

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Efectos de la Radiación Ultravioleta - A en Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Sometidas a Estrés Hídrico

Por:

JORGE LUIS MENDEZ HERNANDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Efectos de la Radiación Ultravioleta - A en Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum*
L.) Sometidas a Estrés Hídrico

Por.

JORGE LUIS MENDEZ HERNANDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



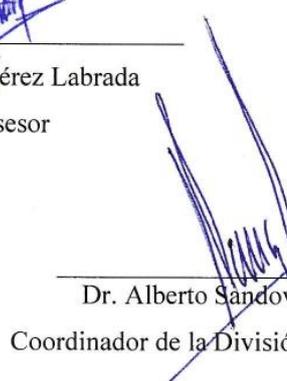
M.C. Diego Iván Escobar Hernández
Asesor Principal Externo



Dr. Fabián Pérez Labrada
Coasesor



Dr. Alonso Méndez López
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2023



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



Jorge Luis Méndez Hernández

Asesor principal



Dr. Antonio Juárez Maldonado

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor de tesis, **Dr. Antonio Juárez Maldonado**, por su orientación, paciencia y valiosas sugerencias a lo largo de todo el proceso de investigación. Su conocimiento y dedicación han sido fundamentales para dar forma a este trabajo y llevarlo a buen término.

Agradezco sinceramente al **MC. Diego Iván Escobar Hernández** quien compartió su sabiduría y experiencia, brindándome valiosas ideas que enriquecieron el contenido de este estudio. Su apoyo académico ha sido invaluable.

Además, quiero expresar mi gratitud a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por su calidad docente, sus instalaciones y servicios prestados en el transcurso de mi formación profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos por su constante apoyo emocional durante este arduo proceso. Su aliento y comprensión fueron fundamentales para superar los desafíos y mantenerme enfocado en la culminación de este trabajo.

A todas estas personas, gracias por ser parte fundamental de este viaje académico. Este logro no solo es mío, sino también de cada uno de ustedes que contribuyeron de alguna manera.

DEDICATORIAS

A todas las personas importantes en mi vida, especialmente a mi familia, padres Gorgonio Mendez Ramírez, Zoila Hernandez Ramírez y hermanos, a mi esposa Juana González Bravo y a mi hijo Liam Ismael, gracias a todos ustedes he podido formarme y ser una mejor persona, estoy muy orgulloso de ustedes y son mi principal inspiración a seguir creciendo.

A mis amigos, a todas las personas que se cruzaron en el trayecto y con las cuales pude compartir conocimientos y buenos momentos

Índice General

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIAS	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.2.1 Objetivos específicos	2
1.2 Hipótesis	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Radiación UV en las plantas.....	3
2.2 Efectos de la radiación UV-B en las plantas	4
2.3 Efectos de la radiación UV-A en las plantas	5
2.4 Efectos del estrés abiótico en plantas	6
2.5 Efecto del déficit hídrico en plantas de tomates	7
III. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1 Establecimiento del experimento	8
3.2 Material vegetal	8
3.3 Características de las luminarias LED.....	8
3.4 Desarrollo del cultivo	8
3.5 Tratamientos	9
3.6 Variables agronómicas	9
3.7 Variables bioquímicas	9
3.7.1 Compuestos fenólicos	10
3.7.2 Flavonoides	10
3.7.3 Ácido ascórbico	11
3.7.4 Pigmentos fotosintéticos	11

3.8	Variables fisiológicas	12
3.9	Análisis estadístico	12
IV.	RESULTADOS	13
V.	DISCUSIÓN	21
VI.	CONCLUSIONES	23
VII.	LITERATURA CITADA	24

Índice de Figuras

Figura 1. Efecto de la radiación UV-A en la altura (A), diámetro de tallo (B), número de hoja (C), número de racimo (D), peso de biomasa fresca (E), peso de biomasa seca (F), peso seco de la raíz (G), longitud de raíz (H), de plantas de tomate.

..... 15

Figura 2. Efecto de la radiación UV-A en clorofila a, b y total (A), vitamina C hoja (B), vitamina C fruto (C), flavonoides hoja (D), flavonoides fruto (E), fenoles hoja (F), fenoles fruto (G) de plantas de tomate.

.....16-17

Figura 3. Efecto de la radiación UV-A en número total de frutos grandes (A), peso total de frutos grandes (B), número total de frutos chicos (C), peso total de frutos chicos (D), número total de frutos (E), peso total de fruto (F), de plantas de tomate.

.....17

Figura 4. Efecto de la radiación UV-A en la fotosíntesis neta (A), transpiración (B), conductancia estomática (C), concentración intracelular (D), eficiencia del uso del agua (E), en plantas de tomate.

.....19

Figura 5. Efecto de la radiación UV-A en el potencial hídrico por la mañana (A), potencial hídrico por la tarde (B), de plantas de tomate.

.....20

RESUMEN

La radiación UV afecta a las plantas, dependiendo de la intensidad, tiempo de exposición, así como del tipo de planta. Estudios demuestran que este tipo de radiación es utilizado como regulador de crecimiento en algunos cultivos. En este estudio se utilizó la radiación UV-A para evaluar sus efectos en las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se utilizó lámparas LED por sus siglas en inglés "Light Emitting Diode", que significa: Diodo Emisor de Luz, con radiación UV-A a 385 nm durante 2 horas. Los tratamientos utilizados fueron radiación UV-A (UV), radiación UV-A más déficit hídrico (UV+TS), déficit hídrico (TS), más el control (T0) el cual no se irradia ni se le suspendió el riego. Se observó una variación en la altura, con un incremento del 0.4 % en respuesta al tratamiento con radiación ultravioleta (UV). De manera similar, se registró un aumento en los niveles de pigmentos fotosintéticos, especialmente en las clorofilas, que presentaron un incremento notable en el rango del 8 % al 9.2 %. Además, se evidenció un aumento significativo en los contenidos de vitamina C tanto en hojas como en frutos, con variaciones que oscilaron entre el 3.4 % y el 75.1 %. De igual manera, se observó un aumento del 16.3 % en la elevación de fenoles en el follaje de las plantas estudiadas, y un incremento en la capacidad de beta-caroteno en follaje, con un rango que osciló entre el 12.1 % y el 0.7 %. El potencial hídrico se ve afectado en los tratamientos UV y UV+TS, indicó una disminución en el potencial hídrico. Por lo tanto, la radiación afectó de manera notoria en los pigmentos fotosintéticos y fenoles de follaje.

Palabras clave: antioxidantes, pigmentos fotosintéticos, estrés, UV.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se busca la manera de hacer eficiente la producción de los cultivos. Debido a la alta demanda alimenticia y a los diversos problemas que se presentan en la producción agrícola ocasionados, por estrés biótico y abiótico (sequía y temperaturas extremas). Estos factores han sido exacerbados por las alteraciones climáticas, conduciendo a una elevada contaminación ambiental (incluido los recursos hídricos), provocando así el aumento del calentamiento global, llevando a escasez de agua para el uso agrícola (Santibáñez., 2019).

Datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), demuestran que la agricultura es la más afectada debido a la escasez del agua ya que representa el 70 % de la extracción del agua y hasta un 95 % en países de desarrollo. Debido a ello se busca la forma de hacer eficiente el uso del agua en la producción, y de la misma manera buscar tolerancia al déficit hídrico en plantas (Biológica *et al.*, 2018).

El agua subterránea representa el 30 % de agua dulce para uso agrícola y anualmente crece un 2.2 % a nivel mundial. La contaminación del agua es una problemática global que va en crecimiento, afectando la salud humana, la alimentación y el desarrollo económico. La agricultura produce más del 95 % de la alimentación mundial para una población humana aproximadamente 7,700 millones (FAO, 2022). Debido a la sobreexplotación agrícola y a la deforestación, la sequía se vuelve recurrente, puede durar desde semanas a años, provocando escasez de agua y alimentos, afectando la salud humana y servicios ambientales (GAR, 2021). El estrés hídrico de las plantas es ocasionado cuando la transpiración excede la cantidad de agua absorbida por las raíces, las consecuencias de este fenómeno en las plantas se ven reflejado en la reducción del crecimiento, disminución de frutos y aumento a la susceptibilidad a plagas y enfermedades, provocando un declive en la producción agrícola y en la calidad de las cosechas (Spring Water, 2019).

En la agricultura moderna se busca un mejor cuidado del medio ambiente, una máxima producción, calidad nutricional de frutos y por ende una manera eficiente para que las

plantas toleran el estrés, por dicha razón se estudia diferentes alternativas para un máximo rendimiento; una alternativa promisorio es la radiación ultravioleta (UV) que puede ser clasificada como UV-A (315 a 400 nanómetros, nm), UV-B (280 a 315 nm), UV-C (100 a 280 nm) (Thélier *et al.*, 2016).

Desde años anteriores, se ha considerado la radiación UV como una oportunidad para influir de manera artificial en el rendimiento de semillas y plántulas, así como en el crecimiento, floración y la producción de frutos (Hiramatsu *et al.*, 2017).

Los investigadores han optado por la utilización de la radiación UV, debido a efectos benéficos en el desarrollo y crecimiento de las plantas (Kang *et al.*, 2018). Por ejemplo, la exposición de plantas a radiación UV-A diariamente por 1 hora a 368 nm (con lámparas de 20W T12) colocadas 15 cm por encima de las plantas evidenció un incremento en el rendimiento de frutos totales de tomates (Mariz *et al.*, 2019). Los mismos autores señalan un aumento de fenoles y flavonoides en los frutos de tomate, después de 30 días de suplementación. Parámetros de relevancia en la producción actual, ya que estos antioxidantes son moléculas que ayudan a reducir la oxidación de las células, evitando así el deterioro o envejecimiento. De igual manera se ha observado que la exposición de las plantas a radiación UV-A aumenta la cantidad de antioxidantes, confiriendo resistencia al estrés hídrico al reducir el envejecimiento y deterioro de las plantas (Holub *et al.*, 2022).

El cultivo de tomate es una de las hortalizas más importantes en el país, esto promueve el interés de mejorar la producción y calidad, por otra parte, el cultivo de tomate se produce en diversas condiciones, lo que ha llevado a la necesidad de investigar prácticas para diversos entornos, su peso agronómico y económico en el país lo hace de suma importancia, además es cultivado debido a su contenido nutricional y de antioxidantes (SIAP, 2021). Se ha demostrado que la suplementación de radiación UV a través de barras LEDs con longitudes de ondas específicas pueden influir en cambios agronómicos y bioquímicos de los cultivos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar el impacto de la radiación UV-A (385 nm) en plantas de tomate sometidas a estrés hídrico, a través de los cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Determinar la cantidad de antioxidantes, y su efecto fisicoquímico en las plantas de tomate.
2. Evaluar los efectos de la radiación UV-A en los parámetros agronómicos de las plantas de tomate.
3. Evaluar los efectos del estrés hídrico en las plantas de tomate

1.2 Hipótesis

Aplicar radiación UV-A (385 nm) a plantas de tomate, induce modificaciones genéticas, morfológicas y fisiológicas, que provocan que la planta genere tolerancia al déficit hídrico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Radiación UV en las plantas

La radiación (UV) constituye a una variedad de radiación solar con longitudes de onda inferiores a la de la luz visible. Es producido por el Sol y también puede generarse de forma artificial, en barras LEDs, lámparas fluorescentes, luces de vapor de mercurio. La radiación UV se clasifica en tres grupos según la longitud de onda (Verdaguer *et al.*, 2017).

La longitud de onda de la radiación UV-A es la mayor entre los tres tipos, que va desde 315 a 400 nm y en su mayoría llega a la superficie de la Tierra. Los rayos UV-A son relativamente constantes a lo largo del día y pueden penetrar a través de las nubes (Huché *et al.*, 2016).

Los rayos UV-B presentan una longitud de onda va desde los 280 a 315 nm, son los responsables de las quemaduras solares. Son más intensos que los rayos UV-A, los rayos UV-B son inofensivos en días nublados (Dotto *et al.*, 2017).

La radiación UV-C tiene una longitud de onda más corta que los anteriores, que van desde los 100 a 280 nm y son el tipo de radiación UV más peligroso. Sin embargo, la atmósfera se encarga de absorber la mayor cantidad de la radiación UV-C por lo que no es consistente en la superficie de la tierra de manera natural (Huché *et al.*, 2016).

La radiación UV puede tener efectos negativos o positivos en las plantas, según la intensidad, la duración que se exponga y los factores ambientales (intensidad de luz, temperatura, humedad y PH). La aplicación de radiación UV puede ocasionar daños tanto como el ADN, ARN y estructuras celulares, provocando que las plantas puedan tener mutaciones genéticas alterando de algún modo el progreso de las plantas (Liu *et al.*, 2017). De igual manera; puede reducir la eficiencia de la clorofila y considerando que este pigmento es responsable de obtener energía lumínica y transformarla en energía química, la fotosíntesis es afectada mermada considerablemente. Impacta negativamente el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas (Verdaguer *et al.*, 2017).

Por otra parte, la radiación UV puede influir positivamente en el desarrollo de las plantas. Puede conducir a una mayor ramificación y longitud, lo que da como resultado formas de

plantas más robustas y tupidas. Estas características pueden ser muy ventajosas en la agricultura, si es lo que se desea obtener (Qian *et al.*, 2020). Por otro lado, la exposición controlada de radiación UV puede producir una mayor cantidad de sustancias secundarias, como flavonoides y compuestos fenólicos, que actúan como protectores solares y antioxidantes. Mas sin embargo una radiación excesiva puede comprometer el bienestar de la planta (Sasi *et al.*, 2022).

Así mismo se han encontrado datos donde se demuestra que la radiación UV tiene efectos fungicidas y bactericidas, lo cual puede ayudar a controlar el crecimiento de ciertos patógenos tanto en plantas como en frutos, reduciendo el índice de afectaciones por enfermedades. La radiación ultravioleta a veces se usa en ambientes controlados, como invernaderos, para minimizar la propagación de enfermedades de las plantas (Tarek *et al.*, 2016).

2.2 Efectos de la radiación UV-B en las plantas

Liu *et al.* (2017) mencionan que los rayos UV-B (311 nm) de alta intensidad modifican el ADN de las plantas de la misma manera que la radiación UV-C (160 nm), dañan macromoléculas como proteínas y ácidos nucleicos y de esta manera afecta el bienestar de las plantas. Si las plantas son irradiadas por un tiempo prolongado se ve afectado en el crecimiento y desarrollo, afectando la elongación de tallos, reduciendo el tamaño de las hojas y la ramificación, de esa manera puede verse afectado la productividad de la planta (Rodríguez *et al.*, 2019), por esta razón las plantas cultivadas en luz enriquecida con UV-B muestra una disminución significativa de 35 % para la materia seca de la hoja (Qian *et al.*, 2020).

La radiación UV-B (311-314 nm) genera estrés oxidativo en las plantas, lo que puede resultar en daño celular y alteraciones en los procesos metabólicos lo cual limita el transporte de contenido de proteína soluble en hojas. La exposición excesiva a radiación UV-B puede reducir el contenido de la glucosa y la fructosa en las plantas debido al estrés oxidativo (Liu *et al.*, 2017). Este tipo de radiación en exceso afecta en el grosor de las hojas mermando negativamente el funcionamiento de los pigmentos fotosintéticos (Qian *et al.*, 2020).

La radiación UV-B (365nm) puede aumentar la tasa de fotosíntesis en Quinoa (*Chenopodium quinoa*), lo que resulta en una mayor producción de energía y biomasa (Sonika *et al.*, 2017)

También induce una mayor producción de compuestos protectores en las plantas, como los flavonoides y los polifenoles. Estos compuestos actúan como una especie de capa protectora de los rayos solares y ayudan a proteger a las plantas contra UV-B. Además, los flavonoides tienen propiedades antioxidantes que protegen a las plantas contra el estrés abiótico (Singh *et al.*, 2017).

La exposición controlada de radiación UV-B puede activar las respuestas de defensa en las plantas, mejorando su capacidad para resistir patógenos y enfermedades. La radiación afecta la morfología de las plantas, aumentando el grosor de las hojas, aumentando la ramificación y mejorando la calidad de los productos vegetales, como las frutas y las verduras (Liu *et al.*, 2017)

La radiación UV-B puede estimular algunas hormonas, como las auxinas y las giberelinas, encargadas de regular el crecimiento de las plantas. Estas hormonas pueden influir en la elongación de los tallos, la germinación de las semillas y la respuesta de las plantas al estrés ambiental, haciéndolas más tolerantes (Carrasco *et al.*, 2009).

2.3 Efectos de la radiación UV-A en las plantas

La radiación UV-A es la más larga en longitudes de onda en comparación a la radiación UV-B y UV-C. Al igual que las otras tiene efectos negativos y positivos esto depende de la genética de la planta, el tiempo de exposición y factores ambientales (Verdaguer *et al.*, 2017).

Una exposición prolongada a radiación UV-A puede dañar la eficiencia de la fotosíntesis, por fotoinhibición debido a un desequilibrio en la producción de energía haciendo que las plantas no puedan aprovecharla, la exposición excesiva también causa daños a pigmentos de las plantas, como la clorofila y carotenoides encargadas de dar coloración a las hojas y a frutos, de esta manera puede afectar de forma directa a la producción (He *et al.*, 2021).

Se ha observado que la radiación UV-A estimula el desarrollo de las plantas. Al promover la elongación de los tallos y la formación de hojas más grandes en algunas especies

vegetales, en el tomate, en área foliar se han encontrado datos que demuestran un aumento de un 22 % a un 31 % en longitud y de un 29 % a 33 % en biomasa total, esto en un ambiente controlado (Kang *et al.*, 2018). Debido al aumento de la biomasa por la inducción de UV-A el peso seco de brotes aumentó significativamente en un 17 % a 18 %, (Zhang *et al.*, 2020).

La radiación UV-A puede influir en la producción de antioxidantes en las plantas, como los fenoles y flavonoides. Los antioxidantes pueden desempeñar un papel de defensa ante estrés biótico y abiótico, como son: ataques de hongos, bacterias y nematodos, estrés hídrico y temperaturas extremas. Además, aumentó la firmeza del fruto de tomate (Mariz *et al.*, 2019).

Este tipo de radiación UV también aumentó notablemente el contenido máximo de clorofila, de esta manera las plantas son más eficientes al momento de llevar a cabo la fotosíntesis (He *et al.*, 2021). De igual manera la radiación UV-A puede activar pigmentos que están involucrados en la captura de la energía, como las clorofilas y los carotenoides, estos pigmentos pueden absorber la radiación UV-A y enviar la energía a los centros de reacción fotosintéticos, optimizando el proceso de fotosíntesis. Haciendo aumentar la producción de biomasa en algunas especies vegetales (Qian *et al.*, 2020) .

2.4 Efectos del estrés abiótico en plantas

Exponer excesivamente las plantas a estrés abiótico puede afectar negativamente a las plantas. Estos factores se refieren a las condiciones como la sequía, el exceso de sales en el suelo, temperaturas extremas, pocas horas luz, contaminación del aire o del suelo, y la presencia de metales pesados, entre otros. Los efectos del estrés abiótico en las plantas pueden afectar en el crecimiento, desarrollo y productividad (Méndez *et al.*, 2019).

El estrés abiótico puede provocar el cierre de las estomas (encargados del intercambio gaseoso, entrada de CO₂ y salida de O₂) interrumpiendo el suministro de energía y las reacciones catabólicas lo cual afecta el funcionamiento de la fotosíntesis. Lo que refleja una disminución de tamaño en las hojas, menor producción de brotes y raíces más débiles (Zhu, 2016). Debido a las alteraciones climáticas las plantas han desarrollado mecanismos que ayudan a tolerar los diferentes tipos de estrés, a nivel morfológico,

fisiológico y genético, abriendo paso a diversas investigaciones sobre estrés en plantas (Gong *et al.*, 2020).

2.5 Efecto del déficit hídrico en plantas de tomates

Las plantas están expuestas a diversos tipos de estrés ambiental durante su crecimiento y desarrollo, en condiciones naturales y agrícolas. Entre estos, el estrés hídrico es uno de los que más afecta a las plantaciones (Seleiman *et al.*, 2021).

La falta de agua puede inhibir el crecimiento de las plantas de tomate. El estrés hídrico reduce la turgencia de las células, lo que puede llevar a una disminución en el crecimiento de las plantas. Provocando una disminución en el largo y ancho de las hojas, en un estudio se mostró que el déficit hídrico disminuyó el peso de la biomasa un -36% en comparación con las plantas control (Medyouni *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021).

El estrés hídrico afecta el proceso fotosintético, al disminuir la cantidad de pigmentos en las hojas, los cuales son fundamentales para producir energía para la planta, causando un desarrollo ineficiente de hojas y raíces (Zhang *et al.*, 2018).

Durante un período de estrés hídrico; el contenido de agua disminuye en el suelo, reduciendo la movilidad y equilibrio iónico de los nutrientes, dificultando su absorción por medio de las raíces. Se encontró que el déficit hídrico disminuyó el contenido de minerales en hojas de la planta de tomate. El déficit hídrico redujo la concentración de K^+ y Ca^{2+} un 16% (Medyouni *et al.*, 2021).

III.MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Establecimiento del experimento

El experimento se realizó en el vivero perteneciente al Departamento de Botánica, en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Ubicado en las coordenadas N 25° 21' 01.22'' W 101° 01' 27.59'', en un invernadero tipo capilla, con cubierta de polietileno, ventilación natural, orientación norte-sur.

3.2 Material vegetal

Se utilizó semillas de tomate tipo saladette de la variedad Cid F1 (Harris Moran, Davis, CA, USA), de crecimiento indeterminado.

3.3 Características de las luminarias LED

Las luminarias LEDs (385 nm) tienen una dimensión de 225 cm de largo por 4cm de ancho SOLALED HORTICULTURA LILZBAL- S100WFRBPBC, entrada: 220v~ 0,065 – 0,424 A 100W 60 Hz.

3.4 Desarrollo del cultivo

El experimento se realizó mediante trasplante de plántulas, las plantas se desarrollaron en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno en bolsas de poliestireno de 20 L. Se utilizó como sustrato una mezcla de peat moss- perlita en proporción 1:1 con base a volumen. Para la aplicación del riego se utilizó un sistema de riego dirigido con solución Steiner (Steiner, 1961) de acuerdo con cada etapa fenológica. El pH de la solución nutritiva se ajustó con ácido sulfúrico concentrado a un valor de 6.5 para favorecer la absorción de nutrientes durante el ciclo del cultivo.

3.5 Tratamientos

1.- Radiación UV-A (UV), consistió en irradiar con LED UV-A (385 nm), a una distancia de 30 cm del dosel de la planta durante 2 horas, antes de realizar el trasplante.

2.- Radiación UV-A y TS (UV+TS), consistió en irradiar con LED UV-A (385 nm), a una distancia de 30 cm del dosel de la planta durante 2 horas, antes de realizar el trasplante. Posteriormente a los 52 días de haber realizado el trasplante se procedió a suspender el riego durante 24 horas, se repitió el procedimiento cada 15 días dos veces seguidas.

3.- Testigo con estrés hídrico (TS), a los 52 días de haber realizado el trasplante se procedió a suspender el riego durante 24 horas, se repitió el procedimiento cada 15 días dos veces seguidas.

4.- Testigo absoluto (T0), no se realizó intervención alguna esto para poder evaluar las diferencias de los otros tratamientos.

3.6 Variables agronómicas

Para la evaluación del crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate se realizaron mediciones, 119 días después del trasplante, debido a que las plantas ya han alcanzado su máximo crecimiento. Se midió altura de planta (flexómetro), diámetro de tallo (vernier digital) y se contabilizó el número de hojas y flores. Se llevó a cabo el conteo y la cuantificación del peso de frutos con una balanza digital (OHAUS Modelo Adventurer Pro). Se evaluó el peso fresco y seco de la biomasa (g), se utilizó una balanza digital.

3.7 Variables bioquímicas

65 días después del trasplante se tomaron muestras, tomando en cuenta que la planta se encuentra en la fase vegetativa, se centra en el crecimiento de tallos, hojas y raíz, las muestras fueron tomadas al azar, más jóvenes completamente expandida y se conservó a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el ultra congelador. Posteriormente las muestras se fraccionaron en vasos de plástico de 25 mL y se sometieron a liofilización y maceración para obtener un polvo fino

y realizar el análisis bioquímico. Se recolectaron frutos a los 70 días después del trasplante, para garantizar la maduración de los frutos; las muestras se recogieron en hielo y se almacenaron a una temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, se liofilizaron y maceraron hasta obtener un polvo fino para poder realizar los análisis.

3.7.1 Compuestos fenólicos

Se determinaron mediante el método del reactivo Folin-Ciocalteu descrito por (Yu & Dahlgren, 2000) con algunas modificaciones:

Se utilizaron 0.2 g de tejidos liofilizados y se extrajo 1 mL de solución agua: acetona (1:1). La mezcla se homogeneizó en vórtex durante 30 segundos y sonicó por 5 minutos. Las muestras se centrifugaron en una microcentrífuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R) a 12,500 RPM durante 10 minutos a 4°C . Para la cuantificación se tomó una alícuota de 0.05 mL, se añadió 0.2 mL de reactivo Folin-Ciocalteu, 0.5 ml de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20 % y 0.2 mL de agua destilada. Se homogeneizó en vórtex durante 30 segundos. Se sometió a baño maría a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos y se midió absorbancia a 750 nm en espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) con celdilla de cuarzo usando agua: acetona como blanco. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso seco ($\text{mg de EAG } 100\text{ g}^{-1}\text{ PS}$).

3.7.2 Flavonoides

Se llevó a cabo utilizando el método de Dowd adaptado por (Arvouet-Grand *et al.*, 1994).

Para la extracción de estos, se colocó 0.2 g de tejido liofilizado en un microtubo, donde se agregaron 2 mL de metanol de grado reactivo. Se homogeneizó en vórtex durante 30 segundos. La mezcla se filtra usando el papel Whatman No. 1. Para la cuantificación, se toma una alícuota de 1 mL del extracto, se agregaron 2 mL de solución metanólica de tricloruro de aluminio (AlCl_3) al 2 % en un microtubo y se dejó reposar durante 20 minutos en la oscuridad. Transcurrido en tiempo se tomó la lectura en un espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150). A una longitud de onda de 415 nm utilizando una celdilla de cuarzo. El contenido de flavonoides se expresó en miligramos equivalentes de quercetina por 100 g de peso seco ($\text{mg EQ } 100\text{ g}^{-1}\text{ PS}$).

3.7.3 Ácido ascórbico

El contenido de ácido ascórbico o vitamina C se determinó por el método de (Hung y Yen, 2002).

Se pesó 10 mg de tejido liofilizado de hojas y se colocó en un microtubo. Se agregó 1 mL de ácido metafosfórico al 1 % y se filtró con papel Whatman N° 1. Posteriormente se recolectó 0.2 mL de la extracción y se agregó 1.8 mL de 2-6 diclorofenolindofenol (50 μ M) y se dejó a temperatura ambiente por 15 segundos. La cuantificación se realizó por espectrofotometría (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a una longitud de onda de 515 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se utilizó ácido metafosfórico. Los valores se obtuvieron a partir de la curva de calibración preparada con ácido ascórbico (0-50 mg L⁻¹). Los resultados se expresaron en mg g⁻¹ de peso seco de ácido ascórbico.

3.7.4 Pigmentos fotosintéticos

Los contenidos de clorofilas A, B y Total (mg g⁻¹ DW) y β -caroteno (mg 100 g⁻¹ DW) se determinaron de acuerdo con el método de Nagata y Yamashita (1992). La muestra liofilizada (10 mg) se mezcló con 2 mL de hexano:acetona (3:2). Posteriormente, las muestras se sometieron a un baño ultrasónico durante 5 min. Luego se centrifugaron a 15.000 \times g durante 10 min a 4 °C. Se eliminó el sobrenadante y se leyó la absorbancia a 645 y 663 nm usando un espectrofotómetro. Los valores obtenidos se utilizaron en las Ecuaciones (1) y (2) para calcular el contenido de clorofila.

Para el β -caroteno, se midieron las absorbancias a 453, 505, 645 y 663 nm y los valores obtenidos se usaron en la Ecuación (4).

$$\text{Clorofila A} = 25.38 * A_{663} + 3.6A_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila B} = 30.38 * A_{645} - 6.5 * A_{663} \quad (2)$$

$$\text{Clorofila total} = 18.8 * A_{663} + 34.02 * A_{645} \quad (3)$$

$$\beta - \text{caroteno} = 0.216 * A_{663} - 122 * A_{645} - 0.304 * A_{505} + 0.452 * A_{453} \quad (4)$$

3.8 Variables fisiológicas

A los 22 y 52 días después del trasplante y después de aplicar estrés hídrico a los tratamientos indicados, se evaluó la tasa de asimilación neta de fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), el contenido de dióxido de carbono intracelular ($\text{ppm} \Delta \text{CO}_2$), transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O ms}^{-1}$) y eficiencia en el uso del agua en el desarrollo del cultivo, con un equipo analizador de fotosíntesis (3051C, Plant Photosynthesis Meter, Chincan Trading Co., Hangzhou, China). Estas evaluaciones se realizaron al mediodía, debido a que en este horario la luz es más intensa y las condiciones fotosintéticas son óptimas.

3.9 Análisis estadístico

Se consideró un diseño en cuadro latino de 4×4 . El análisis de varianza y prueba de medias de LSD de Fisher ($p \leq 0.05$) se realizó en el software Infostat (v2018).

IV. RESULTADOS

La aplicación de radiación UV en plantas de tomate modificó la altura, encontrando una menor altura en los tratamientos TS y UV+TS de -15.1% y -10.4% , con respecto a T0, por otra parte, el tratamiento UV muestra el aumento de 0.4% , respecto a T0 (Figura 1A).

La aplicación de iluminación UV tuvo un impacto positivo en el diámetro de tallo siendo el tratamiento UV un 6.2% mayor a T0, por otra parte, el tratamiento UV+TS obtuvo el menor diámetro de tallo de -2.4% con respecto al tratamiento T0 (Figura 1B).

La aplicación de la radiación UV afectó de forma positiva en la cantidad de hojas el tratamiento UV presentó 7% referente a T0, por otro lado, se encontró una reducción de hojas en TS y UV+TS de -23% y -13% , respecto a T0 (Figura 1C).

La aplicación de la radiación UV modificó el número de racimos en las plantas de tomate, hubo una reducción significativa en los tratamientos TS y UV+ TS un -32% y -14% , con relación a T0, por otra parte, el tratamiento UV se comportó estadísticamente igual al T0 (Figura 1D).

La aplicación de la radiación UV provocó cambios en el peso de la biomasa fresca, el tratamiento UV no fue diferente al T0, sin embargo, TS y UV+TS obtuvieron un menor peso de biomasa fresca de un -23% y 18.2% en comparación a T0 (Figura 1E).

El peso de biomasa seca muestra un aumento en el tratamiento UV un 8.4% respecto al tratamiento T0, por su parte; los tratamientos TS y UV+TS presentaron un -5.0% y 18.2% respectivamente, comparado con T0 (Figura 1F).

La radiación UV afectó de manera positiva el peso seco de la raíz de las plantas de tomate, en los tratamientos TS, UV y UV+TS se encontró un incremento del 3.3% , 3.3% y 57.8% , respectivamente en comparación al tratamiento T0 (Figura 1G).

La longitud de la raíz fue afectada notablemente por la radiación UV, los tratamientos TS y UV+TS un 19.2 % y 12.3 % mayor longitud, respectivamente, comparado con T0. Mientras que el tratamiento UV presentó -9.1% respecto de T0 (Figura 1H).

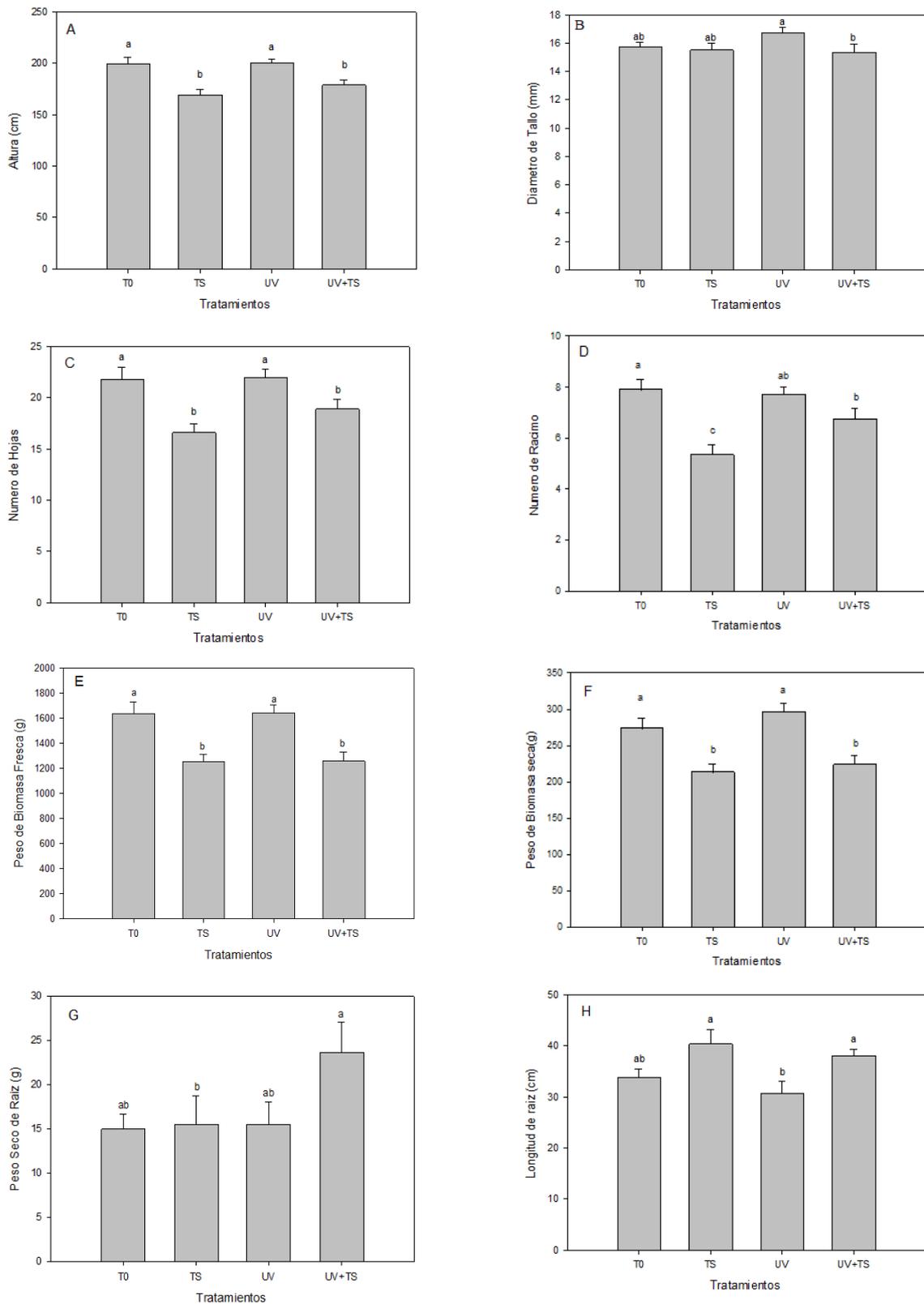


Figura 1. Efecto de la radiación UV-A en la altura (A), diámetro de tallo (B), número de hoja (C), número de racimo (D), peso de biomasa fresca (E), peso de biomasa seca (F), peso seco de la raíz (G), longitud de raíz (H), de plantas de tomate. T0: control; TS: control con estrés hídrico; UV: plantas irradiadas de UV-A, con una lámpara LED; UV+TS: plantas irradiadas de UV-A con una lámpara LED más estrés hídrico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n= 4 \pm$ error estándar.

La aplicación de la radiación UV detonó un aumento en la clorofila A, B y total en el tratamiento UV, la clorofila A aumentó 8 %, clorofila B 9 %, y clorofila total incrementó un 9.2 %, en relación al T0 (Figura 2A).

La aplicación de la radiación UV mostró una diferencia máxima de vitamina C en hoja de los tratamientos UV y UV+TS en 75.1 % y 0.9 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento T0. Mientras que el tratamiento TS redujo -21.6 % al comparar con T0 (Figura 2B).

La aplicación de la radiación UV la vitamina C en fruto bajo los tratamientos TS y UV hubo un aumento de 0.5 % y 3.4 % en comparación a T0. Mientras que en el tratamiento UV+TS un -4.7 %, respectivamente, en comparación de T0. Estadísticamente no hay diferencias entre los tratamientos (Figura 2C).

Debido a la aplicación de radiación UV el tratamiento TS mostró un aumento de flavonoides en las hojas de tomate un 35 % en comparación a T0. Por otro lado, el tratamiento UV y UV+TS presentó un 19 % y 6.3 % a T0, aunque estadísticamente ambos son iguales a T0 (Figura 2D).

Debido a la aplicación de radiación UV los flavonoides en frutos de tomate el tratamiento UV presenta una reducción del -6.7 % y los tratamientos TS y UV+TS un -9.6 % y -14.1 % en comparación a T0 (Figura 2E).

La radiación UV afectó de manera positiva los fenoles en las hojas de tomate, el tratamiento UV+TS mostró un aumento del 16.3 % comparado con T0. Por otro lado, los tratamientos TS y UV incrementaron un 5.1 % y 8.7 % respectivamente, respecto a T0 (Figura 2F).

La aplicación de radiación UV mostró una disminución de fenoles en frutos de tomate, en el tratamiento UV -16.8 % en comparación a T0, de igual forma estadísticamente no tienen diferencias entre los tratamientos (Figura 2G).

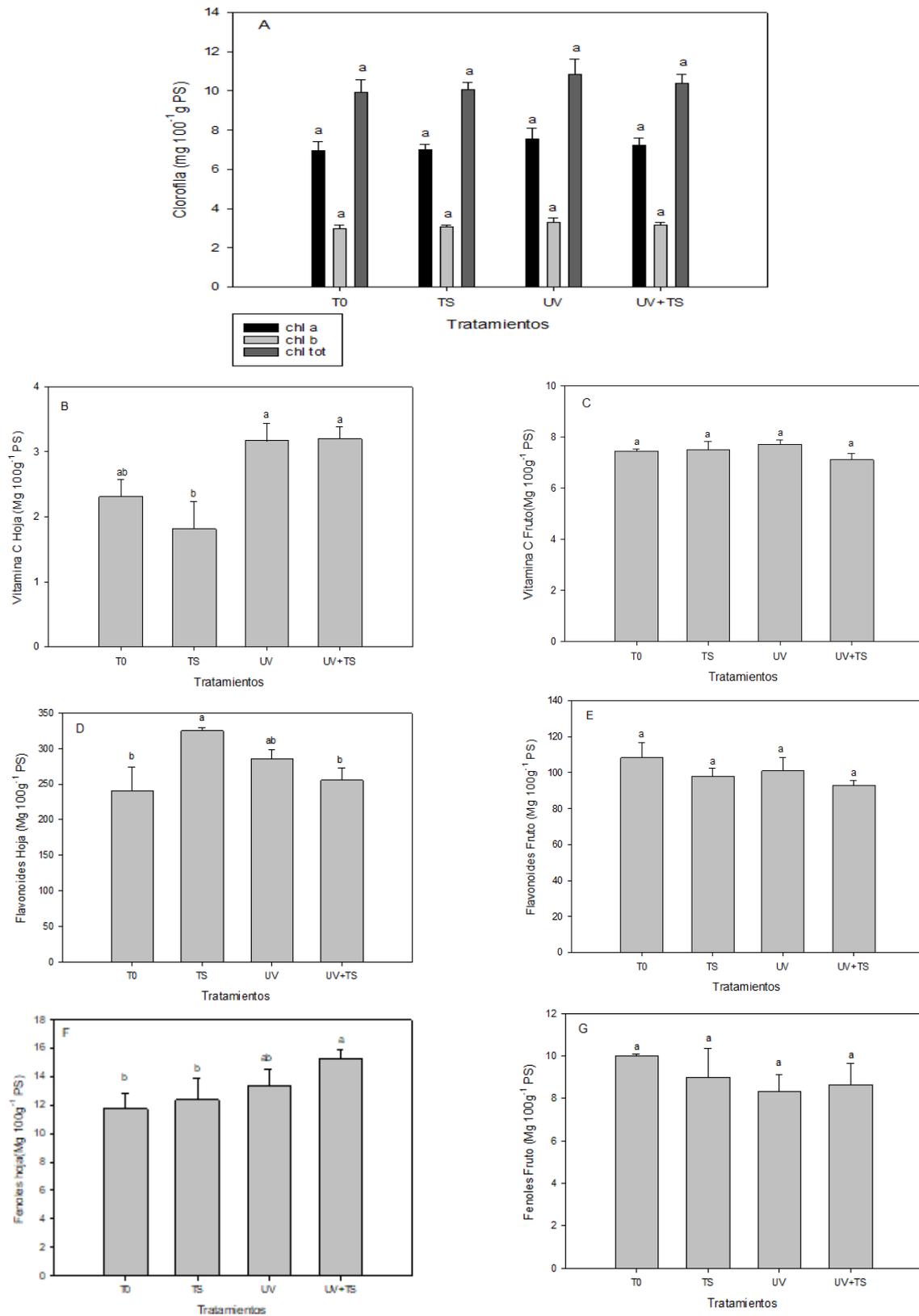


Figura 2. Efecto de la radiación UV-A en clorofila A, B y total (A), vitamina C hoja (B), vitamina c fruto (C), flavonoides hoja (D), flavonoides fruto (E), fenoles hoja (F), fenoles fruto (G) de plantas de tomate. T0: control; TS: control con estrés hídrico; UV: plantas irradiadas de UV-A, con una lámpara LED;

UV+TS: plantas irradiadas de UV-A con una lámpara LED más estrés hídrico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n= 4\pm$ error estándar.

Debido a la radiación UV el número de frutos presenta una disminución en los tratamientos TS y UV+TS un -39.6% y -31.4% en comparación a T0 (Figura 3A).

La radiación UV afectó de forma negativa en el peso de los frutos, en los tratamientos TS y UV+TS un -34.5% y -25.8% en comparación al tratamiento T0 (Figura 3B).

Debido a la radiación UV en el número total de frutos se aprecia un efecto negativo en los tratamientos TS, UV y UV+TS un -37% , -3% y -32.1% en comparación a T0 (Figura 3C).

Debido a la radiación UV se muestran una disminución en el peso de frutos en los tratamientos TS, UV y UV+TS un -34.8% , -7.5% y -18.9% , referente al tratamiento T0 (Figura 3D).

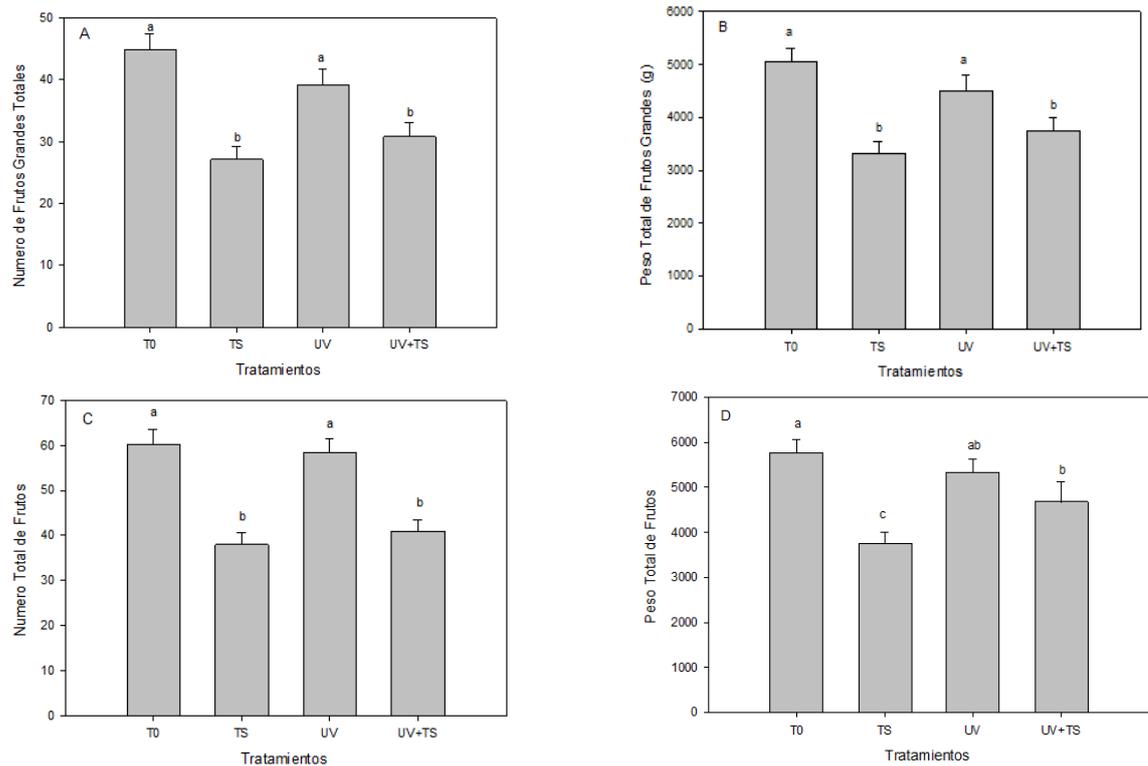


Figura 3. Efecto de la radiación UV-A en número total de frutos (A), peso total de frutos (B), número total de frutos (C), peso total de fruto (D), de plantas de tomate. T0: control; TS: control con estrés hídrico; UV: plantas irradiadas de UV-A, con una lámpara LED; UV+TS: plantas irradiadas de UV-A con una lámpara LED más estrés hídrico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n= 4\pm$ error estándar.

La fotosíntesis neta denota una diferenciación en los tratamientos TS y UV+TS un -2.8% y 1.1% en la primera fecha, -22.2% y -10.7% , respectivamente a los 52 ddt. No se encontró diferencia estadísticamente a T0 entre los tratamientos a los 22 ddt (Figura 4A).

A los 22 ddt la transpiración fue afectada de manera positiva en los tratamientos TS y UV+TS un 4.7% y 17.4% , respectivamente. Mientras que a los 52 ddt se encontró un incremento del, 2.4% y 5.9% , respecto al tratamiento T0 (Figura 4B).

En el caso de la conductancia estomática se documentó que el tratamiento UV+TS indujo un decremento del -33.3% y 0% en los otros tratamientos respecto a T0 a los 22 ddt. En cambio, a los 52 ddt se apreció un -33.3% en todos los tratamientos. Estadísticamente los demás tratamientos no muestran diferencias a T0 (Figura 4C).

Para la variable concentración intracelular los tratamientos mostraron diferencias ($p < 0.05$), donde TS y UV+TS presentaron una reducción de -2.7% y -3.7% , respectivamente, los 22 ddt. Los mismos tratamientos promovieron a los 52 ddt este parámetro un 14.3% y 4.2% , respectivamente, respecto a T0 (Figura 4D).

La eficiencia en el uso del agua se ve afectada de manera negativa en los tratamientos, TS y UV+TS un -18.3% y -18.9% , respectivamente a los 22 ddt y en un -23.7% y -12.2% en el segundo muestreo de datos, respecto a T0 (Figura 4E).

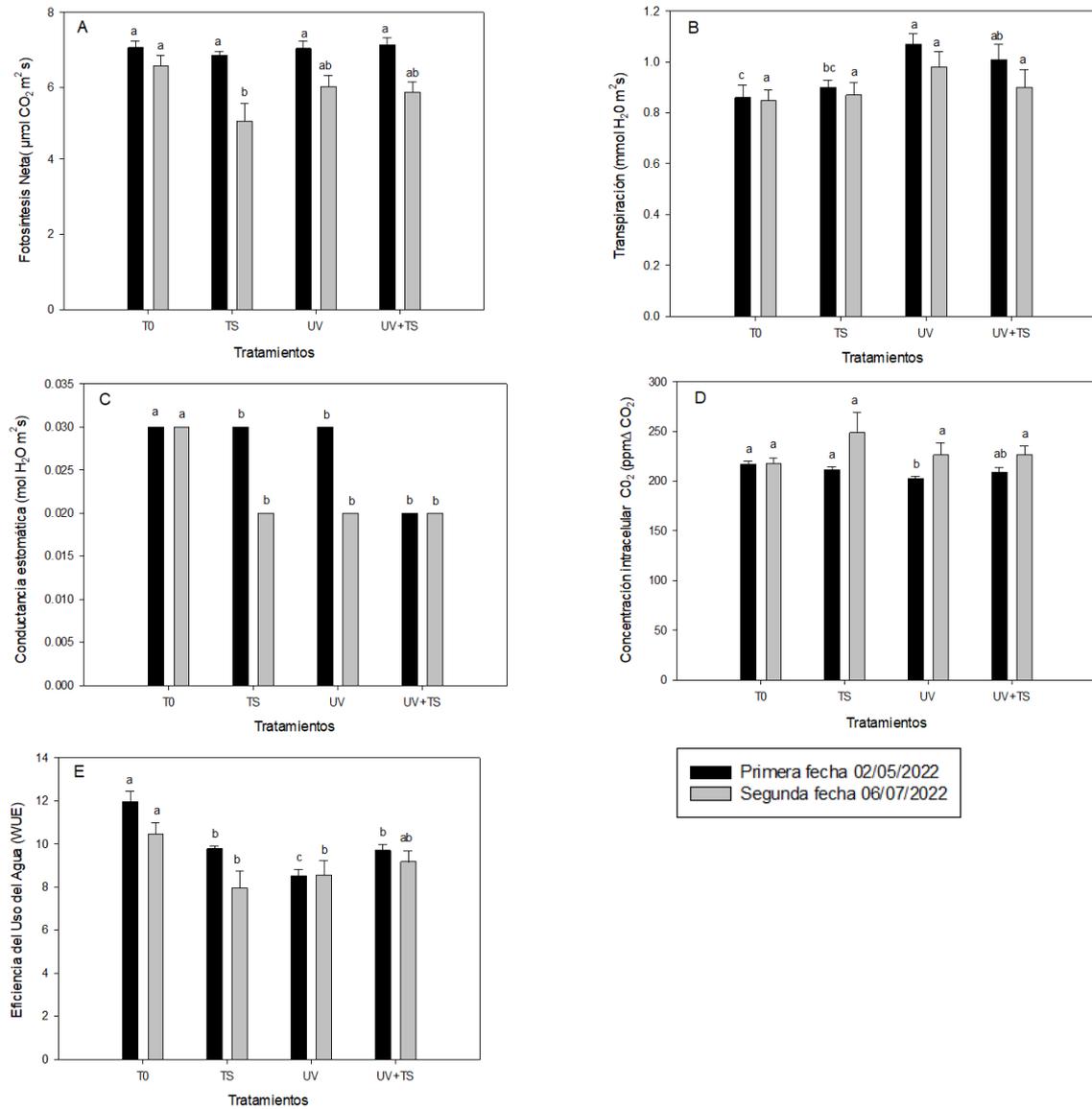


Figura 4. Efecto de la radiación UV-A en la fotosíntesis neta (A), transpiración (B), conductancia estomática (C), concentración intracelular (D), eficiencia del uso del agua (E), en plantas de tomate. T0: control; TS: control con estrés hídrico; UV: plantas irradiadas de UV-A, con una lámpara LED; UV+TS: plantas irradiadas de UV-A con una lámpara LED más estrés hídrico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n= 4 \pm$ error estándar.

El potencial hídrico se vio afectado debido a la aplicación de radiación UV-A, en los tratamientos TS y UV+TS un -3.1% y 9.2% , respectivamente, en los 22 ddt, y un -4.8% y -19.2% , 52 ddt, ambos tratamientos respecto al tratamiento T0 (Figura 5A).

El potencial hídrico muestra diferencia entre tratamientos TS y UV+TS, un 19.3 % y 8.0 % respectivamente a los 22 ddt y en 10.8 % y 21.3 % respectivamente a los 52 ddt referente a T0 (Figura 5B).

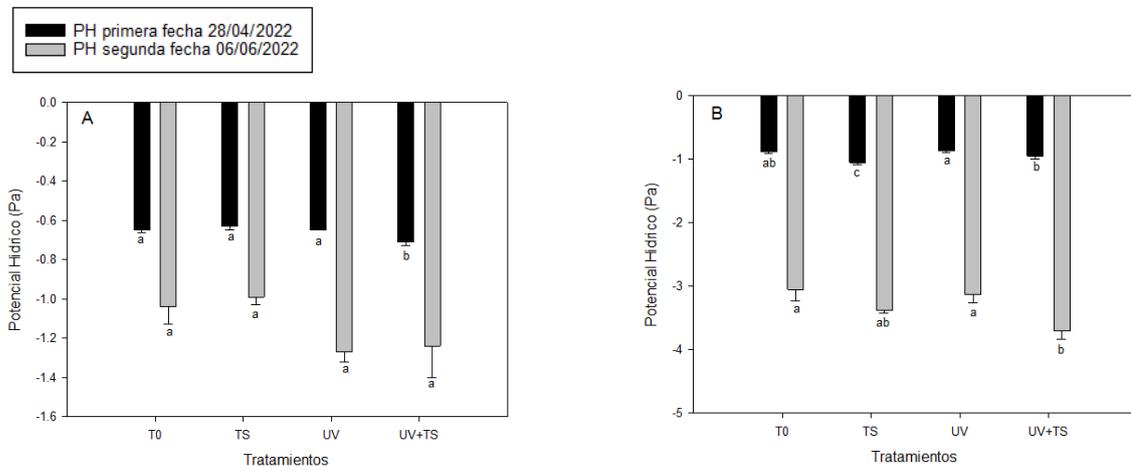


Figura 5. Efecto de la radiación UV-A en el potencial hídrico por la mañana (A), potencial hídrico por la tarde (B), de plantas de tomate. T0: control; TS: control con estrés hídrico; UV: plantas irradiadas de UV-A, con una lámpara LED; UV+TS: plantas irradiadas de UV-A con una lámpara LED más estrés hídrico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según LSD Fisher ($\alpha=0.05$). $n= 4\pm$ error estándar.

V. DISCUSIÓN

La radiación UV puede tener diversos efectos en las plantas, a nivel genético, celular, molecular, y fotosintéticos, el nivel de efecto dependerá de diversos factores, el tipo de planta, la intensidad lumínica, tiempo de exposición y distancia de exposición (Gao *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2017).

El uso de lámparas LEDs en este trabajo provocó diferencias en la altura de la planta, diámetro de tallo, números de hojas por planta, cantidad de racimos, biomasa fresca y seca (Figura 1). La radiación UV-A puede originar una serie de respuestas fotomorfogénicas en las plantas, ya que la luz ambiental es percibida por medio de los fotorreceptores que pueden estar asociados en el cloroplasto (Roeber *et al.*, 2021). Los cloroplastos están conformados por dos tipos de pigmentos; clorofila A y clorofila B, estos absorben la luz solar y la convierten en energía química en el proceso de fotosíntesis (Manoj *et al.*, 2021). La luz tiene múltiples efectos en las plantas también puede ser un señalizador e inducir efectos morfológicos en las plantas (Paponov *et al.*, 2020). Los fotorreceptores que perciben la radiación UV-A son las fototropinas (PHOT) (Yamori, 2019). La radiación ultravioleta UV-A es captada por fotorreceptores (criptocromos y fototropinas), que pueden activar la biosíntesis de metabolitos secundarios específicos como ácidos hidroxicinámicos, flavonoides (compuestos fenólicos de propano), antocianinas y clorofila (Al Murad *et al.*, 2021). El aumento de vitaminas C y fenoles en las hojas de tomate (Figura 2) en los tratamientos que se suministró radiación UV-A puede explicar la mejor respuesta al estrés hídrico ya que como antioxidantes reducen el daño provocado por Especies Reactivas del Oxígeno (ROS) dando lugar a un mejor desarrollo de las plantas. Además, la radiación UV-A afecta de manera positiva a las antocianinas, las antocianinas juegan un papel fotoprotector en las plantas. Aumenta la tolerancia al estrés abiótico, absorben luz amarilla, verde y longitudes de onda UV-A, en consecuencia, puede reducir el daño al fotosistema II, dando lugar a un óptimo desarrollo de la planta (Landi *et al.*, 2015). También se ha demostrado que la radiación UV-A puede estimular el crecimiento de las hojas debido que promueve la división celular, la expansión y el alargamiento, y aumenta el grosor del parénquima empalizada y de la

epidermis, aumentando el volumen de la biomasa (Verdaguer *et al.*, 2017), lo que concuerda con los datos obtenidos (Figura 1). La suplementación de radiación UV-A no mostró diferencias en el número total de frutos y peso total de frutos por plantas, en comparación al tratamiento T0 (Figura 3), más sin embargo los tratamientos UV+TS tiene mayor rendimiento que el tratamiento TS (Figura 2.- B y F) posiblemente está relacionado con el aumento de compuestos bioactivos, ya que estos compuestos pueden neutralizar el aumento de la ROS provocado por el estrés hídrico (González *et al.*, 2023)

Estudios anteriores sugirieron que los fotorreceptores de luz azul/UVA (es decir, criptocromo, fototropinas) regulan el proceso de expresión genéticas del cloroplasto, que median la transcripción general y la expresión de genética que codifican componentes de PSII, manteniendo en consecuencia un desarrollo fotosintético foliar normal (Petroutsos *et al.*, 2016). Debido al aumento de la biomasa, altura y mayor número de hojas, provocó un aumento de clorofila, el aumento de números de hojas ayuda a una mejor captación de luz, por ende, la fotosíntesis presenta una mejor eficiencia, dando lugar a mayor transpiración y un aumento en el uso del agua (Figura 4). Estudios han demostrado el aumento de clorofila y carotenoides en dos variedades de lechuga (*L. sativa*, cv. “New Red Fire” de hoja roja y “Two Star” de hoja verde) cuando se le aplica radiación UV-A (Lee *et al.*, 2022). El potencial hídrico presenta una menor disponibilidad de agua en los tratamientos que se aplicó estrés hídrico y radiación UV (Figura 5), sin embargo, no afectó en la altura y biomasa, esto puede estar relacionado con el cambio morfológico de la raíz como se observa en la (Figura 1G) ya que presenta una mayor elongación. O posiblemente las plantas desarrollaron la capacidad de acumular compuestos osmóticos (proline, azúcares solubles, glicina betaína), debido a la radiación UV-A. Los resultados obtenidos están más asociados a los efectos fotomorfogénicos, más que con estrés, (He *et al.*, 2021).

VI. CONCLUSIONES

La radiación UV-A (385 nm) aumentó la altura, biomasa y pigmentos fotosintéticos. El tratamiento que se le aplicó estrés hídrico afectó de manera negativa la biomasa y el rendimiento agronómico, así como la mayoría de los pigmentos fotosintéticos. La radiación UV-A redujo el daño ocasionado por estrés hídrico, aumenta los pigmentos fotosintéticos y antioxidantes. La aplicación de radiación UV-A no garantiza un mayor rendimiento agronómico, pero sí un aumento de antioxidantes con los cuales puede hacerse aplicaciones nutraceuticas.

VII. LITERATURA CITADA

- Al Murad, M., Razi, K., Jeong, B. R., Samy, P. M. A., & Muneer, S. (2021). Light emitting diodes (LEDs) as agricultural lighting: Impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. In *Sustainability* (Switzerland) (pp. 1–25). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
- Biologic, A., & Ljubljana, S. (2018). The interactions between UV radiation, drought and selenium in different buckwheat species. <https://doi.org/https://doi.org/10.14720/abs.62.1.15736>
- Carrasco-Ríos, L. (2009). Effect of ultraviolet-b radiation in plants. <http://www.scielo.cl/idesia.htm>
- Dotto, M., & Casati, P. (2017). Developmental reprogramming by UV-B radiation in plants. In *Plant Science* (pp. 96–101). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.09.006>
- FAO. (2022). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point. In *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>
- Santibáñez, Fernando. (2017). Los recursos hídricos de las Américas en los nuevos escenarios climáticos La visión desde el proyecto VACEA*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/11362/40194>
- Gao, M., He, R., Shi, R., Li, Y., Song, S., Zhang, Y., Su, W., & Liu, H. (2021). Combination of selenium and uva radiation affects growth and phytochemicals of broccoli microgreens. *Molecules*, 26(15). <https://doi.org/10.3390/molecules26154646>
- GAR. (2021). Global Assessment Report on disaster risk reduction 2021. UNITED NATIONS. <https://www.undrr.org/publication/gar-special-report-drought-2021>
- Gong, Z., Xiong, L., Shi, H., Yang, S., Herrera-Estrella, L. R., Xu, G., Chao, D. Y., Li, J., Wang, P. Y., Qin, F., Li, J., Ding, Y., Shi, Y., Wang, Y., Yang, Y., Guo, Y., &

- Zhu, J. K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. In State Key Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry, College of Biological Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; (pp. 635–674). Science in China Press. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1683-x>
- González-García, Y., Escobar-Hernández, D. I., Benavides-Mendoza, A., Morales-Díaz, A. B., Olivares-Sáenz, E., & Juárez-Maldonado, A. (2023). UV-A Radiation Stimulates Tolerance against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in Tomato Plants. *Horticulture*, *9*(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040499>
- He, R., Zhang, Y., Song, S., Su, W., Hao, Y., & Liu, H. (2021). UV-A and FR irradiation improves growth and nutritional properties of lettuce grown in an artificial light plant factory. *Food Chemistry*, *345*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128727>
- Holub, P., Klem, K., Veselá, B., Surá, K., & Urban, O. (2022). Interactive effects of UV radiation and water deficit on production characteristics in upland grassland and their estimation by proximity sensing. *Ecology and Evolution*, *12*(9). <https://doi.org/10.1002/ece3.9330>
- Huché-Thélier, L., Crespel, L., Gourrierc, J. Le, Morel, P., Sakr, S., & Leduc, N. (2016). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations-Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, *121*, 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009>
- Kang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., Zou, J., Yang, Q., & Li, T. (2018). Ultraviolet-a radiation stimulates growth of indoor cultivated tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings. *Hort Science*, *53*(10), 1429–1433. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13347-18>
- Landi, M., Tattini, M., & Gould, K. S. (2015). Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. *Environmental and Experimental Botany*, *119*, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.012>
- Lee, M., Kim, J., Oh, M. M., Lee, J. H., & Rajashekar, C. B. (2022). Effects of Supplemental UV-A LEDs on the Nutritional Quality of Lettuce: Accumulation of Protein and Other Essential Nutrients. *Horticulture*, *8*(8). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080680>
- Li, H., Zhang, X., Hou, X., & Du, T. (2021). Developmental and water deficit-induced changes in hydraulic properties and xylem anatomy of tomato fruit and pedicels.

Journal of Experimental Botany, 72(7), 2741–2756.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erab001>

- Liu, P., Li, Q., Li, Y., Yu, H., & Jiang, W. (2017). Effect of UV-B radiation treatments on growth, physiology and antioxidant systems of cucumber seedlings in artificial climate chamber. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(17), 181–186. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.024>
- Manoj, K. M., & Manekkathodi, A. (2021). Light's interaction with pigments in chloroplasts: The murburn perspective. *Journal of Photochemistry and Photobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2020.100015>
- Mariz-Ponte, N., Martins, S., Goncalves, A., Correia, C. M., Ribeiro, C., Dias, M. C., & Santos, C. (2019). The potential use of the UV-A and UV-B to improve tomato quality and preference for consumers. *Scientia Horticulture*, Vol. 246, 777–784. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.058>
- Medyouni, I., Zouaoui, R., Rubio, E., Serino, S., Ahmed, H. Ben, & Bertin, N. (2021). Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. *Food Science and Nutrition*, 9(4), 1949–1960. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2160>
- Méndez-Espinoza, C., & Vallejo Reyna, M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>
- Paponov, M., Kechasov, D., Lacey, J., Verheul, M. J., & Paponov, I. A. (2020). Supplemental Light-Emitting Diode Inter-Lighting Increases Tomato Fruit Growth Through Enhanced Photosynthetic Light Use Efficiency and Modulated Root Activity. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01656>
- Petroutsos, D., Tokutsu, R., Maruyama, S., Flori, S., Greiner, A., Magneschi, L., Cusant, L., Kottke, T., Mittag, M., Hegemann, P., Finazzi, G., & Minagawa, J. (2016). A blue-light photoreceptor mediates the feedback regulation of photosynthesis. *Nature*, 537(7621), 563–566. <https://doi.org/10.1038/nature19358>
- Qian, M., Rosenqvist, E., Flygare, A. M., Kalbina, I., Teng, Y., Jansen, M. A. K., & Strid, Å. (2020). UV-A light induces a robust and dwarfed phenotype in cucumber plants

- (*Cucumis sativus* L.) without affecting fruit yield. *Scientia Horticulture*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109110>
- Rodríguez-Calzada, T., Qian, M., Strid, Å., Neugart, S., Schreiner, M., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2019). Effect of UV-B radiation on morphology, phenolic compound production, gene expression, and subsequent drought stress responses in chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 134, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.025>
- Roeber, V. M., Bajaj, I., Rohde, M., Schmülling, T., & Cortleven, A. (2021). Light acts as a stressor and influences abiotic and biotic stress responses in plants. In *Plant Cell and Environment* (pp. 645–664). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/pce.13948>
- Sasi, S., Chandran P, S. M., R, P. G., Suresh, S., & Professor, A. (2022). Role Of Topical Flavonoids as Antioxidants to Preserve Healthy Skin-A Review., *Indo Am. J. P. Sci*, 04, 9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6482855>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Haleem Abdul-Wajid, H., & Leonardo Battaglia, M. (2021). plants Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Adverse Effects. Plants*, 2–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Singh, V. P., Singh, S., Prasad, M., & Parihar, P. (2017). UV-B Radiation: From Environmental Stressor to Regulator of Plant Growth. Defense Research Laboratory, DRDO, Tezpur, Assam, India. A Review <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119143611.ch5>
- Sonika Sharma, S. C. S. K. , J. J. , S. D. , M. G. V. and V. V. (2017). Efectos de la radiación ultravioleta b (UV-B) sobre diferentes variedades de Quinoa. *Cátedra de Fisiología Vegetal*. <https://doi.org/https://doi.org/10.31055/1851.2372.v51.n4.16353>
- Spring Water. (2019). Current and Future Water Scarcity and Stress. In *Springer Water: Vol. chapter 2* (pp. 13–25). Springer Nature. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-03186-2_2

- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Tarek, A. R., Rasco, B. A., & Sablani, S. S. (2016). Ultraviolet-C Light Sanitization of English Cucumber (*Cucumis sativus*) Packaged in Polyethylene Film. *Journal of Food Science*, 81(6), E1419–E1430. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13314>
- 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. In *Plant Science* (pp. 72–81). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.014>
- Yamori, W. (2019). Photosynthesis and respiration. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition* (pp. 197–206). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00012-1>
- Yu, Z., & Dahlgren, R. A. (2000). Evaluation of methods for measuring polyphenols in conifer foliage. In *Journal of Chemical Ecology*. Department of Land, Air and Water Resources, One Shields Avenue University of California. (Vol. 26, Issue 9).
- Zhang, Y., Kaiser, E., Zhang, Y., Zou, J., Bian, Z., Yang, Q., & Li, T. (2020). UVA radiation promotes tomato growth through morphological adaptation leading to increased light interception. *Environmental and Experimental Botany*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104073>
- Zhang, Y., Shi, Y., Gong, H. jun, ZHAO, H. liang, LI, H. li, HU, Y. hong, & WANG, Y. chao. (2018). Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10), 2151–2159. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62038-6)
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. In *Shanghai Center for Plant Stress Biology and Center for Excellence in Molecular Plant Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201602, China Department of Horticulture and Landscape Architecture, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA* (pp. 313–324). Cell Press. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>

