico, compuestos responsables del aroma y de la capacidad antioxidante de la planta. Además, la radiación UV-A incremento la altura de las plantas y la biomasa foliar, lo que sugiere un uso potencial de lámparas UV como herramienta de calidad en cultivos aromáticos bajo invernadero (Dou *et al.,* 2019).

De forma general, los estudios realizados con lámparas UV en diferentes cultivos muestran que la radiación UV puede emplearse como factor modulador de la fisiología vegetal, mejorando la calidad nutricional, la resistencia a patógenos y la acumulación de biomasa, siempre que se controle la dosis, el tiempo y la longitud de onda. La radiación UV-A tiene a favorecer el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis; la UV-B estimula la producción de metabolitos secundarios y defensa antioxidante, y la UV-C se utiliza principalmente en el control de patógenos poscosecha. El uso planificado de lámparas UV permite reproducir condiciones experimentales estables para analizar el impacto de cada longitud de onda en el crecimiento y fisiología del tomate (Juárez-Maldonado *et al.,* 2023; Verdaguer *et al*., 2017).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo durante el año 2024 en condiciones de invernadero, en el Departamento de Botánica, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Saltillo, Coahuila, México, situada en las coordenadas 25°21'20"N y 101°01'53"O, a una altitud de 1,742 msnm (Figura 1). El clima de la región se clasifica como semiseco templado, con una temperatura media anual de 17.5 ºC y 22 ºC, precipitaciones anuales promedio de 366.7 mm, presentando lluvias concentradas principalmente durante los meses de verano (INEGI, 2026; SEMA-CONAGUA, 2022). El invernadero cuenta con una estructura y cubierta de polietileno, que permite un control adecuado de temperatura, humedad y luminosidad.

3.2 Material Vegetal

Se emplearon plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tipo saladette obtenidas a partir de semillas de variedad CID F1 (Harris Moran, Davis, CA, USA).

3.3 Características de la lámpara

Se utilizaron lámparas LED calibradas para emitir la longitud de onda correspondiente a cada tratamiento y con un voltaje de entrada de 127 V y frecuencia de operación de 60 Hz. Las longitudes de onda utilizadas fueron las siguientes: UV-A a 365 nm (22 W), UV-B a 310-315 nm (13 W), y UV-C a 270-285 nm (25 W).

3.4 Desarrollo del cultivo

En el experimento las semillas se sembraron en charolas de germinación con una mezcla de peat moss y perlita en proporción 1:1 (v/v). Posteriormente, las plántulas fueron trasplantadas a bolsas negras de polietileno de 1 kg de capacidad, conteniendo la misma mezcla de sustrato hidratado. Durante todo el ciclo experimental las plantas se regaron con solución Steiner (Steiner, 1961) a una concentración del 25% para garantizar un suministro balanceado de nutrientes.

3.5 Tratamientos y diseño experimental

El experimento consistió en la exposición de las plántulas a tres tipos de radiación ultravioleta (UV): UV-A (365 nm), UV-B (310-315nm) y UV-C (270-285 nm). La aplicación de las radiaciones se realizó mediante lámparas tipo LED calibradas para emitir la longitud de onda correspondiente a cada tratamiento. La irradiación se llevó a cabo 40 días después de la siembra en charola. Para cada tipo de radiación se establecieron cinco tiempos de exposición (1,2,3,4 y 5 horas), además de un tratamiento control (T0) sin exposición a radiación ultravioleta.

El seguimiento experimental comprendió desde la siembra de las semillas en charolas de germinación hasta la etapa de la floración de las plantas. mientras que el periodo de evaluación comprendió los 30 días posteriores al trasplante, hasta la etapa de floración. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental estuvo compuesta por 256 plantas, correspondientes a 16 plantas por cada combinación de radiación y tiempo de exposición, además de 16 plantas pertenecientes al tratamiento (T0) para minimizar el efecto de la variabilidad ambiental.

3.6 Variables evaluadas

Las evaluaciones se realizaron en dos etapas: a los 15 y 30 días después del trasplante (DDT). Altura de la planta (cm), diámetro del tallo (mm), numero de hojas, numero de racimos, biomasa, fresca (g) y biomasa seca (g).

Altura de la planta (cm): se midió desde la base del tallo, utilizando un flexómetro.

Diámetro de tallo (mm): se midió con un vernier digital, asegurando precisión en la medición.

Numero de Hojas: se contó manualmente cada racimo registrando todas las hojas completamente desarrolladas presentes en cada planta.

Numero de racimos: se contó manualmente cada racimo floral.

Biomasa fresca (g): se obtuvo cortando cada planta a niel de sustrato y pensándola en una balanza digital, después cada planta se colocó en bolsas de papel.

- Biomasa seca (g): Después de registrar la biomasa fresca, cada planta se colocó en bolsas de papel y se mantuvo en invernadero hasta alcanzar un secado completo, asegurando la eliminación de la humedad. Una vez que las plantas estuvieron completamente secas, se pesaron nuevamente en una balanza digital para obtener el peso seco de cada muestra.

3.7 Análisis estadísticos

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar, con 4 tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento. Los datos obtenidos fueron procesados mediante un análisis de varianza (ANOVA). En los casos donde se detectaron diferencias significativas, se procedió a realizar una prueba de comparación de medias de Fisher (LSD) con un nivel de significancia de $p<0.05$.

4. RESULTADOS

4.1 Impacto de la Radiación UV-A

A los 30 días después del trasplante (DDT), la altura de las plantas de tomate no presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (< 0.05).

Las plantas expuestas a radiación UV-A mostraron valores de altura ligeramente superiores al control sin radiación (T0). La altura promedio del tratamiento T0 fue de 92.58 cm mientras que los tratamientos con UV-A oscilaron entre 94.56 y 98.12 cm. En comparación con el control, los tratamientos UV-A presentaron incrementos en altura entre 2.1% y 6.0%.

El tratamiento A2 (2 hora de exposición a radiación UV-A) registró el mayor valor de altura, con 98.12 cm, lo que representa un incremento aproximado del 6.0% respecto al control T0 (Figura 1).

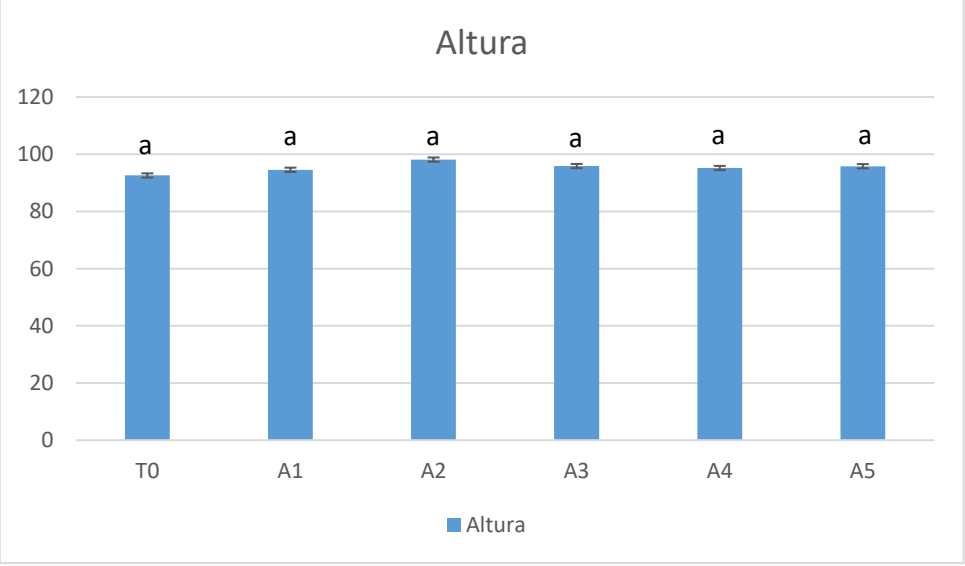


Figura 1 . Altura de plantas de tomate a los 30 DDT expuestas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que A1-A5 representan 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-A. Los valores representan la media error estándar. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p< 0.05$). T0: control sin exposición de radiación UV, A1: tratamiento con exposición a radiación UV-A durante 1 hora, A2: tratamiento con exposición a radiación UV-A durante 2 horas, A3: tratamiento con exposición a radiación UV-A durante 3 horas, A4: tratamiento con exposición a radiación UV-A durante 4 horas, A5: tratamiento con exposición a radiación UV-A durante 5 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la diferencia mínima significativa de Fisher ($p<0.05$).

El número de hojas por plantas no mostró diferencias significativas en los tratamientos evaluados, registrando 10 hojas por planta, tanto en el tratamiento control T0 como en las plantas expuestas a radiación UV-A (A1-A5) (Figura 2).

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 3). Estos resultados indican que, bajo las condiciones del presente estudio, la exposición UV-A no modificó el número de hojas en plantas de tomate durante el periodo de evaluación.

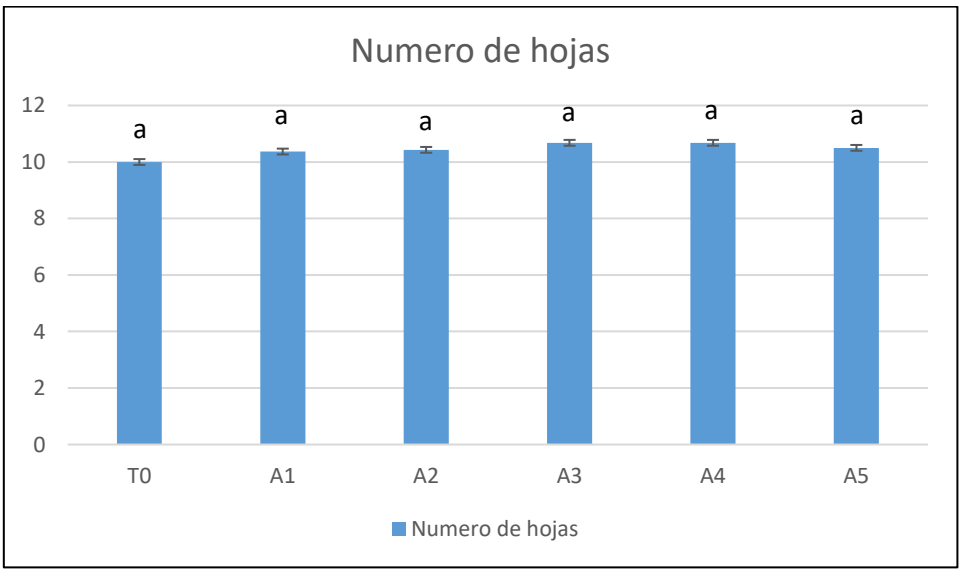


Figura 2. Numero de hojas por planta de tomate, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A.T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV-A. T0 corresponde al tratamiento control sin exposición a UV, mientras que A1-A5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-A. Los valores representan la media error estándar. Las letras iguales sobre la barra

indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el diámetro de tallo de las plantas de tomate no presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 3).

El tratamiento control T0 registro un diámetro promedio de 7.11 mm, mientras que las plantas expuestas a radiación UV-A presentaron valores que oscilaron entre 6.84 y 7.06 mm. En comparación con el control, los tratamientos con radiación UV-A mostraron ligeras reducciones en el diámetro del tallo, con diferencias descriptivas que variaron entre 0.7% y 3.8%, sin que estas diferencias fueran estadísticamente significativas.

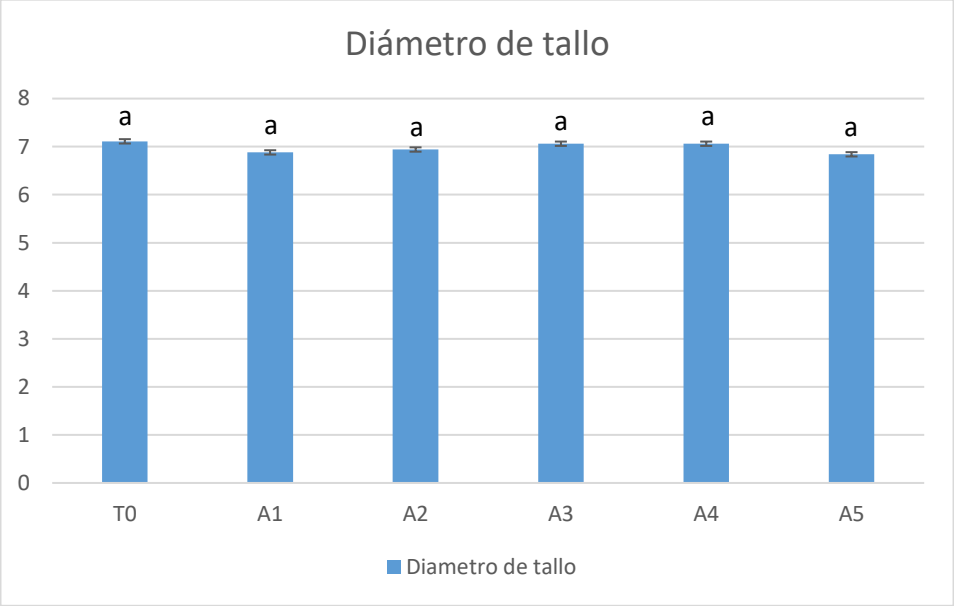


Figura 3. Diámetro promedio de tallo (mm) de plantas de tomate expuestas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que A1-A5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-A. Los valores representan la media error estándar. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, desacuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

El número de racimos por planta fue igual en todos los tratamientos evaluados, registrándose un promedio de 2 racimos por planta, tanto en tratamiento control T0 como en las plantas expuestas a radiación UV-A (A1-A5) (Figura 4).

En el análisis de varianza indicó que no existieron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). Esto evidencia que, bajo las condiciones del presente estudio, la radiación UV-A y los diferentes tiempos de exposición no influyeron en la formación de racimos durante el periodo de evaluación.

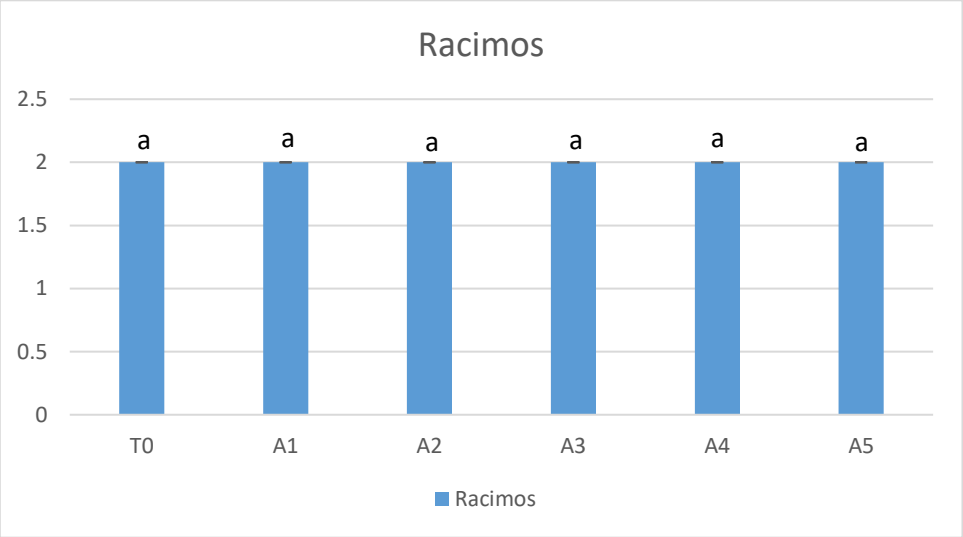


Figura 4. Numero de racimos por planta de tomate, sometidas a diferentes tiempos de exposición, a radiación UV-A.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que A1-A5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-A. Los valores representan la media, error estándar. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas, significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el peso fresco de las plantas de tomate mostro diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$). El tratamiento control T0 se ubicó en un grupo estadístico diferente (letra b), mientras que los tratamientos A2, A3, A4 y A5 se agruparon con la letra a. El

tratamiento A1 presento un comportamiento intermedio, agrupándose como ab (Figura 5).

Las plantas del tratamiento control T0 registraron el menor peso fresco, con un promedio de 65.27 g, seguido del tratamiento A1 con un (Xg). En contraste, los tratamientos A2, A3, A4 Y A5 incrementaron esta variable en X, X, X y X % con respecto a T0 Estos resultados indican que la aplicación de radiación UV-A favoreció el incremento del peso fresco en las plantas evaluadas (Figura 5).

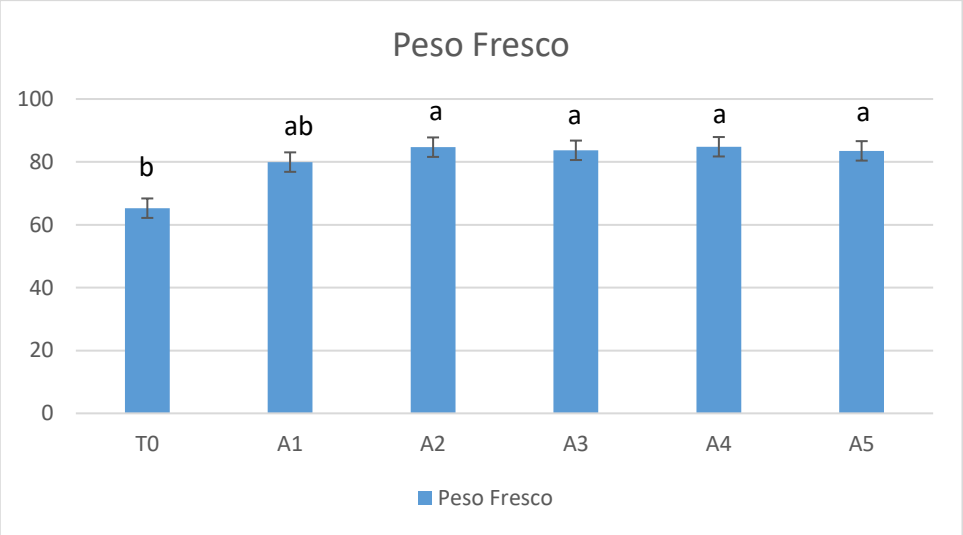


Figura 5. Peso fresco promedio (g) de plantas de tomate expuestas a radiación UV-A.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que A1-A5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-A. Los valores representan la media y la barra de error estándar. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

El peso seco de las plantas de tomate no presentó diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 6).

De manera descriptiva, el peso seco osciló entre 50.75 y 55.00 g. El valor más bajo correspondió al tratamiento A1, con 50.75 g. El tratamiento control T0 presentó un valor intermedio con 54.41 g, similar al observado en los tratamientos con radiación

UV-A. En general, aunque se observaron ligeras variaciones entre tratamientos, estas no fueron estadísticamente significativas (Figura 6).

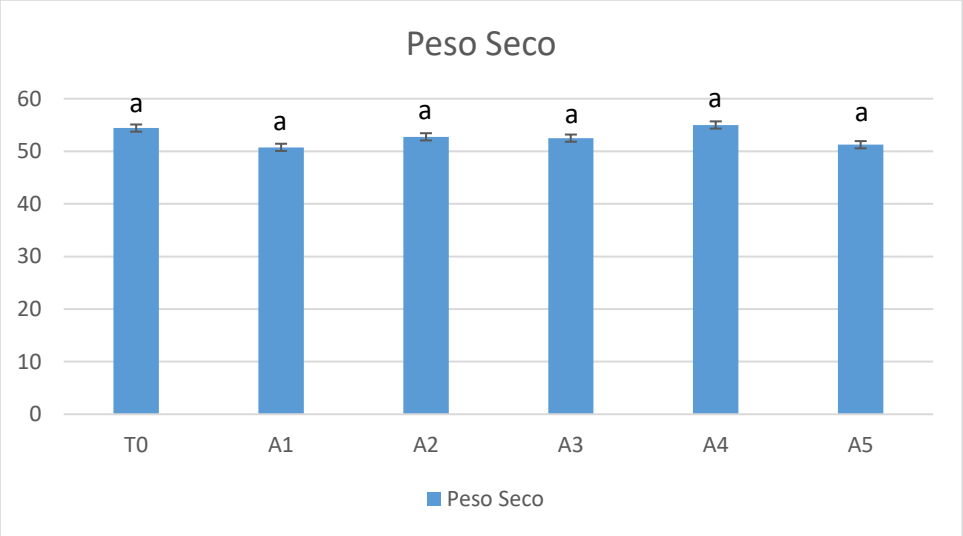


Figura 6. Peso seco promedio (g) de plantas de tomate expuestas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-A.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que A1- A5 representan de 1 a 5 horas de exposición UV-A. Los valores representan la media error estándar.

4.2 Impacto de la Radiación UV-B

A los 30 días después del trasplante, la altura de las plantas no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos con radiación UV-B. De acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 7).

Las plantas expuestas a radiación UV-B presentaron valores de altura ligeramente superiores al tratamiento control T0. El control registro una altura de 92.58 cm, mientras que los tratamientos con UV-B presentaron valores entre 93.25 y 95.75 cm. En comparación con el control, los incrementos observados en los tratamientos con radiación UV-B variaron entre 0.7% y 3.4%.

El tratamiento B3 presentó el mayor valor de altura, con 95.75 cm, lo que representó un incremento aproximado del 3.4 % respecto del control. El menor valor

correspondió al tratamiento B2, con 93.25 cm, sin diferencias estadísticas significativas respecto al resto de los tratamientos (Figura 7).

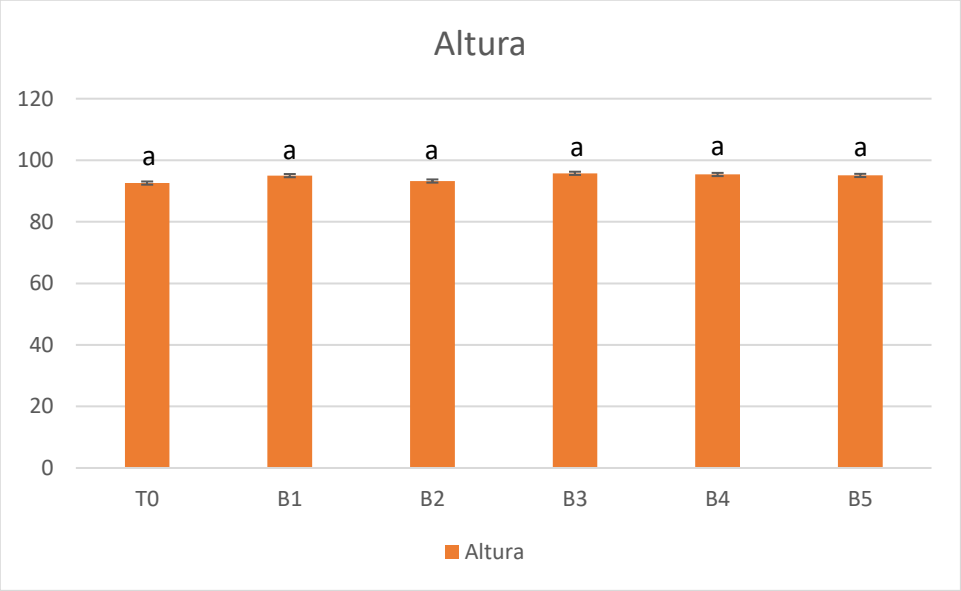


Figura 7. Altura en plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que B1-B5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-B. Los valores representan la media error estándar. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el número de hojas por planta mostró valores comparables entre la mayoría de tratamientos, sin detectarse un efecto estadísticamente significativo de la radiación UV-B, conforme al análisis estadístico y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 8).

El tratamiento control T0 presento un promedio de 10 hojas por planta, mientras que los tratamientos expuestos a radiación UV-B registraron valores entre 6.8 y 10.62 hojas. Los tratamientos B4 y B5 mostraron los valores más altos, con 10.62 y 10.50 hojas, lo que representó incrementos aproximados de 6.2% y 5.0% en comparación con el control.

Por el contrario, el tratamiento B1 registro el menor número promedio de hojas, con 6 hojas por planta. Sin embargo, estas variaciones no fueron suficientes para establecer diferencias estadísticas entre tratamientos durante el periodo de evaluación (Figura 9).

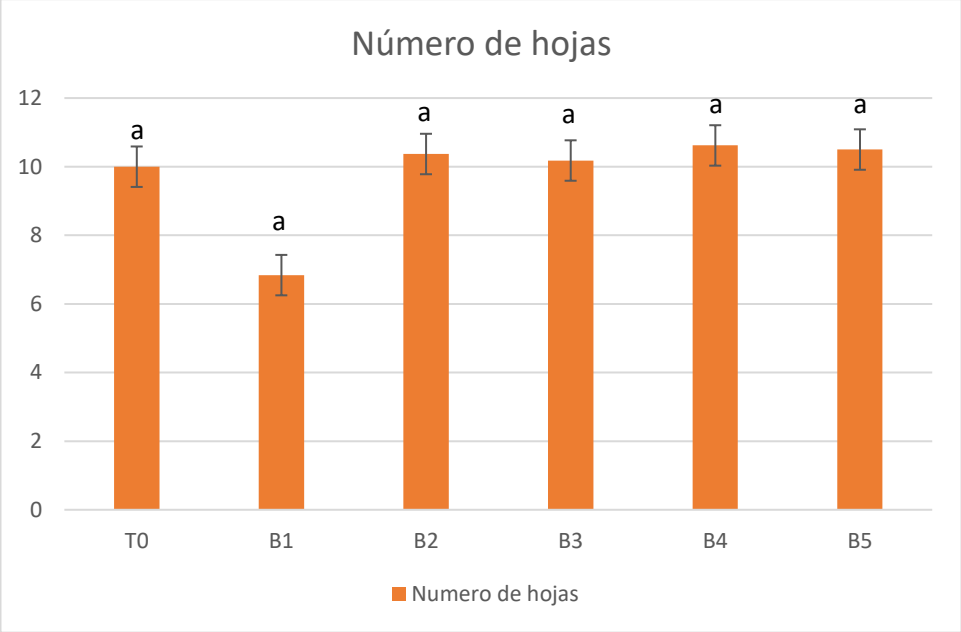


Figura 8. Número de hojas por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, bajo diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que B1-B5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-B. Los valores corresponden a la media error estándar. Letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas significativamente entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el diámetro de tallo de las plantas de tomate presento comportamientos similares entre los tratamientos evaluados, sin evidenciarse un efecto estadísticamente significativo de la radiación UV-B, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 10).

El tratamiento T0 registro un diámetro promedio de 7.11 mm, mientras que los tratamientos con radiación UV-B mostraron valores comprendidos entre 5.18 y 6.95 mm.

De manera descriptiva, los tratamientos B2 y B5 presentaron valores cercanos al control, con 6.95 mm, lo que represento reducciones aproximadas del 2.3% en comparación con T0.

El valor más bajo de diámetro de tallo se observó en el tratamiento B4, con 5.18 mm, equivalente a una disminución aproximada del 27.1% respecto al control. No obstante, estas variaciones no fueron suficientes para establecer diferencias estadísticas entre tratamientos durante el periodo de evaluación (Figura 9).

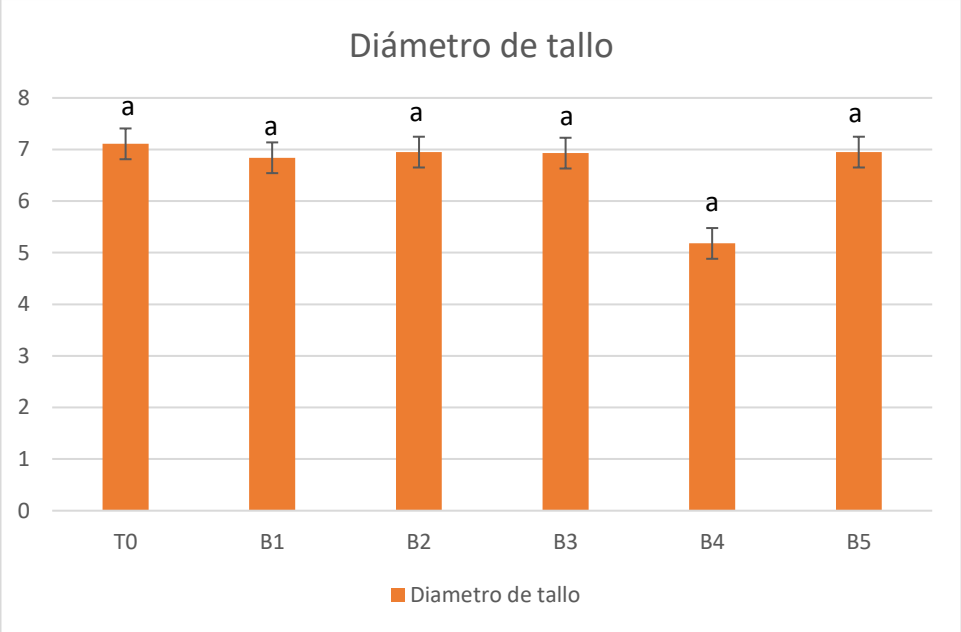


Figura 9. Diámetro del tallo (mm) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que B1- B5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-B. Los valores corresponden a la media error estándar. Letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el número de racimos por planta se mantuvo constante en todos los tratamientos evaluados, registrándose un promedio de 2 racimos por planta, tanto en el tratamiento control T0 como en las plantas expuestas a radiación UV-B (Figura 10).

Los resultados del análisis estadístico indicaron que la exposición a radicación UV-B y los distintos tiempos de aplicación no generaron variaciones significativas en la formación de racimos durante el periodo de evaluación, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher.

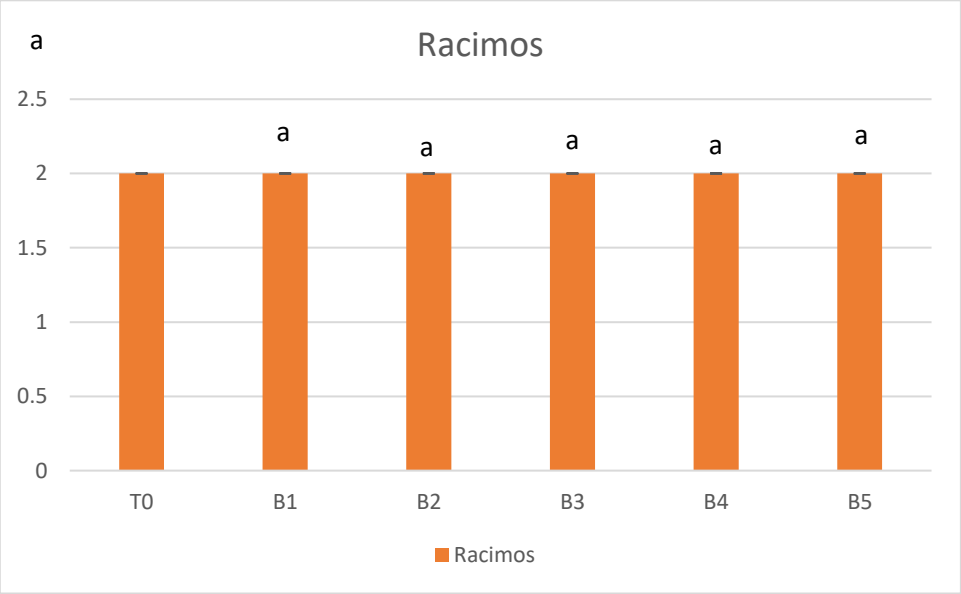


Figura 10. Numero de racimos por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, bajo diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B.

B1-B5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-B. Letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, conforme a la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el peso fresco de las plantas de tomate mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos sometidos a radiación UV-B, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 11).

El tratamiento control T0 registró un peso fresco promedio de 65.27 g, mientras que los tratamientos con radiación UV-B presentaron valores que oscilaron entre 60.25 y 89.56 g. En comparación con el control, los tratamientos B1, B2 y B3 mostraron incrementos significativos en el peso fresco, agrupándose en una categoría estadística superior.

El mayor valor de peso fresco se observó en el tratamiento B5, con 89.56 g, el cual fue superior al control y se clasifico estadísticamente como el tratamiento con mayor biomasa fresca. En contraste, el tratamiento B4 presento el menor valor, con 60.35 g, mostrando una reducción respecto al control y ubicándose en un grupo estadístico inferior (Figura 11).

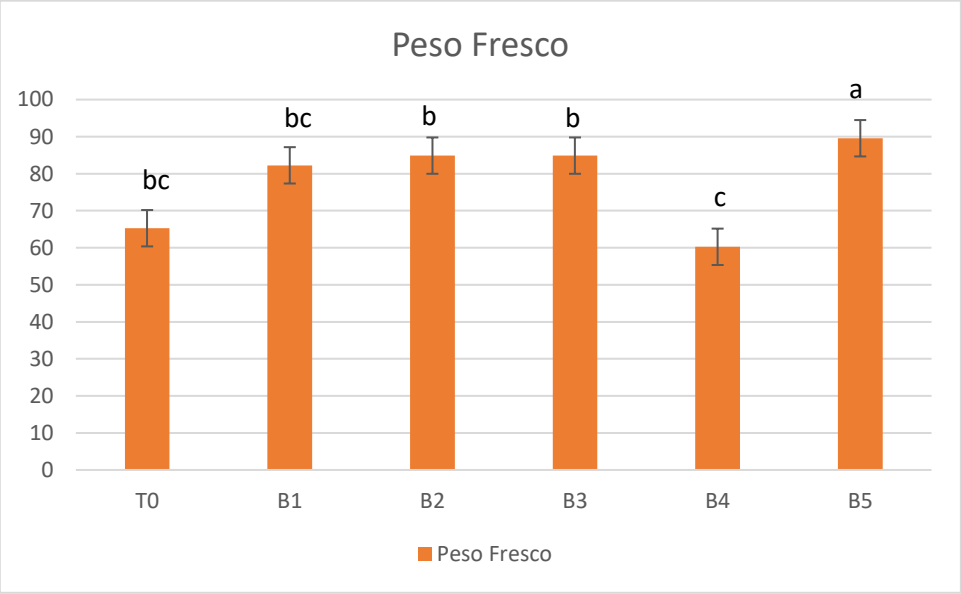


Figura 11. Peso fresco (g) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que B1-B5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-B. Los valores corresponden a la media error estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, conforme a la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el peso seco de las plantas de tomate presento diferencias estadísticas entre tratamientos, lo que evidencia una respuesta

diferencial a la radiación UV-B, según el análisis de varianza y la prueba de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 12).

El tratamiento control T0 alcanzo un peso seco promedio de 54.41 g, valor similar al registrado en B1 con 54.74 g, ambos ubicados dentro del mismo grupo estadístico. Los tratamientos B2 y B3 mostraron valores intermedios, con 56.25 y 55.50 g, respectivamente, clasificándose en un grupo estadístico compartido (ab), lo que indica una tendencia a incrementar la biomasa seca sin diferir significativamente del control.

El mayor peso seco se observó en el tratamiento B5, con 60.50 g, el cual fue superior al control T0 y se distinguió estadísticamente como el tratamiento con mayor acumulación de biomasa seca. En contraste, el tratamiento B4, presento el valor más bajo, con 40.50 g, lo que represento una reducción aproximada del 25.6 % respecto al tratamiento sin radiación, ubicándose en un grupo estadístico inferior (Figura 12).



Figura 12. Peso seco (g) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-B.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras B1-B5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-B. Letras distintas sobre las barras

indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, conforme a la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

4.3 Impacto de la Radiación UV-C

A los 30 días después del trasplante, la altura de las plantas de tomate mostró variaciones significativas entre tratamientos sometidos a radiación UV-C, lo que indica una respuesta diferenciada al tiempo de exposición, conforme al análisis estadístico realizado y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 13).

El tratamiento control T0 registro una altura promedio de 92.58 cm, ubicándose en un grupo estadístico intermedio (ab). En comparación con el control, el tratamiento C2 presento la mayor reducción en altura, con un valor promedio de 61.75 cm, lo que represento una diminución, clasificándose en un grupo estadístico inferior (b).

Los tratamientos c1, c3, y c5 mostraron valores intermedios de altura, con promedios de 86.12, 81.25 y 85.87 cm, respectivamente, sin diferir significativamente del control. Por otro lado, el tratamiento C4 registro la mayor altura, con 87.56 cm, ubicándose en el grupo estadístico superior (a), aunque sin diferencias significativas respecto a T0 (Figura 13).

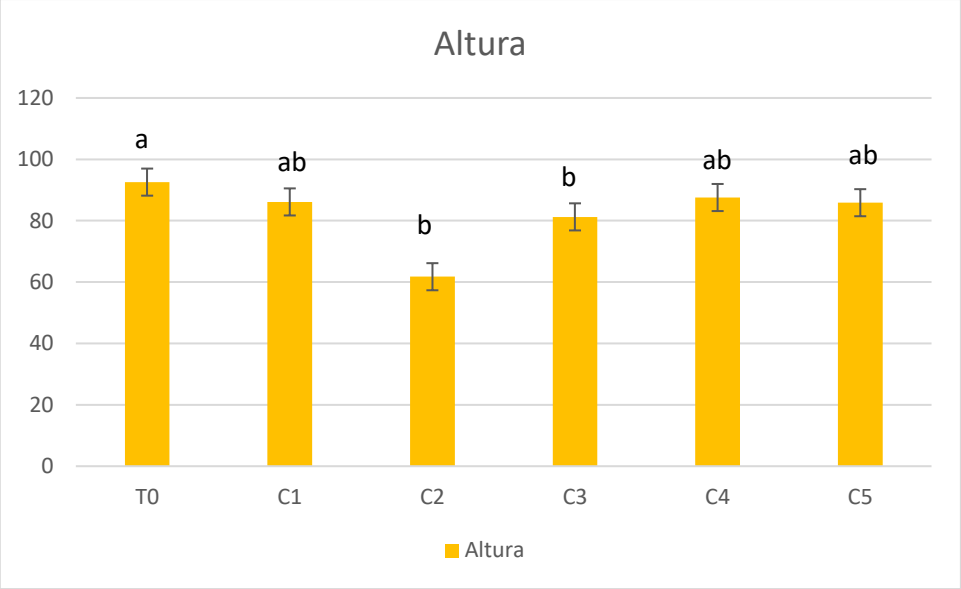


Figura 13. Altura de plantas de tomate a los 30 días del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que C1-C5 representan se 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-C. Los valores corresponden a la media error estándar. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el número de hojas por plantas fue similar entre los tratamientos evaluados, sin detectarse diferencias estadísticas asociadas a la exposición UV-C, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 14).

El tratamiento control T0 presento un promedio de 10 hojas por planta, mientras que los tratamientos con radiación UV-C mostraron valores ligeramente menores, que oscilaron entre 8 y 9 hojas. De manera descriptiva, el tratamiento C5 registró el

menor número de hojas, con 8, lo que represento una reducción respecto al control T0.

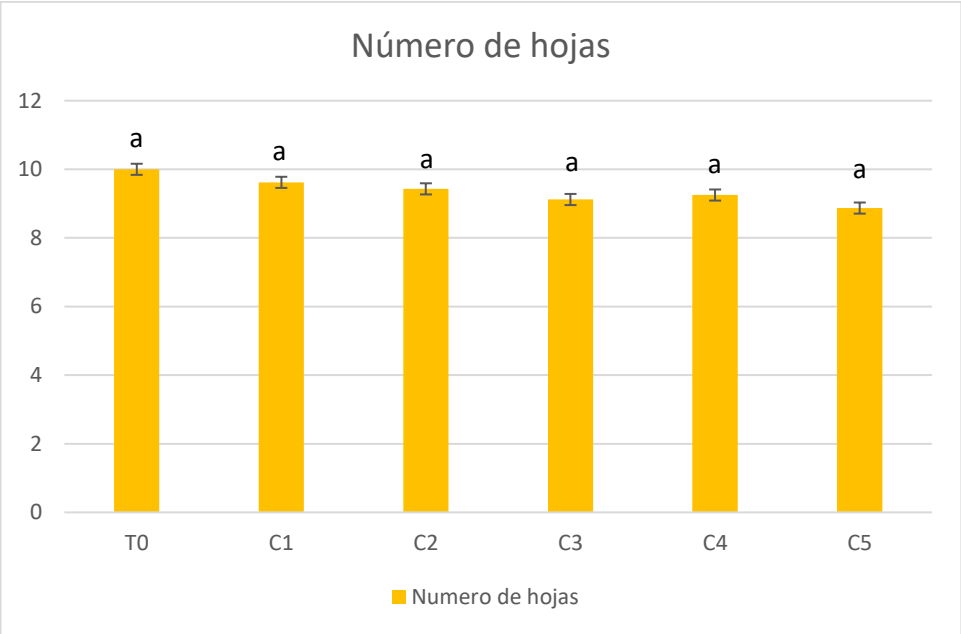


Figura 14.Número de hojas por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, bajo diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que C1-C5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-C. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, conforme a la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el diámetro del tallo presentó diferencias estadísticas entre tratamientos sometidos a radiación UV-C, lo que evidencia una respuesta diferencia al tiempo de exposición, conforme al análisis de varianza y la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 15).

El tratamiento T0 registro un diámetro de 7.11 mm, ubicándose en el grupo estadístico b. En contraste, el tratamiento C2 alcanzó el mayor diámetro de tallo, con 7.66 mm, clasificándose en el grupo estadístico superior (a), lo que representó un incremento respecto al control.

Los tratamientos C1, C4, y C5 mostraron valores intermedios, con diámetros 7.59, 7.51 y 7.55 mm, sin diferir significativamente del tratamiento con mayor valor ni del control, al agruparse en la categoría estadística “ab”. Por su parte, el tratamiento C3 presento un diámetro promedio de 7.38 mm, similar al control y perteneciente al mismo grupo estadístico “b”.

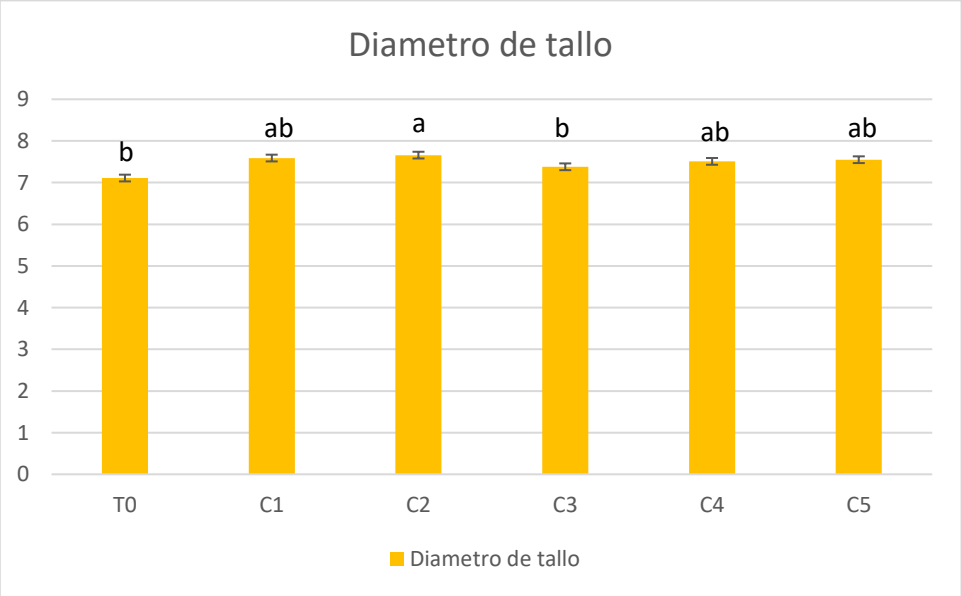


Figura 15. Diámetro de tallo (mm) de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que C1-C5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-C. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, conforme a la prueba de diferencia minina significativa de Fisher ($p < 0.05$).

A los 30 días después del trasplante, el número de racimos por planta presento diferencias estadísticas entre algunos tratamientos expuestos a radiación UV-C, lo que indica que el tiempo de exposición influyo de manera diferencial en esta variable.

El tratamiento control T0 registró un promedio de 2 racimos por planta, ubicándose en un grupo estadístico intermedio ab. Un comportamiento similar se observó en los

tratamientos C1, C3 y C5, con valores de 1.81, 1.93 y 1.93 racimos, los cuales no difirieron significativamente del control.

El tratamiento C4 presento el mayor número de racimos, con 2 racimos por planta, clasificándose en el grupo superior a. El tratamiento C2 registró el menor valor promedio de 1.81 racimos, ubicándose en el grupo estadístico inferior b, lo que evidencia una reducción en la forma de racimos bajo este tiempo de exposición a radiación UV-C (Figura 16).

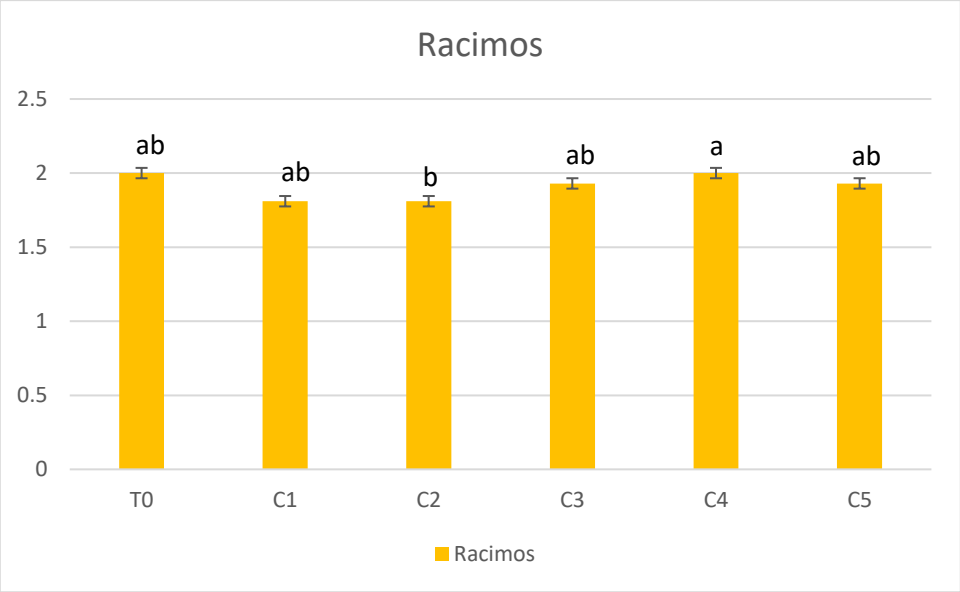


Figura 16.Numero de racimos por planta de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que C1-C5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-C. Los valores corresponden a la media ± error estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

El peso fresco de las plantas de tomate mostro diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos expuestos a radiación UV-C, lo que indica que el tiempo de exposición influyó en la acumulación de biomasa, de acuerdo con el análisis estadístico y prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 17).

El tratamiento C5 presentó el mayor peso fresco, con un valor promedio de 82.5 g, ubicándose en el grupo estadístico superior a. Por su parte, los tratamientos C1 y C4, con valores de 79.5 y 80.25 g, se clasificaron en el grupo intermedio ab, sin diferir estadísticamente el tratamiento con mayor valor.

El tratamiento T0 registró un peso fresco de 65.27 g, ubicándose en el grupo estadístico inferior b, lo que sugiere una menor acumulación de biomasa en ausencia de radiación UV-C. De manera similar, los tratamientos C2 y C3 presentaron valores de 77.25 y 78.12 g, también clasificados en el grupo b, indicando que estos tiempos de exposición no favorecieron significativamente el incremento del peso fresco respecto al control (Figura 17).

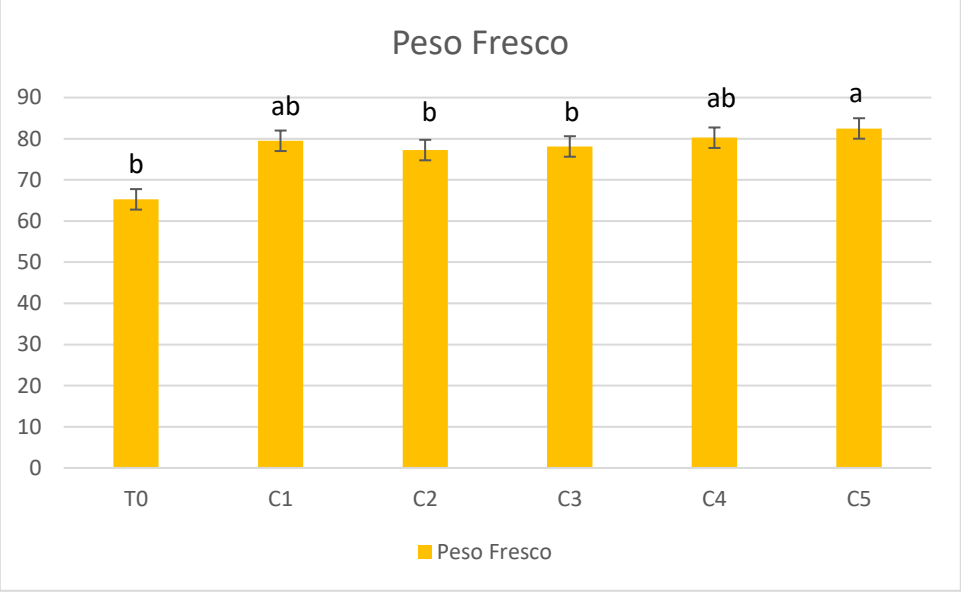


Figura 17.Fresco de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que C1-C5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-C. Los valores corresponden a la media error estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p < 0.05$).

El peso seco de las plantas de tomate no presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados bajo radiación UV-C, de acuerdo con el análisis de varianza y la prueba de Fisher ($p < 0.05$) (Figura 18). Todos los tratamientos se ubicaron dentro del mismo grupo estadístico (a), lo que indica que los distintos tiempos de exposición no modificaron de manera significativa la acumulación de biomasa seca.

El tratamiento control T0 registró un valor promedio de 54.41 g, mientras que los tratamientos con radiación UV-C mostraron valores que oscilaron entre 46 g y 51.75 g. El tratamiento C2 presento el menos peso seco, aunque sin diferencias estadísticas respecto al resto, mientras que C4, C1 y C5 mostraron valores cercanos al control.

Estos resultados sugieren que, aunque la radiación UV-C influyo en el peso fresco, no tuvo un efecto significativo sobre la biomasa seca, lo que indica que la acumulación de materia estructural no fue alterada por los tiempos de exposición evaluados.

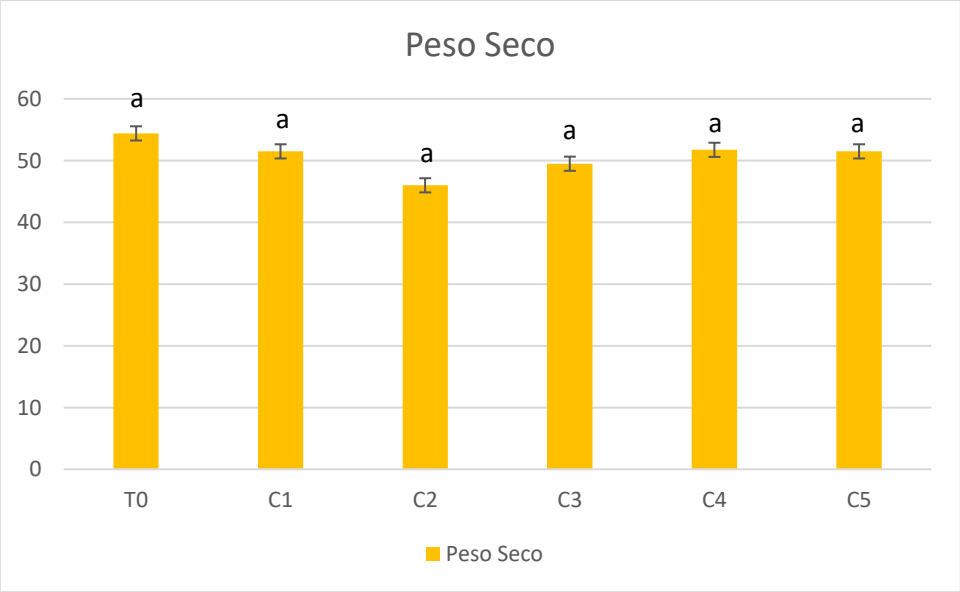


Figura 18. Peso seco de plantas de tomate a los 30 días después del trasplante, sometidas a diferentes tiempos de exposición a radiación UV-C.

T0 corresponde al tratamiento control sin radiación UV, mientras que C1-C5 representan de 1 a 5 horas de exposición a radiación UV-C. Letras iguales sobre las barras indican ausencia de diferencias estadísticas significativas según la prueba de Fisher ($p < 0.05$).

5. DISCUSIÓN

La radiación ultravioleta (UV) ha sido reconocida como un factor ambiental capaz de modificar procesos fisiológicos, bioquímicos y morfológicos en las plantas. En cultivos hortícolas como el tomate *(S. lycopersicum* L.), la respuesta a radiación UV depende principalmente de la longitud de onda, la dosis aplicada y el estado de desarrollo de la planta, pudiendo actuar tanto como un factor de estrés como una señal reguladora de crecimiento. En este contexto, la presente investigación evaluó el efecto de diferentes longitudes de radiación ultravioleta (UV-A, UV-B, y UV-C) aplicadas durante la etapa de plántula bajo distintos tiempos de exposición, sobre variables de crecimiento vegetativo de plantas de tomate, con el objetivo de determinar tiempos de exposición óptimos y comparar las diferencias en sus efectos sobre el crecimiento en corto plazo.

Los resultados obtenidos indican que la aplicación de la radiación UV-A durante la etapa de plántula generó respuestas diferenciadas en el crecimiento de las plantas de tomate evaluadas 30 días después del trasplante. En particular, se observó un incremento significativo en la altura de las plantas sometidas a ciertos tiempos de exposición destacando el tratamiento A2, el cual presento valores superiores en comparación con el control sin radiación UV (Figura 2). Este comportamiento sugiere que la radiación UV-A, aplicada de manera controlada en etapas tempranas del desarrollo, puede inducir respuestas de aclimatación que se mantienen después del trasplante, influyendo positivamente en el crecimiento vegetativo a corto plazo (He at al., 2020; Miao *et al.,* 2022).

El aumento en la altura de las plantas observado en el tratamiento podría atribuirse a la activación de fotorreceptores sensibles a la radiación UV-A, como las

criptocromos y fototropinas, los cuales participan en la regulación de procesos morfogénicos relacionados con la elongación celular y la arquitectura de la planta. Estudios han demostrado que exposiciones moderadas a UV-A pueden estimular la elongación del tallo y favorecer la acumulación de biomasa aérea, sin que la dosis y el tiempo de exposición generen estrés excesivo (Li et al., 2021; Zhang *et al.,* 2023).

Diversos estudios han demostrado que la radiación UV-A puede promover cambios en la arquitectura de las plantas al interactuar con fotorreceptores sensibles a esta longitud de onda, modulando procesos relacionados con la elongación celular y el crecimiento vegetativo. En cultivos hortícolas, incluyendo tomate, se ha reportado que la exposición a UV-A incrementa la altura de la planta al mejorar la eficiencia en la captación de luz y favorecer ajustes morfológicos que optimizan la fotosíntesis, sin afectar negativamente la integridad de los tejidos vegetales (Verdager *et al.,* 2017).

Asimismo, investigaciones realizadas en sistemas de cultivo protegido indican que la radiación UV-A, cuando se aplica en dosis moderadas, no genera daño oxidativo significativo no reduce la eficiencia fotosintética, permitiendo que las plantas mantengan tasas adecuadas de crecimiento (Káiser *et al.,* 2019).

En contraste con el tratamiento control que presentó los valores más bajos de altura (Figura 1), lo que refuerza la hipótesis que la radiación UV-A actúa como una señal ambiental capaz de modular el crecimiento cuando se aplica en etapas tempranas. Investigaciones realizadas en cultivos hortícolas bajo condiciones controladas han señalado que la ausencia total de radiación UV puede limitar ciertas respuestas de desarrollo limitadas a la percepción del espectro lumínico completo, lo que explicaría el menor crecimiento observado en plantas no expuestas (Bantis *et al.,* 2021; Wang *et al.,* 2022).

Respecto al número de hojas, los resultados indican que no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, manteniéndose un valor promedio cercano a diez hojas por planta (Figura 2). Esta ausencia de variación sugiere que la radiación UV-A, bajo los tiempos de exposición evaluados, no afecto de manera

directa la iniciación foliar ni el patrón de emisión de hoja, si no que su afecto se concentró principalmente en el crecimiento longitudinal del tallo. Resultados similares han sido reportados en estudios donde la radiación UV-A promovió cambios en variables morfológicas especificas sin alterar el número total de hojas en evaluaciones de corto plazo (Valenta *et al.,* 2020; Ivanova *et al.,* 2024).

En el diámetro del tallo, no se detectaron diferencias entre los tratamientos UV-A y el control, lo que indica que la radiación UV-A aplicada en la fase de plántula no influyo de manera notable en el engrosamiento del tallo. Este comportamiento ha sido documentado en otros estudios, donde se señala que el diámetro del tallo suele ser menos sensible a la radiación UV-A que variables como la altura o la biomasa, especialmente en etapas tempranas del crecimiento (Li *et al.,* 2021; Kong *et al.,* 2024).

En conjunto, los resultados sugieren que la radiación UV-A aplicada durante la etapa de plántula puede considerarse una herramienta potencial para modular el crecimiento inicial de plantas de tomate, siempre que se establezcan tiempos de exposición adecuados. El efecto positivo observado en la altura de las plantas, indica que exposiciones moderadas pueden favorecer el crecimiento vegetativo sin generar efectos negativos sobre otras variables morfológicas. Estos hallazgos coinciden con estudios que destacan la importancia de optimizar la dosis y duración de la radiación UV-A para maximizar sus beneficios en sistemas de producción hortícola (Miao et al., 2022; Kong *et al.,* 2024).

Los resultados obtenidos indican que la exposición a radiación UV-B aplicada durante la etapa de plántula generó respuestas diferenciadas en el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate evaluadas 30 días después del trasplante. En términos de altura de planta, los tratamientos UV-B mostraron incrementos moderados respecto al control (Figura 7). Este patrón sugiere que dosis controladas de UV-B pueden actuar como una señal reguladora del crecimiento, sin inducir necesariamente efectos negativos severos en la elongación del tallo, lo cual coincide con estudios que reportan que el UV-B, a intensidades bajas o moderadas,

puede modular procesos morfogénicos sin causar inhibición marcada del crecimiento vegetal (Verdaguer et al., 2020; Chen *et al.,* 2022).

La estabilidad en el número de hojas, sugiere que la radiación UV-B no afectó significativamente el desarrollo foliar de las plantas n la mayoría de los tratamientos, lo cual ha sido previamente documentado en estudios donde ese señala que el UV-B puede alterar más la expansión foliar que el número total de hojas, dependiendo del tiempo de exposición y la intensidad aplicada (Chen *et al.,* 2022; Sadat Shahzaidi *et al.,* 2025).

Respecto al diámetro del tallo no se detectaron diferencias estadísticas, lo que indica que la radiación UV-B no tuvo un efecto negativo sobre el engrosamiento del tallo en las condiciones experimentales evaluadas (Figura 9). Investigaciones previas han señalado que el diámetro del tallo suele ser una variable menos sensible al UV-B en comparación con la altura o la biomasa, especialmente cuando la radiación se aplica en etapas tempranas y bajo condiciones controladas (Verdaguer *et al.,* 2020).

Diversos autores señalan que los efectos de UV-B sobre la floración y formación de racimos dependen del estado fenológico de la planta y de exposiciones prolongadas, por lo que su ausencia en esta etapa temprana es esperable (Chen et al., 2022). En relación con el peso fresco, se observaron incrementos notables en los tratamientos, destacando B5 como el tratamiento con el mayor valor (Figura 11). Estos resultados sugieren que ciertas dosis de UV-B pueden inducir una respuesta compensatoria en la acumulación de biomasa fresca, posiblemente asociada a cambios fisiológicos como una mayor eficiencia en la retención de agua o ajustes metabólicos inducidos por la radiación. Estudios recientes reportan que el UV-B puede estimular mecanismos de aclimatación que favorecen la acumulación de biomasa bajo condiciones específicas de dosis y tiempo de exposición (Sadat Shahzaidi *et al.,* 2025).

Por otro lado, el peso seco mostró un comportamiento más variable, con valores similares entre la mayoría de los tratamientos y el control, excepto el tratamiento B4, que presento una disminución (Figura 12). La ausencia de diferencias

significativas en la mayoría de los tratamientos sugiere que el incremento observado en peso fresco no siempre se traduce en mayor acumulación de materia seca, lo cual podría estar relacionado con ajustes fisiológicos temporales más que con un aumento real en la síntesis de biomasa estructural (chen *et al.,* 2022).

Este fenómeno ha sido descrito en estudios donde el UV-B induce respuestas de estrés moderado, activando rutas de señalización como UVR8 que permiten la aclimatación sin comprometer severamente la producción de materia seca (Sadat Shahzaidi *et al.,* 2025).

En conjunto a los resultados obtenidos indican que la radiación UV-B aplicada en etapa de plántula puede generar respuestas variables en el crecimiento inicial del tomate, dependiendo del tiempo de exposición. Estas respuestas parecen estar asociadas a la capacidad de la planta para percibir la UV-B como una señal ambiental y activar mecanismos de aclimatación fisiológica, más que como un factor exclusivamente estresante. Esto respalda el objetivo de la presente investigación, demostrar que existen diferencias en los efectos del UV-B sobre el crecimiento en el corto plazo, y que la optimización del tiempo de exposición es un factor clave para aprovechar sus posibles beneficios agronómicos (Verdaguer *et al.,* 2020; Chen *et al.,* 2022).

Los resultados del presente estudio evidencian que la radiación UV-C aplicada durante la etapa de plántula tuvo un efecto negativo persistente sobre el crecimiento vegetativo del tomate, manifestando principalmente una reducción significativa de la altura de las plantas respecto al control, aun cuando la evaluación se realizó 30 días después del trasplante (Figura 13). Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se indica que la radiación UV-C, debido a su alta energía y a que forma parte del espectro solar que alcanza naturalmente la superficie terrestre, provoca daños directos en estructuras celulares, limitando procesos como la división y elongación celular (Kenigswald y Lopez-Ortiz, 2020).

La persistencia del efecto inhibitorio observado sugiere que la exposición temprana a UV-C indujo alteraciones fisiológicas duraderas, asociadas a la activación de mecanismos de defensa reparación celular. Diversos estudios han demostrado que

UV-C incrementa la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), generando estrés oxidativo severo que compromete el crecimiento posterior de las plantas, especialmente cuando la exposición ocurre en fases tempranas del desarrollo, como la etapa de plántula (Hoideg *et al.,* 2020).

Respecto al diámetro de tallo, se observaron diferencias entre tratamientos, destacando un mayor engrosamiento en algunos casos (Figura 15). Este comportamiento puede interpretarse como una respuesta compensatoria al estrés, en la que la planta prioriza el fortalecimiento estructural del tallo frente al crecimiento longitudinal. Investigaciones recientes han documentado que la radiación UV de alta energía puede inducir una redistribución de recursos hacia tejidos estructurales como mecanismo de adaptación frente a condiciones adversas (Sadat Shahzaidi *et al.,* 2025).

El número de racimos se mantuvo bajo y con variaciones limitadas entre tratamiento (Figura 16), lo cual es congruente con el corto periodo de evaluación del experimento y con el impacto negativo de UV-C sobre el crecimiento vegetativo. La literatura indica que el estrés inducido por UV-C en etapas tempranas puede retrasar el desarrollo reproductivo, ya que la planta destina sus recursos prioritariamente a procesos de mantenimiento fisiológico y reparación celular, antes que a la formación de estructuras reproductivas (Kenigswald y Lopez-Ortiz, 2020).

En relación con el peso fresco, algunos tratamientos UV-C mostraron incrementos respecto al control (Figura 18); sin embargo, este aumento no se reflejó de manera consistente en el peso seco (Figura 18). Esta discrepancia sugiere que el incremento en peso fresco podría estar asociado a una mayor retención de agua o a cambios temporales en la turgencia celular, más que una mayor acumulación de biomasa estructural, lo cual ha sido descrito en estudios donde la radiación UV-C induce respuestas fisiológicas transitorias asociadas al estrés (Hideg *et al.,* 2020).

Los resultados confirman que la radiación UV-C aplicada en la etapa de plántula tienen un efecto predominante negativo sobre el crecimiento inicial del tomate en el corto plazo. La reducción en altura, numero de hojas y el desarrollo general de las plantas respalda que UV-C actúa principalmente como un agente estresante severo.

No obstante, estos resultados también resaltan la importancia de definir cuidadosamente los tiempos de exposición, ya que la radiación UV-C puede tener aplicaciones específicas en agricultura, como el control de patógenos, siempre que su uso no comprometa el crecimiento vegetal, en concordancia con el objetivo de la presente investigación (Kenigswald y López- Ortiz 2020; Sadat Shahzaidi *et al.,* 2025).

Además de los efectos negativos sobre el crecimiento observados en plantas de tomate expuestas a radiación UV-C durante la etapa de plántula, la literatura también documenta que la exposición de tejidos de tomate a radiación UV-C genera cambios fisiológicos y estructurales que reflejan respuestas de estrés más allá de daños superficiales (Ramírez Zambrano, A. J. 2023).

6. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el efecto de diferentes longitudes de onda de radiación ultravioleta sobre el crecimiento de plantas de tomate durante la etapa inicial de desarrollo, desde el trasplante hasta el inicio de la floración. Los resultados obtenidos demostraron que la respuesta de las plantas varía dependiendo del tipo de radiación UV y del tiempo de exposición aplicado durante la fase de plántula.

Se determinó que la radiación UV-A presento los efectos más favorables sobre el crecimiento de las plantas. El tratamiento A2 indujo la mayor altura de la plata, con un incremento aproximado del 6% respecto al tratamiento control, lo que sugiere que tiempos moderados de exposición a esta longitud de onda pueden favorecer el desarrollo vegetativo del cultivo.

Respecto a la comparación de características morfológicas entre tratamientos, se observó que las variables de crecimiento evaluadas, como altura de planta, numero de hojas, diámetro de tallo y numero de racimos, mostraron respuestas diferenciadas dependiendo del tipo de radiación aplicada. En general, los tratamientos con radiación UV-B mantuvieron valores similares en la mayoría de las variables evaluadas.

Por otro lado, la radiación UV-C presento afectos negativos en el crecimiento de las plantas. Conforme aumento el tiempo de exposición, se observó una reducción en alguna variable de desarrollo, principalmente en la altura de las plantas. El tratamiento C2 mostro la mayor disminución, lo que indica que esa longitud de onda puede generar estrés en las plantas cuando se aplica en etapas tempranas.

En general, los resultados obtenidos indican que el efecto de la radiación ultravioleta sobre el crecimiento de tomate depende tanto la longitud de onda como el tiempo de exposición. Mientras que la radiación UV-A puede favorecer el crecimiento vegetativo.

7. LITERATURA CITADA

Arul, J. (2007). Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit: Modification of fruit surface and changes in fungal colonization. *Postharvest Biology and Technology*, 44(2), 146–153.

Barta, C., Kálai, T., Hideg, K., Vass, I., & Hideg, É. (2004). Differences in the ROS-generating efficacy of various ultraviolet wavelengths in detached spinach leaves. *Functional Plant Biology*, 31(1), 23–28.

Bita, C. E., & Gerats, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in Plant Science*, 4, 273.

Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robinson, S. A., Ballaré, C. L., Flint, S. D., & Caldwell, M. M. (2015). Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: Effects on terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 14(1), 88–107.

Camejo, D., Jiménez, A., Alarcón, J. J., & Sevilla, F. (2012). High temperature stress and oxidative damage in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Plant Physiology*, 169(1), 100–106.

Chen, Z., Dong, Y., & Huang, X. (2022). Plant responses to UV-B radiation: Signaling, acclimation and stress tolerance. *Stress Biology*, 2(1), 51.

Darras, A. I., Tsirogiannis, I., & Chorianopoulou, S. (2020). Low doses of UV-C irradiation affect growth, fruit yield and photosynthetic activity of tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 267, 109357.

Del Amor, F. M., Katerji, N., & Fernández-García, N. (2021). Smart high-yield tomato cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1239594.

Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, 28(1), 4–13.

Dyshlyuk, L., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Pavsky, V., & Chaplygina, T. (2020). The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato. *Heliyon*, 6(1), e03288.

Escobar-Hernández, D. I., González-García, Y., López-Barbosa, L. A., & Juárez-Maldonado, A. (2024). Specific wavelengths modify the antioxidant system of tomato and cucumber. *Agricultural Sciences*, 15(2), 65–78.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *FAOSTAT: Crops and livestock products.*

García, M., López, R., & Sánchez, A. (2023). UV-A radiation stimulates tolerance against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in tomato plants. *Horticulturae*, 9(4), 499.

Gerszberg, A., & Hnatuszko-Konka, K. (2017). Tomato tolerance to abiotic stress: A review of most important physiological and genetic aspects. *Plant Growth Regulation*, 83(2), 175–198.

Gil, S. (2014). Ondas de calor en el suelo: Aplicación de diferencias finitas. *Latin-American Journal of Physics Education*, 8(2), 790–796.

González-Celedon, D. F., Rojas, H. C., & Martínez, J. E. (2011). Enfermedades del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en el sur de Tamaulipas. *Acta Universitaria*, 21(1), 21–28.

Hidalgo, G., Rodríguez, R., & Hernández, M. (2022). Effect of UV-C treatments on antioxidant activity and postharvest quality of tomato fruits. *Journal of Food Quality*, 2022, 1–9.

Hollósy, F. (2002). Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron*, 33(2), 179–197.

Jansen, M. A. K., Gaba, V., & Greenberg, B. M. (1998). Higher plants and UV-B radiation: Balancing damage, repair and acclimation. *Trends in Plant Science*, 3(4), 131–135.

Jenkins, G. I. (2017). Photomorphogenic responses to ultraviolet-B light. *Plant, Cell & Environment*, 40(11), 2544–2557.

Juárez-Maldonado, A., González-García, Y., Escobar-Hernández, D. I., et al. (2023). UV-A radiation stimulates tolerance against *Fusarium oxysporum* in tomato plants. *Horticulturae*, 9(4), 499.

Kataria, S., Jain, K., & Guruprasad, K. N. (2007). UV-B induced changes in antioxidant enzymes and their isoforms in cucumber (*Cucumis sativus* L.) cotyledons. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics*, 44(1), 31–37.

Katerji, N., Del Amor, F. M., & Arruebarrena, B. (2018). Ultraviolet-A radiation stimulates growth of indoor cultivated tomato seedlings. *Journal of Horticultural Science*, 93(4), 412–419.

Kusuma, P., Bugbee, B., & Kim, H. (2020). Optimizing spectral quality for greenhouse crops. *Scientia Horticulturae*, 268, 109372.

Liu, X., Wang, Y., & Chen, J. (2020). UV lighting in horticulture: A sustainable tool for improving production quality and food safety. *Horticulturae*, 7(1), 9.

Liu, Z., Li, S., & Li, M. (2023). UV-A radiation stimulates tolerance against *Fusarium wilt* in tomato through salicylic acid and jasmonic acid mediated defense pathways. *Journal of Functional Foods*, 103, 105470.

López-Pozos, R., Pérez-Flores, L. J., & Pineda-Pineda, M. (2016). Aplicación de radiación UV-C para el control de hongos en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su efecto en la calidad del fruto. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 22(3), 145–154.

Lycoskoufis, I., Nikolidakis, S. A., & Voyiatzis, D. G. (2022). Ultraviolet radiation management in greenhouses to improve yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa*). *Agriculture*, 12(10), 1620.

Moya, C., Torres, C., & Ramírez, L. (2015). Condiciones ambientales óptimas para el cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 115–124.

OIRSA. (2019). *Manual Tuta absoluta* (Versión 1.2). Organización Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria.

Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato. *Genetic Improvement of Solanaceous Crops*, 2, 1–27.

Qian, M., Rosenqvist, E., Flygare, A. M., Kalbina, I., Teng, Y., & Jansen, M. A. K. (2020). UV-A light induces a robust and dwarfed phenotype in cucumber plants without affecting fruit yield. *Scientia Horticulturae*, 263, 109110.

Robson, T. M., Klem, K., Urban, O., & Jansen, M. A. K. (2015). Re-interpreting plant morphological responses to UV-B radiation. *Plant, Cell & Environment*, 38(5), 856–866.

Sadat Shahzaidi, Z., Hesami Tackallou, S., Amjad, L., Zali, H., & Iranbakhsh, A. (2025). Analysis of UV radiation-induced changes: Effects on morpho-physiological and biochemical traits of plants. *BMC Plant Biology*, 25, 1318.

Schreiner, M., Mewis, I., Huyskens-Keil, S., Jansen, M. A. K., Zrenner, R., Winkler, J. B., O'Brien, N., & Krumbein, A. (2012). UV-B-induced secondary plant metabolites: Potential benefits for plant and human health. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 31(3), 229–240.

Verdaguer, D., Jansen, M. A. K., Llorens, L., Morales, L. O., & Neugart, S. (2017). UV-A radiation effects on higher plants: Exploring the known unknown. *Plant Science*, 255, 72–81.

Vásquez, H., Ouhibi, C., Forges, M., Lizzi, Y., Urban, L., & Aarrouf, J. (2020). Hormetic doses of UV-C light decrease the susceptibility of tomato plants to *Botrytis cinerea*. *Journal of Phytopathology*, 168(9), 524–532.

Zhang, L., Li, H., & Zhao, J. (2019). Effects of ultraviolet-C treatment on growth and mycotoxin production by *Alternaria* strains isolated from tomato fruits. *Food Control*, 107, 106742.

Zhu, X., Zhang, M., & Gao, J. (2023). Preharvest UV-B treatment improves strawberry quality and extends shelf life. *Horticulturae*, 9(2), 211.