

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efecto de la Irradiación UV-B y UV-C Aplicada a la Semilla Sobre la Morfología y
Composición Química Foliar de *Solanum lycopersicum* L.

Por

JUAN BERNARDO DÍAZ ARMAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efecto de la Irradiación UV-B y UV-C Aplicada a la Semilla Sobre la Morfología y
Composición Química Foliar de *Solanum lycopersicum* L.

Por:

JUAN BERNARDO DÍAZ ARMAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:

Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor Principal



Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente

Coasesor



Dra. Elly Bacópulos Mejía

Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales

Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación

División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2017

DEDICATORIAS

A mis padres, Angel Díaz Cota y Araceli Armas Figueroa, por el apoyo, cariño, amor, confianza y enseñanzas que depositan en mi día a día. Son unos padres excelentes nunca se han rendido siempre luchan por salir adelante, gracias por todos esos días de esmero, nunca me dejaron solo, gracias papi y mami por los consejos y regaños recibidos en los tropiezos que he tenido en el camino de mi vida, sin ellos no hubiese logrado obtener la carrera.

A mis hermanas, Lucy Elizabeth, Leidi Diana y Nadia Darina, por estar conmigo en momentos difíciles y saber comprender mis regaños, gracias por su incondicional cariño, amor y sobre todo apoyarme en todo momento.

A mis abuelitos: Julio Díaz, Braulio Armas, Transita cota y Berta Figueroa gracias por sus enseñanzas y demostrarme el gran valor de la humildad con sus acciones.

A mis tíos, Antonio Diaz, Josefina Leyva, Lourdes Guadalupe, Fredi Díaz, Clarisa Díaz, Jhanet Díaz, Jacob Díaz, Florinda Diaz, gracias por apoyarme y ayudarme a superar los momentos difíciles de la vida, por su cariño y confianza depositada en mí.

A mis tíos, Domingo López, Wilmer Herrera, Maribel y Rudi Espinoza gracias por sus consejos y por sus palabras de aliento para no rendirme.

A mis primos: Elder (lele), Carlos (chay), Valeria (vale), Isabel (chavelita), Walver (way), Guadalupe (lupita), Manuel (memo), Alma (hermana), Julio (chuyo), Sofia (sofi), Rudi (chiquis), Miguel (buquis), Giromi (giro), Samanta (sami) Jimena (jime) y Daniel (nani), gracias por los momentos de felicidad, por sus regaños, por su apoyo incondicional y sobre todo enseñarme a luchar por los sueños.

A mis tios, y primos: David Armas, Sabina Armas, María Luz Armas, Idolina Armas, Rigoberto Armas, Braulio, Natalio, Daniel Armas, Sucely, Yesi, Jimena y Ariana, gracias por apoyarme y darme su incondicional cariño.

A mis amigos: Cesar García (Amigo), Marcelino (Carnal), Guillermo (Paisa), Ignacio (Nacho), Rubni, Lorenzo, Eusebio (cuñado), Joel, Sebastián, Miguel Ángel, Ángel Mario, Eliud (hermano), Miguel (Mike), Ricardo, Everildo (Japo), Minerva (Mine), Adán Estrada, Clarita, Raquel, Andrés y Nico.

A mi novia: Eugenia Solis (Chaparra), ya que con su apoyo, cariño y amor me ha ayudado a superar obstáculos y me ha dado fuerzas para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme permitido formarme en ella y ser parte de su grandeza, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, gracias a todos ustedes, fueron ustedes los responsables de realizar su pequeño aporte, que el día de hoy se vería reflejado en la culminación de mi paso por la universidad.

A mi departamento de horticultura por el apoyo que, por parte de todos sus miembros, compañeros y amigos, siempre he recibido, por brindarme los medios materiales necesarios para mi formación.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza. Por su orientación, ayuda y por la oportunidad que me brindo de colaborar en este proyecto.

A la Dra. Elly Bacopulos Mejía. Por sus consejos y revisión del presente trabajo.

A la Dra. Susana González por su disponibilidad y accesibilidad para la revisión del proyecto.

Al Dr. Álvaro Morales por su disponibilidad y accesibilidad para la revisión del proyecto.

Al Dr. Marcelino Cabrera por sus consejos y apoyo durante mi estancia en la universidad.

RESUMEN

El presente trabajo experimental se llevó a cabo en el periodo comprendido del mes de marzo al mes de Julio del año 2015 en un invernadero tipo capilla con cubierta rígida de policarbonato ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México. El objetivo fue comprobar la factibilidad de utilizar la irradiación a semillas de tomate con UV-B y UV-C como una herramienta para modificar las respuestas morfológicas y la composición química foliar de las plantas. Se utilizaron los siguientes tratamientos: para UV-B, 5 minutos UV-B (1.8 kJ m^{-2}), 15 minutos UV-B (5.4 kJ m^{-2}), 30 minutos UV-B (10.8 kJ m^{-2}). Para UV-C, 5 minutos UV-C (0.9 kJ m^{-2}) y 15 minutos UV-C (2.7 kJ m^{-2}) y se tuvo un testigo el cual no fue irradiado. Se utilizó un diseño completamente al azar, los datos se analizaron en el programa SAS versión 9.1 utilizando PROC ANOVA y se llevó a cabo una prueba de comparación de medias mediante Tukey ($\alpha \leq 0.05$). Los resultados arrojaron que las dosis de 5.4 y 10.8 kJ m^{-2} de UV-B y de 0.9 kJ m^{-2} de UV-C disminuyen las unidades SPAD. En la densidad estomática del haz todos los tratamientos UV-B y UV-C provocaron un aumento del número de estomas, no así, para la densidad estomática del envés donde se observó una disminución en la cantidad de estomas con las dosis de 10.8 kJ m^{-2} para la UV-B y 0.9 kJ m^{-2} para la UV-C. En el contenido de calcio foliar, se observó que a partir de una dosis UV-B de 5.4 kJ m^{-2} junto con las dosis UV-C (mayor energía) disminuyó la concentración de este mineral (mg g^{-1} de peso).

Palabras Clave: Irradiancia, irradiación UV, *Solanum lycopersicum* L., fotoreceptores.

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|-----------|
| Cuadro 1. Cuadrados medios (CM) y valores de F del análisis de varianza aplicados a las variables morfológicas a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C..... | 13 |
| Cuadro 2. Valores promedio de las variables morfológicas a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C..... | 13 |
| Cuadro 3. Cuadrados medios (CM) y valores de F del análisis de varianza aplicados a las variables de la composición química foliar a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C..... | 21 |
| Cuadro 4. Valores promedio de las variables de la composición química foliar a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C..... | 21 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1. Espectro magnético de radiación y las proteínas que captan cada una de las longitudes de onda..... | 7 |
| Figura 2. Valores promedio de altura de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 14 |
| Figura 3. Valores promedio de diámetro del tallo de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 15 |
| Figura 4. Valores promedio de peso fresco de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 16 |
| Figura 5. Valores promedio de peso seco de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 17 |
| Figura 6. Valores promedio de unidades SPAD de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 18 |
| Figura 7. Valores promedio de densidad estomática del haz de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 19 |
| Figura 8. Valores promedio de densidad estomática del envés de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 20 |
| Figura 9. Valores promedio de la cantidad de potasio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 22 |
| Figura 10. Valores promedio de la cantidad de magnesio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 23 |
| Figura 11. Valores promedio de la cantidad de calcio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla..... | 24 |

Figura 12. Valores promedio de la cantidad de sodio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.....**25**

INDICE DEL TEXTO

| | |
|--|----|
| I. INTRODUCCION | 1 |
| Objetivo general..... | 3 |
| Objetivos específicos | 3 |
| Hipótesis | 3 |
| II. REVISION DE LITERATURA | 4 |
| 2.1. Radiación solar. | 4 |
| 2.1.1. Efectos Biológicos de la Radiación UV..... | 5 |
| 2.1.1.1. Percepción, absorción y señalización de la radiación UV-B en plantas..... | 5 |
| 2.1.1.2. Efecto de la radiación UV- B en plantas | 7 |
| 2.1.1.3. Acción de la radiación UV-B en el metabolismo y procesos fotoquímicos de las plantas..... | 7 |
| 2.1.2. Proteína UV-R8 y su acción en las plantas | 8 |
| 2.1.3. Efecto de la radiación UV-C en plantas | 8 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 10 |
| 3.1. Ubicación del experimento..... | 10 |
| 3.2. Materiales | 10 |
| 3.2.1. De campo | 10 |
| 3.2.2. De laboratorio | 10 |
| 3.3. Material vegetal..... | 10 |
| 3.4. Establecimiento del cultivo..... | 10 |
| 3.5. Descripción de tratamientos | 11 |
| 3.6. Variables evaluadas..... | 11 |
| 3.7. Análisis estadístico | 12 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 13 |
| Variables Morfológicas..... | 13 |
| Variables de la composición química foliar | 21 |
| V. CONCLUSIONES | 26 |
| VI. REFERENCIAS | 27 |

I. INTRODUCCIÓN

La radiación solar es uno de los principales factores ambientales que afecta los ecosistemas terrestres y acuáticos de nuestro planeta por medio del control de los procesos fotobiológicos, factores ambientales y ciclos naturales (Carrasco-Ríos, 2009; Bornman *et al.*, 2015). Es primordial para el desarrollo de la vida vegetal debido a que es responsable de procesos morfogénéticos y energéticos (Villalobos *et al.*, 2002).

Dentro del espectro de radiación que alcanza la superficie terrestre se encuentra la UV (200- 400 nm), PAR (400-700 nm), visible (400-780 nm) e infrarroja cercana (800-2500 nm) (Troy y Thennadil, 2001). La radiación UV se clasifica en tres tipos: UV-A (315-400 nm), UV-B (280–315 nm) y UV-C (200–280 nm) (Carrasco-Ríos, 2009).

La radiación ultravioleta (UV) es el conjunto de radiaciones del espectro electromagnético con longitud de onda que va desde los 150 hasta los 400 nm (Ruiz-López *et al.*, 2010) y contabiliza de un 7 a 9% del total de radiación que llega a la superficie terrestre. Esta cantidad ha aumentado en los últimos años debido principalmente al agotamiento de la capa de ozono (Coohill, 1989; Frohnmeyer y Staiger, 2003). Toda la radiación UV-A atraviesa la atmósfera y alcanza la superficie terrestre (Nawkar *et al.*, 2013). La radiación UV-B en su mayoría es absorbida por el ozono atmosférico, pero un cierto porcentaje (10%) alcanza la superficie terrestre (Casal-Bejarano, 2008). La radiación UV-C no llega a la superficie terrestre debido a que se atenúa totalmente en la atmósfera por el oxígeno y el ozono. Por ello no se encuentra de forma natural en los ecosistemas (Gonçalves, 2002). La UV-C se utiliza comúnmente como esterilizante por su importante acción bactericida y germicida (Ruiz-López *et al.*, 2010).

Todos los órganos de las plantas y las semillas poseen una gran cantidad de receptores destinados a percibir diversos estímulos del espectro electromagnético. Las respuestas que desencadenan en muchas ocasiones son a través de señalización con proteínas integrales que crean una conexión entre el estímulo ambiental y las respuestas fisiológicas como el rompimiento de la latencia, la

velocidad de germinación y las respuestas post-germinativas del embrión. Este proceso de percepción y señalización de la radiación electromagnética por parte de una semilla parece estar mediado por diferentes receptores como los fitocromos (Magliano y Casal, 2004).

La proteína UVR8 es el receptor de la luz UV-B (Rizzini *et al.*, 2011), el cual controla la expresión de genes involucrados en respuestas de aclimatación y protección contra la radiación UV-B (Jenkins, 2008), entre estos se encuentra los compuestos fenólicos y enzimas fotoliasas (enzimas encargadas de reparar el daño producido por la UV-B en el ADN vegetal), (Brown *et al.*, 2005; Favory *et al.*, 2009). La radiación UV-B produce principalmente en plantas alteraciones morfológicas, fisiológicas, bioquímicas (Vera *et al.*, 2014) entre las que se encuentran: la inhibición del crecimiento del hipocótilo (Kusano *et al.*, 2011; Morales *et al.*, 2013), ajustes en la eficiencia fotosintética (Davey *et al.*, 2012; Takahashi *et al.*, 2011) y resistencia a los patógenos (Demkura y Ballaré, 2012). Hasta el momento no se ha encontrado un receptor para la radiación UV-C, esto puede deberse a que no llega a la superficie terrestre (Promyou y Supapvanich, 2012). Se han realizado estudios sobre el efecto de la irradiación con UV-C en frutas, hojas y hortalizas mayormente a sus efectos en poscosecha donde ha provocado; aumento en la producción de fitoalexinas (Rivera-Pastrana *et al.*, 2007), retardos en la maduración (Shama y Alderson, 2005), incremento de fenoles en pimiento (Vicente *et al.*, 2005), así como efectos negativos en procesos celulares, el metabolismo y crecimiento (Rastogi *et al.*, 2010; Ruiz-López *et al.*, 2010).

Tanto para la radiación UV-B como la UV-C se ha estudiado poco la utilidad de la aplicación en la irradiación de las semillas, ello a pesar de que teóricamente los cambios inducidos en la semilla por la irradiación pudieran hacerse latentes en etapas posteriores del crecimiento (Magliano y Casal, 2004; González-Aguilar *et al.*, 2007). En semillas de soya y girasol irradiadas con UV-C se encontraron respuestas positivas ante estrés abiótico (Foroughbakhch-Pournavab *et al.*, 2015), en melón la irradiación de las semillas con UV-B causó cambios en la morfología y

composición química de las plantas (Sosa-Flores *et al.*, 2014), mientras que en el repollo la irradiación de las semillas causó tolerancia frente al estrés biótico en las plantas adultas (Brown *et al.*, 2001). Sería importante realizar pruebas en plantas hortícolas de suma importancia como lo es el tomate, para observar y analizar el comportamiento de estas, en su crecimiento y desarrollo. Por lo antes mencionado, se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Comprobar la factibilidad de utilizar la irradiación a semillas de tomate con UV-B y UV-C como una herramienta para modificar las respuestas morfológicas y la composición química foliar de las plantas.

Objetivos específicos

1. Determinar la respuesta morfológica de las plantas que se obtienen de semillas irradiadas con UV-B y UV-C.
2. Determinar la repuesta en la composición química foliar de las plantas cuando estas se obtienen a partir de semillas irradiadas con UV-B y UV-C.

Hipótesis

Al menos uno de los tratamientos con irradiación UV-B y UV-C a semillas será diferente al testigo, generando cambios en la composición química foliar y morfología en plantas de tomate.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Radiación solar.

La radiación solar es uno de los principales factores ambientales que afectan la vida en nuestro planeta. Esta radiación controla el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos a través de los procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperíodo, fototropismos, etc.) así como de su acción sobre otros factores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y ciclos naturales (ciclos diarios, anuales, hídricos, etc.), que finalmente inciden en la distribución de los organismos sobre la superficie terrestre (Carrasco-Ríos, 2009; Bornman *et al.*, 2015). Es primordial para el desarrollo de la vida vegetal debido a que es responsable de procesos morfogénéticos y energéticos (Villalobos *et al.*, 2002).

La radiación electromagnética está compuesta por ondas de diferentes longitudes, dentro del espectro de radiación que alcanza la superficie terrestre se encuentra la UV (200- 400 nm), PAR (400-700 nm), visible (400-780 nm) e infrarroja cercana (800-2500 nm) (Troy y Thennadil, 2001). La radiación ultravioleta se divide convencionalmente en tres clases de acuerdo al rango de longitudes de onda UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-C (100-280 nm) (Ruiz-López *et al.*, 2010).

La radiación ultravioleta fue descubierta a comienzos del siglo XVII al observarse que la exposición de cristales de nitrato de plata a la luz solar producía la oxidación de los mismos. A causa de su capacidad para inducir reacciones fueron denominados en principio "rayos químicos". Esta denominación se conservó hasta mediados del siglo XIX, cuando se los empezó a llamar rayos ultravioletas, porque su efectividad para inducir reacciones de oxidación es mayor aún que la de la luz violeta visible (Hockberger, 2002). En la actualidad, se sabe que la franja ultravioleta, comprende radiaciones de menor longitud de onda y mayor energía que la franja de la luz visible, esta radiación va desde los 150 hasta los 400 nm, y se encuentra de un 7 a 9% del total de radiación que llega a la superficie terrestre, en los últimos años se ha tenido un aumento significativo de la radiación UV esto producto de la destrucción de la capa de ozono por compuestos contaminantes,

tales como los clorofluorocarbonos, óxidos de nitrógeno, cloro, bromo, los cuales tienden a formar compuestos estables con el ozono (O₃) con una vida media útil de 50 a 150 años (Coohill, 1989; Frohnmeyer y Staiger, 2003). La radiación UV-C es la más energética y dañina dentro de la radiación UV, pero fisiológicamente insignificante ya que es completamente absorbida por las moléculas de O₂ y O₃ de la atmosfera. La radiación UV-B es filtrada por la capa de ozono atmosférica, por lo tanto, solo una pequeña porción de ella alcanza la superficie terrestre, pero a pesar de su pequeña porción (1.5 %), es de vital importancia ya que causa severos daños en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La radiación UV-A atraviesa la capa de ozono alcanzando totalmente la superficie terrestre, pero es la menos energética de las tres debido a que su longitud de onda es más larga (Hollósy, 2002).

2.1.1. Efectos Biológicos de la Radiación UV

La radiación ultravioleta presenta una gran variedad de efectos perjudiciales en su mayoría, sobre un amplio rango de organismos. Estos efectos van desde impactos a nivel molecular, celular, individual o de ecosistemas, hasta afecciones de la salud humana, en general, la respuesta biológica a la radiación ultravioleta es más significativa en las longitudes de onda corta, pues son las más energéticas (Paul y Gwynn-Jones, 2003). Los efectos sobre especies individuales y ecosistemas han sido estudiados tanto en laboratorio como en experimentos de campo (Rozema *et al.*, 1997; Day y Neale 2002), existen evidencias claras de que la radiación UV presenta efectos letales sobre especies pertenecientes al fitoplancton y zooplancton, pero también afecta a anfibios, peces, en semillas y plantas terrestres, sin embargo, los efectos sobre los ecosistemas pueden ser inesperados o confusos. Algunos estudios muestran que la radiación UV puede cambiar los ecosistemas favoreciendo a las especies más resistentes (Gonçalves, 2002).

2.1.1.1. Percepción, absorción y señalización de la radiación UV-B en plantas.

Existen numerosos estudios sobre el rol de los fotorreceptores involucrados en la percepción de las franjas del azul, rojo y rojo lejano. Sin embargo, hasta hace

pocos años, el conocimiento sobre los receptores involucrados en la percepción de la radiación UV era más limitado, y si bien se había caracterizado a los fotorreceptores capaces de percibir el UV-A (criptocromos y fototropinas), hasta hace poco tiempo se desconocía la existencia de fotorreceptores específicos que captaran la radiación UV-B en plantas (Demkura, 2013). Durante mucho tiempo ha estado en discusión si las plantas poseen fotorreceptores de UV-B propiamente dichos. Dado que la luz UV-B es una radiación de alta energía se ha postulado que la percepción por las plantas podría resultar del daño directo sobre biomoléculas, (ya que esta es capaz de producir procesos fotoquímicos en componentes celulares), o bien por el estrés oxidativo generado como consecuencia del daño celular. Existen por ejemplo numerosos trabajos que demuestran que la exposición a UV-B induce la formación de dímeros de ciclobutano-pirimidina (DCPs) en el ADN, comprometiendo la integridad del material genético y provocando la interrupción de varios procesos celulares (Britt, 2004; Giordano *et al.*, 2004; Takahashi *et al.*, 2011).

Sin embargo, trabajos como los de Foroughbakhch-Pournavab *et al.*, (2015) han demostrado que respuestas fotomorfogénicas promovidas por la UV-B tales como la apertura de cotiledones y la inhibición del alargamiento del hipocótilo no están relacionadas con el daño acumulado en el ADN de las plantas expuestas, sugiriendo la existencia de otra molécula fotorreceptora. Se han realizado enormes avances en la comprensión de los mecanismos que utilizan las plantas para responder a la radiación UV-B gracias a la identificación en *A. thaliana* del locus UVR8 (del inglés *UV-resistance locus 8*). El locus UVR8 comprende un gen que codifica para una proteína con homología a un regulador de la condensación de la cromatina en humanos (Kliebenstein *et al.*, 2002). Originalmente se había propuesto como un elemento importante en la cadena de transducción de señales que involucraban a las respuestas al UV-B. En el transcurso del año 2011, se han presentado evidencias concluyentes de que la proteína UVR8 es el receptor de la luz UV-B (Rizzini *et al.*, 2011) y se han encontrado homólogos en otras especies vegetales como *Zea mays* (Jenkins, 2008).

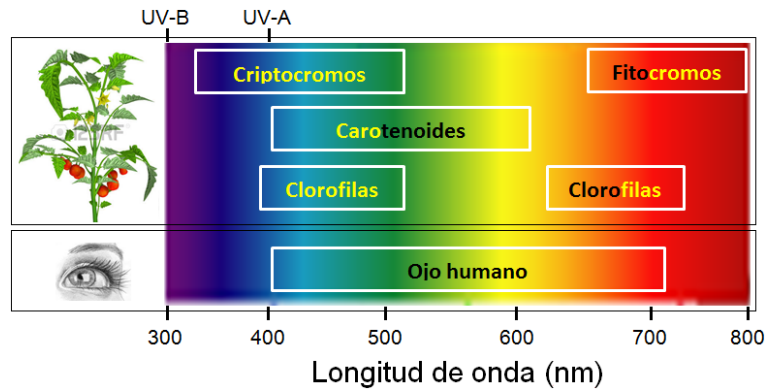


Figura 1. Espectro electromagnético.

2.1.1.2. Efecto de la radiación UV- B en plantas

Los cambios morfológicos y anatómicos que son inducidos por la radiación UV-B pueden llegar a ser determinantes en las respuestas de las distintas especies vegetales sometidas a un aumento de este tipo de radiación. Frente a un aumento de la radiación UV-B los cambios observados en plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas, son principalmente atribuidos a la orientación de las hojas. Las especies monocotiledóneas interceptan menos radiación UV-B que las dicotiledóneas, ya que estas últimas presentan hojas anchas y de orientación horizontal, por tal motivo, las plantas monocotiledóneas son más tolerantes a niveles elevados de radiación UV-B. La radiación UV-B induce en las plantas diversos cambios anatómicos que permiten modificar su interceptación y su penetración al interior de las células, tales como el aumento de ceras y el cambio en la composición de estas, grosor de hojas esto debido a la síntesis de lignina y otros polifenoles (Carrasco-Ríos, 2009).

2.1.1.3. Acción de la radiación UV-B en el metabolismo y procesos fotoquímicos de las plantas.

Dentro de los procesos metabólicos afectados por la radiación UV-B se pueden resaltar aquellos relacionados con el metabolismo como lo son: fotosíntesis, síntesis de metabolitos secundarios y los relacionados con la detoxificación de especies reactivas oxígeno (O_2). En general el daño producido por la radiación UV-B se relaciona con disminución de clorofilas (a y b), ya que al degradarse las proteínas y polipéptidos, se produce desorganización de las granas y liberación de

estos pigmentos, que en estado libre, son fotooxidados. También se han reportado casos en que la concentración de clorofilas se mantiene o incluso aumenta, debido a que la planta activa una serie de mecanismos de protección frente al daño oxidativo, mecanismos como la acumulación de pigmentos que permiten disminuir los daños. La producción, provoca la activación de mecanismos de defensa que involucran alteración en la síntesis de enzimas y sustancias antioxidantes como fenoles, flavonoides, carotenoides y ácido ascórbico. (Carolina *et al.*, 2014).

Los compuestos fenólicos constituyen un grupo heterogéneo, con alrededor de 10,000 sustancias reconocidas. En presencia de radiación UV-B, se acumulan en células epidermales, reduciendo la penetración a este tipo de radiación y por consiguiente disminuyen los efectos nocivos que podrían causar sobre los distintos componentes celulares. Este tipo de compuesto, incluyendo a los flavonoides son capaz de absorber entre 90 y 99% de la radiación UV-B incidente, sin interferir en la captación de radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Hangen *et al.*, 2007).

2.1.2. Proteína UV-R8 y su acción en las plantas

El receptor UVR8 controla la expresión de muchos genes involucrados en respuestas de aclimatación y protección contra la radiación UV-B (Jenkins, 2008). Los genes que se encuentran regulados por UVR8 incluyen a aquellos que están involucrados en la biosíntesis de compuestos fenólicos como los flavonoides, genes que codifican para enzimas fotoliasas (enzimas encargadas de reparar el daño producido por el UV-B en el ADN vegetal) y genes relacionados con las respuestas de protección frente al estrés oxidativo y el daño por la producción de radicales libres (Brown *et al.*, 2005; Favory *et al.*, 2009)

2.1.3. Efecto de la radiación UV-C en plantas

La radiación UV-C es altamente energética y puede producir daños irreversibles en el ADN y otras macromoléculas, dada su capacidad de inducir la formación de radicales libres que desencadenan procesos de estrés oxidativo y muerte celular programada, sin embargo, la radiación UV-C no llega a la superficie terrestre

debido a que es atenuada por absorción de la capa de ozono, el oxígeno atmosférico y por procesos de dispersión (Gao *et al.*, 2008).

Se ha estudiado poco sobre el efecto hórmino o de hormesis que esta radiación provoca en las plantas. El cual se define como una respuesta adaptiva con características diferenciables por la relación dosis-respuesta, es inducido por acción directa o sobre-estimulación a dosis bajas. Existe evidencia del efecto positivo de tratamiento de UV-C en aumentar las propiedades nutraceuticas de los alimentos y la síntesis de compuestos que actúan con los mecanismos de defensa natural de los vegetales expuestos a estrés, la exposición de tejidos a dosis bajas de irradiación induce la producción de compuestos fungicidas como fitoalexinas, ocasiona desordenes fisiológicos como el retraso de maduración y senescencia, también se ha reportado que la radiación UV-C provoca cambios en la pared y membrana celular generando de compuestos antioxidantes y la inactivación de enzimas en algunos sistemas vegetales. (Béjar *et al.*, 2007).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista Saltillo Coahuila México, ubicada a 25°21'19" latitud norte y a 101°01'48" longitud oeste, a una altura de 1779 msnm.

3.2. Materiales

3.2.1. De campo

Contenedores de poliestireno de 1.0 L, perlita, turba acida, mesas plásticas de 0.85 m de altura, bomba de marca Aqua Pak modelo AP-5X, válvulas reguladoras de presión, manómetro de glicerina, manguera de 16 mm, goteros distribuidores, tubines y goteros de estaca, pegamento pvc y cinta adhesiva.

3.2.2. De laboratorio

Cámara de irradiación (modelo 3UV-36 3UV Lamp) para UV-B y UV-C, balanza analítica marca Velab ve 100, estufa de secado marca ICB-Oven, SPAD marca Minolta, vernier digital marca Truper, microscopio compuesto con cámara digital y un software de medición.

3.3. Material vegetal

El material vegetal utilizado fue tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido Big Rio utilizado por su frondosidad y gran adaptabilidad.

3.4. Establecimiento del cultivo

En marzo del 2015 se realizó la siembra de semillas irradiadas se sembraron en contenedores de poliestireno de 1.0 L con un sustrato de mezcla de perlita y turba ácida en una proporción 1:1 (v/v), los contenedores se colocaron en mesas plásticas de 0.85 m de altura para facilitar el manejo, mediciones y evitar que las raíces tuvieran contacto con el piso del invernadero, a cada contenedor se le colocaron 2 semillas para asegurar al menos una plántula, donde germinaron las dos semillas, una fue eliminada.

El sistema de riego fue constituido por una bomba de marca Aqua Pak modelo AP-5X, válvulas reguladoras de presión, manómetro de glicerina, manguera de 16

mm, goteros distribuidores, tubines y goteros de estaca, los riegos se realizaron inicialmente con agua corriente, 20 días después de la siembra se inició con la fertilización a base de solución Steiner (Steiner, 1961) al 25%.

3.5. Descripción de tratamientos

Se introdujeron las semillas en una cámara para irradiación la cual dispone de una lámpara emisora de radiación UV-B y UV-C (modelo 3UV-36 3UV Lamp) a una distancia de la lámpara de 50 cm. Se realizaron pruebas previas en las cuales se irradiaron semillas con UV-B y UV-C a diferentes tiempos y de las cuales se tomaron las que presentaron los mejores resultados en las variables: semillas germinadas y plántulas normales. Los tratamientos aplicados fueron:

Para UV-B

- 0 minutos (testigo)
- 5 minutos UV-B (1.8 kJ m^{-2})
- 15 minutos UV-B (5.4 kJ m^{-2})
- 30 minutos UV-B (10.8 kJ m^{-2})

Para UV-C

- 5 minutos UV-C (0.9 kJ m^{-2})
- 15 minutos UV-C (2.7 kJ m^{-2})

3.6. Variables evaluadas

Altura de la planta y diámetro de tallo: transcurridos 52 días después de la siembra se llevó a cabo la medición con una cinta métrica y el diámetro de tallo con un vernier digital a un centímetro de distancia de la base del tallo.

Peso fresco y seco: fueron evaluados 5 plantas elegidas al azar de cada tratamiento, transcurridos 65 días después de la siembra.

Densidad Estomática: a los 65 días después de la siembra se realizó esta evaluación mediante el método (pegamento pvc y cinta adhesiva) sobre la tercera hoja totalmente expandida para determinar la densidad estomática del haz y envés (estomas mm^{-2}), utilizando un objetivo de 40 x de un microscopio compuesto (Carl

Zeiss) con cámara digital (Pixera Winder Pro) y un software de medición (Axion Vision Rel, 4.8).

Unidades SPAD: transcurridos 50 días después de la siembra se llevó a cabo evaluaciones de unidades SPAD en un foliolo de la tercera hoja completamente expandida con un SPAD 502 plus marca Minolta.

Contenido de minerales: El contenido de minerales se determinó con un aparato de absorción atómica, Perkin-Elmer, modelo 306, tanque de acetileno, lámpara para cada elemento y soluciones estándar para absorción atómica (Harleco o Fisher Scientific). Procedimiento: las muestras (planta) se secaron en una estufa de secado a 60°C por 3-5 días, las muestras secas se maceraron en un mortero de porcelana, para pesar 1 g de muestra para digerirla en un vaso de precipitado de 50 ml aforado con 40 ml de una solución de ácido cítrico y ácido perclórico (3:1), colocándolo en la estufa dentro de la campana de extracción para su digestión. Una vez digerida y fría la muestra se filtró con un papel filtro No. 40 en matraces de aforación de 100 ml con agua desionizada, después se envasó en botes de plástico con tapa y su correspondiente identificación. Una vez teniendo todas las muestras listas se procedió a leer en el espectrofotómetro de absorción atómica, calibrado según el elemento a determinar. Los datos se reportan en porcentaje según las diluciones hechas a la muestra. (Karl *et al.*, 1976).

3.7. Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar, los datos se analizaron en el programa SAS versión 9.1 utilizando PROC ANOVA y una prueba de comparación de medias mediante Tukey ($\alpha \leq 0.05$). El modelo estadístico es el siguiente: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables Morfológicas

En el análisis de varianza (cuadro 1) se presentó significancia para las variables, SPAD, Densidad estomática Haz y Envés. En el cuadro de medias (cuadro 2) se puede apreciar la diferencia significativa representada por los diferentes grupos de literales.

Cuadro 1. Cuadrados medios (CM) y valores de F del análisis de varianza aplicados a las variables morfológicas a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C.

| FV | G L | Altura | Diámetro | P. fresco | P. seco | SPAD | GL | D.E Haz | D.E envés |
|---------------------|-----|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------|----|----------|-----------|
| Energía UV-B y UV-C | 5 | 11.11 ^{NS} | 0.30 ^{NS} | 940.61 ^{NS} | 9.26 ^{NS} | 35.05* | 5 | 2021.84* | 35.05* |
| Error | 24 | 2.84 | 0.14 | 1080.68 | 7.71 | 3.88 | 12 | 290.14 | 3.88 |
| CV | | 9.27 | 7.47 | 22.13 | 10.89 | 5.91 | | 27.47 | 5.91 |
| Media | | 18.18 | 5.06 | 148.53 | 25.50 | 33.34 | | 62.00 | 33.34 |

FV= Fuente de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; NS= No significativo; *= Diferencia significativa; **= Diferencia altamente significativa ($p \leq 0.05$) entre tratamientos.

Cuadro 2. Valores promedio de las variables morfológicas a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C.

| Trat. | Dosis trat. KJ.m ⁻² | Altura | Diámetro | P. fresco | P. seco | SPAD | D.E Haz | D.E envés |
|---------|--------------------------------|---------|----------|-----------|---------|----------|---------|-----------|
| Testigo | 0 | 17.98ab | 5.29a | 151.60a | 24.80a | 35.60 ab | 10.46b | 193.30a |
| UV-B | 1.8 | 17.54 b | 5.01a | 134.40a | 24.40a | 33.78abc | 73.21a | 167.78ab |
| | 5.4 | 17.58ab | 5.06a | 165.80a | 27.60a | 30.66c | 79.19a | 155.38ab |
| | 10.8 | 16.48b | 4.62a | 138.60a | 24.40a | 30.98c | 62.75a | 146.75 b |
| UV-C | 0.9 | 20.86a | 5.30a | 137.60a | 25.00a | 31.84bc | 68.73a | 135.61b |
| | 2.7 | 18.66ab | 5.07a | 163.20a | 26.80a | 37.18a | 77.69a | 167.33ab |

Trat= tratamiento; P. fresco= Peso fresco (g); P. seco= Peso seco (g); D.E Haz= Densidad estomática del haz (mm⁻²) D.E envés (mm⁻²). $P < 0.05$.

Los tipos de irradiación UV-B y UV-C no generaron diferencias significativas para la variable altura de la planta, como se muestra en la **Figura 2**. Resultados que difieren con Foroughbakhch-Pournavab *et al.*, (2015), quienes al aplicar irradiación con UV-C en semillas de soya obtuvieron plántulas con una menor longitud, de la misma forma sucede con la radiación UV-B, ya que Jansen *et al.*, (1998) mencionan que la irradiación a semillas con UV-B induce una variedad de respuestas en plantas que incluyen cambios en la elongación del tallo y la morfología de la hoja, pero los mecanismos involucrados en estas respuestas no están claros.

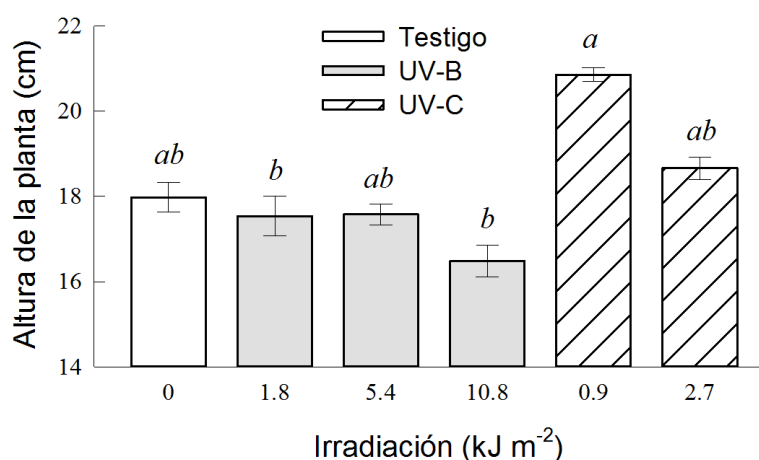


Figura 2. Valores promedio de altura de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

En la **Figura 3**. Se puede observar que no existe una diferencia significativa de los tratamientos aplicados con irradiación UV-B y UV-C respecto al testigo, esto a pesar de que se ha reportado que la radiación artificial de UV-B y UV-C altera las respuestas de crecimiento y biomasa; Rai *et al.*, (2011) mencionan que la radiación UV modifica el contenido de pigmentos y mejora la síntesis de metabolitos secundarios; Cechin *et al.*, (2007) señalan que la radiación UV-B afecta la tasa y la duración de la división celular y elongación.

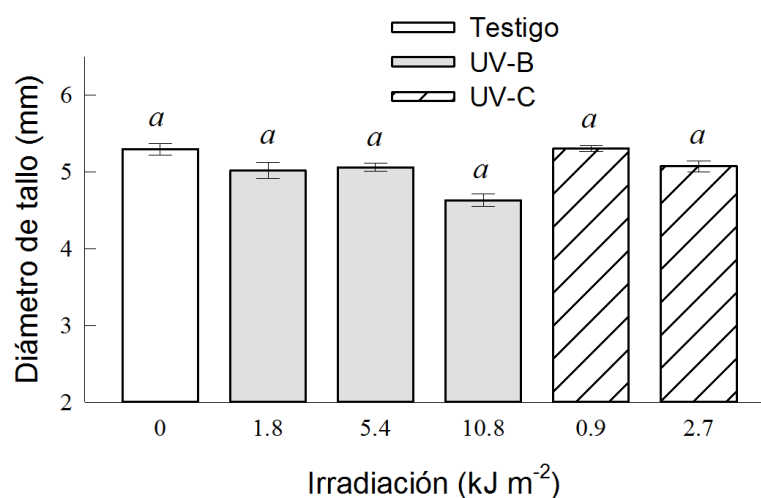


Figura 3. Valores promedio de diámetro del tallo de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

En las **Figuras 4 y 5** se puede observar que no existe una diferencia significativa de las diferentes dosis de irradiación UV-B y UV-C ante el testigo. Es difícil explicar la ausencia de resultados sin mayor información génica o metabólica, pero una posibilidad es que pueda deberse a un efecto de hormesis (relación dosis-respuesta) en las plantas, ya que dosis bajas pueden producir un efecto insignificante que luego puede aumentar a dosis mayores hasta alcanzar un efecto máximo asintótico (Davison *et al.*, 2009). Por su parte Foroughbakhch-Pournavab *et al.* (2015) al irradiar semillas de soya obtuvieron un aumento significativo de la biomasa total, también mencionan que la radiación UV-B tiene un efecto positivo en el aumento de la biomasa de diversas especies. Benavides-Mendoza *et al.*, (2003) mencionan que al irradiar semillas de lechuga con un láser de baja intensidad se obtuvo un aumento en la biomasa radical, pero no cambió el peso de las hojas y el tallo. Pinto *et al.*, (1999) encontraron que a un tiempo de irradiación de 4 h día⁻¹ de UV-B en trigo afectó en forma negativa la asimilación de CO₂ y como consecuencia la producción de biomasa fue menor.

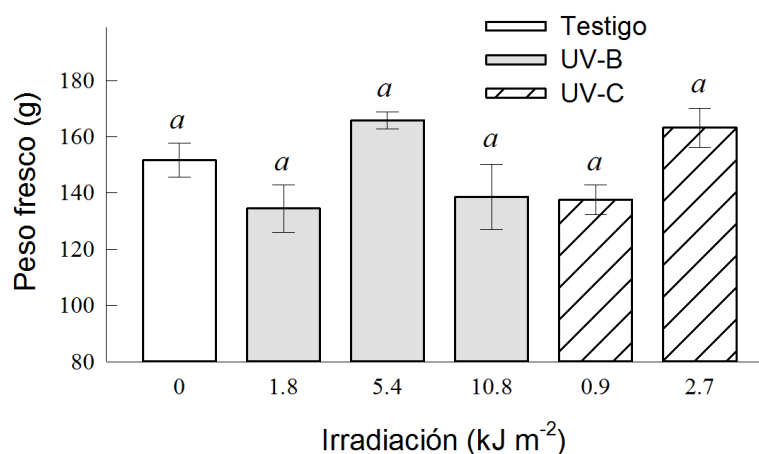


Figura 4. Valores promedio de peso fresco de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

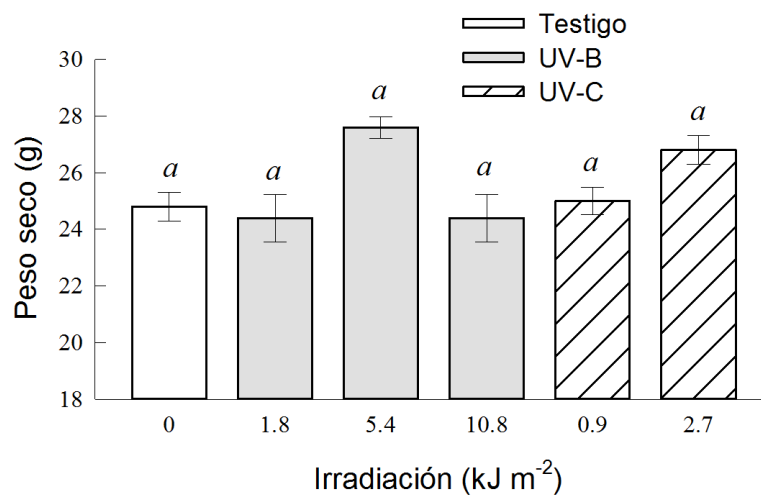


Figura 5. Valores promedio de peso seco de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

Las unidades SPAD disminuyeron con la aplicación de radiación UV-B con 5.4 y 10.8 kJ m⁻² (**Figura 6**). Esto se debe a que las unidades SPAD miden indirectamente la concentración de clorofila y que además este pigmento responde de forma inversa a la cantidad de energía radiante detectada en el ambiente (Rodríguez-Mendoza *et al.*, 1998). Carolina *et al.*, (2014) mencionan que el daño producido por la radiación UV-B se relaciona con disminución de clorofilas (a y b) ya que provoca desorganización de las granas, aunque en algunos casos se han reportado aumentos de este pigmento ya que la planta activa una serie de mecanismos de protección frente al daño oxidativo y los mecanismos como la acumulación de pigmentos permiten disminuir los daños.

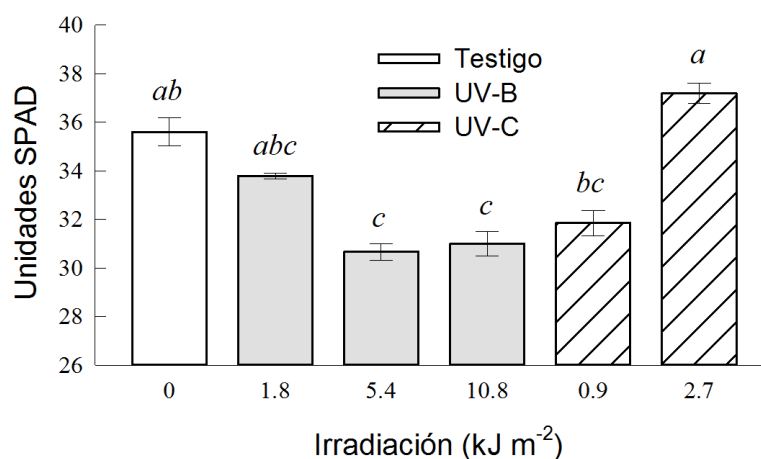


Figura 6. Valores promedio de unidades SPAD de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

En la **figura 7 y 8** se puede observar que para la densidad estomática del haz existe una diferencia significativa de los tratamientos aplicados en comparación con el testigo. La cantidad de estomas encontrados en el haz de las plantas provenientes de semilla irradiadas con UV-B y UV-C fue mucho mayor, no así para la densidad estomática del envés, donde se observa una disminución en la cantidad de estomas para el tratamiento con UV-B, caso contrario para el tratamiento con UV-C. Garnica, (2014) encontró que al irradiar semillas de trigo con láser de baja se obtienen plántulas con una mayor densidad estomática; Quevedo, (1999) menciona que el incremento en la proporción de rayos UV-B ocasiona cambios en la fisiología de las plantas, además, genera daños en proteínas, membranas y lípidos, así como la expresión de una gran cantidad de genes asociados con respuestas fotomorfogénicas, y fotosintéticas. Brosché y Strid, (2003) y Kapelev, (1989) encontraron una mayor actividad de lipasa (enzima involucrada en las cascadas de transducción de señales de estrés) en semillas de *Nepeta cataria* tratadas con un láser HeNe. Wargent *et al.*, (2009) indicaron que las respuestas adaptativas de las plantas frente a la radiación UV impactan en su desempeño modificando la interacción con los diferentes factores ambientales a través de cambios en la forma, fisiología y bioquímica.

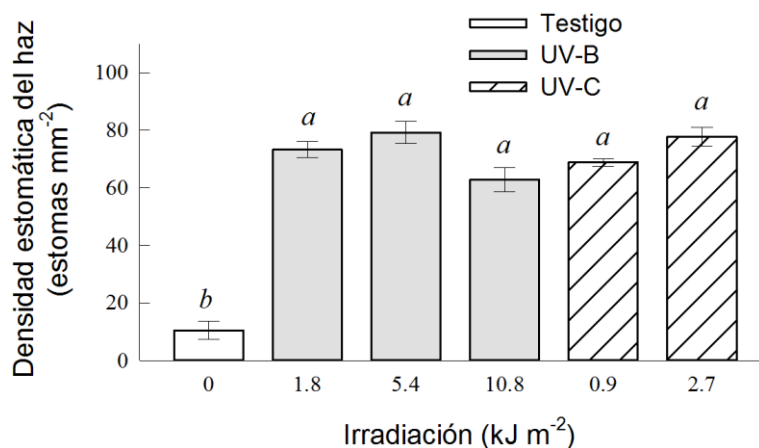


Figura 7. Valores promedio de densidad estomática del haz de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

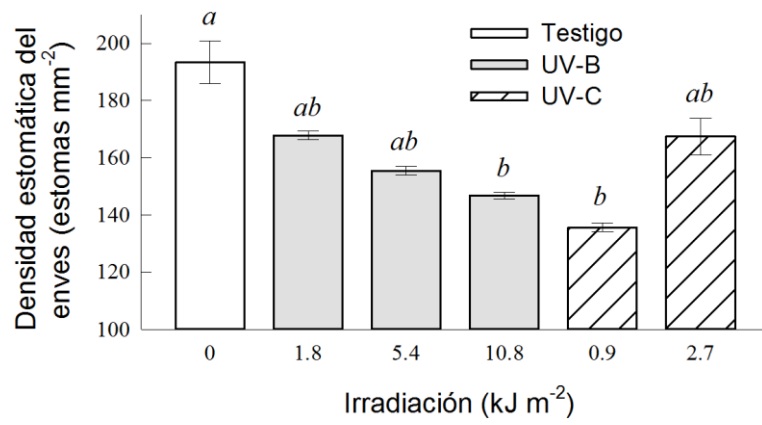


Figura 8. Valores promedio de densidad estomática del haz de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla

Variables de la composición mineral foliar

En el análisis de varianza (cuadro 1) se presentó significancia para la variable, contenido de Calcio. En el cuadro de medias (cuadro 2) se puede apreciar la diferencia significativa representada por los diferentes grupos de literales.

Cuadro 3. Cuadrados medios (CM) y valores de F del análisis de varianza aplicados a las variables de la composición química foliar (mg g⁻¹ de peso seco) a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C.

| | FV | GL | K | Mg | Ca | Na |
|----------------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|
| Energía UV-B y UV-C | | 5 | 0.11 _{NS} | 0.03 _{NS} | 0.80* | 0.10 _{NS} |
| Error | | 24 | 0.16 | 0.01 | 0.01 | 0.11 |
| CV | | | 11.93 | 12.91 | 4.01 | 188.82 |
| Media | | | 3.36 | 0.99 | 2.84 | 0.18 |

Cuadro 3. FV= Fuente de variación; GL= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación; K= contenido de Potasio; Mg= contenido de Magnesio; Ca= contenido de calcio; Na= contenido de Sodio; NS= No significativo; *= Diferencia significativa; **= Diferencia altamente significativa ($p \leq 0.05$) entre tratamientos.

Cuadro 4. Valores promedio de las variables de la composición química foliar (mg g⁻¹ de peso seco) a plantas provenientes de semilla irradiada con UV-B y UV-C.

| Trat. | Dosis trat. kJ.m⁻² | K | Mg | Ca | Na |
|----------------|--|----------|-----------|-----------|-----------|
| testigo | 0 | 3.50a | 1.00a | 3.28a | 0.11a |
| UV-B | 1.8 | 3.55a | 0.93a | 3.33a | 0.10a |
| | 5.4 | 3.43a | 1.048a | 2.92b | 0.09a |
| | 10.8 | 3.23a | 0.98a | 2.61c | 0.10a |
| UV-C | 0.9 | 3.25a | 1.10a | 2.49c | 0.19a |
| | 2.7 | 3.21a | 0.88a | 2.40c | 0.46a |

Cuadro 4. Trat= tratamiento; contenido de Potasio; Mg= contenido de Magnesio; Ca= contenido de calcio; Na= contenido de Sodio. ($p < 0.05$).

La acumulación de potasio no generó una diferencia significativa, pero se puede observar una diferencia numérica de los diferentes tratamientos aplicados contra el testigo (**Figura 9**). Esto puede ser debido a que la energía empleada no causó un estímulo suficiente para provocar cambios fisiológicos que pudieran modificar los canales de transporte de potasio (Tilbrook *et al.*, 2013). Goykovic *et al.* (2007) indicaron que las plantas se enfrentan a la influencia de varias condiciones ambientales, como son: sequía, salinidad, agroquímicos, bajas/altas temperaturas y de irradiación UV, las cuales generan estrés y provocan efectos adversos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, el flujo de potasio está determinado en gran parte por la tasa de crecimiento de la planta (Pitman, 1972).

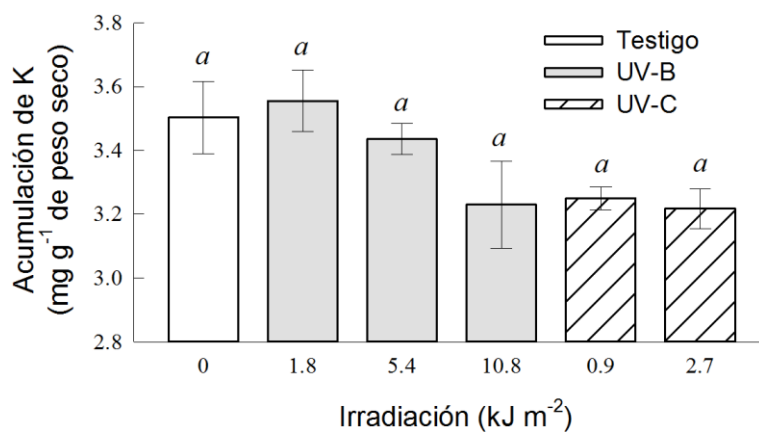


Figura 9. Valores promedio de la cantidad de potasio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

El contenido de magnesio en el tejido aéreo de las plantas obtenidas de semillas irradiadas con UV-B y UV-C se comportaron semejante a las plantas testigo, contradictorio a los resultados obtenidos en las unidades SPAD (contenido de clorofilas), ya que este nutriente forma la parte central de la molécula de clorofila, pero además ayuda al funcionamiento de varias enzimas como son la RNA polimerasas, ATPasas, Kinasas proteicas, Fosfatasas, glutatión sintasa, esta puede ser la razón por la cual en la variable de unidades SPAD haya diferencia y en la del magnesio no (Shaul, 2002). Además, la radiación UV participa en la síntesis y acumulación de clorofila, y regula el crecimiento celular (Meisel et al., 2011).

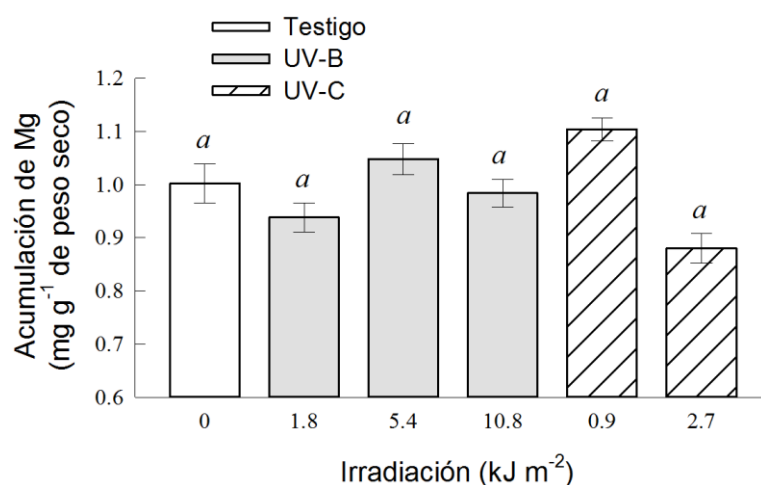


Figura 10. Valores promedio de la cantidad de magnesio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

En la **Figura 11**. Se puede observar que hubo un comportamiento significativo en el contenido de calcio. Ya que al aplicar una energía radiante de 1.8 KJ m⁻² de UV-B el comportamiento del calcio es semejante al testigo no causando una diferencia significativa. Pero a partir de 5.4 KJ m⁻² de UV-B el comportamiento de este mineral es descendente lo mismo que sucede con las 2 dosis de radiación UV-C el calcio disminuye; Santana, (2011) indica que esto puede deberse a que la producción de antioxidantes es mucho mayor en plantas que reciben radiación UV, los cuales no permiten la translocación de este nutriente. Sosa-Flores *et al.*, (2014) encontró que al irradiar semillas de melón a bajas intensidades de radiación UV-B se tiene un aumento en la concentración de este mineral. Lidon y Ramalho, (2011) y Foroughbakhch-Pournavab *et al.*, (2015) mencionan que, dependiendo de la velocidad de flujo, intensidad de la irradiación, la duración y la interacción estreses bióticos y factores abióticos del medio ambiente provoca un cambio en el contenido de minerales.

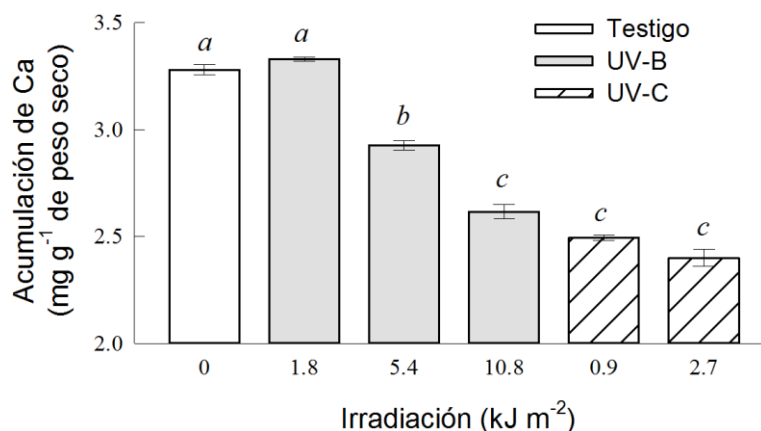


Figura 11. Valores promedio de la cantidad de calcio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

Los contenidos de sodio en el tejido aéreo de las plantas obtenidas por semillas irradiadas no presentaron diferencia ante las plantas testigo, resultados que no concuerdan con Díaz-Leyva *et al.*, (2017) quienes encontraron una mayor acumulación de sodio en el tejido aéreo de tomate provenientes de semillas irradiadas a 0.9 kJ m⁻² de UV-C. Foroughbakhch-Pournavab *et al.*, (2015) encontraron un aumento significativo de este mineral en plantas de girasol y trigo cuando estas son expuestas a un estrés por salinidad.

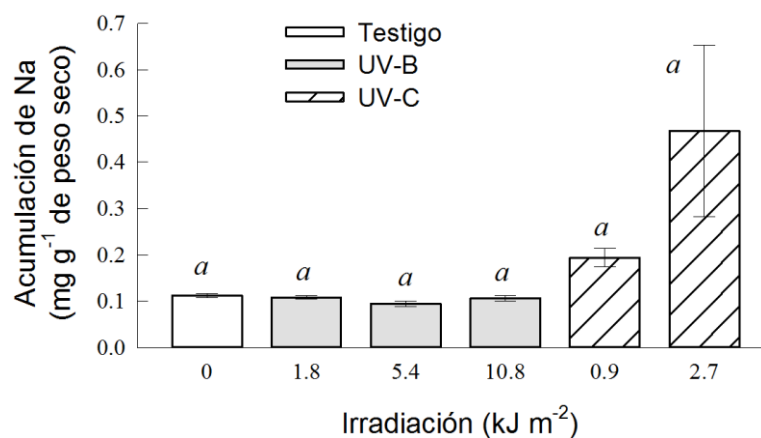


Figura 12. Valores promedio de la cantidad de sodio concentrado en la parte aérea de plantas de tomate en invernadero con relación a la energía UV-B y UV-C aplicada a la semilla.

V. CONCLUSIONES

Las dosis 5.4 y 10.8 kJ m⁻² de UV-B y la dosis de 0.9 kJ m⁻² de UV-C disminuyeron las unidades SPAD.

En la densidad estomática del haz todos los tratamientos UV-B y UV-C provocaron un aumento de estas estructuras.

Para la densidad estomática del envés se observó una disminución en la presencia de los estomas con las dosis de 10.8 kJ m⁻² para la UV-B y 0.9 kJ m⁻² para la UV-C.

La irradiación de semillas con UV-B a partir de 5.4 kJ m⁻² y las dosis de UV-C provocaron en plantas una disminución en la concentración de calcio.

Se puede utilizar la irradiación de semillas con UV-B y UV-C como una herramienta exógena para modificar el comportamiento fisiológico y morfológico de las plantas de tomate.

VI. REFERENCIAS

- Béjar, A. A. G., Pastrana, D. M. R., Aguilar, G. A. G., Domínguez, M. R., & Téllez, M. Á. M. (2007). Efectos bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Revista Fitotecnia Mexicana*.
- Benavides-Mendoza, A., Garnica-Serna, J., Michtchenko, A., Hernández-Aguilar, C., Ramírez-Rodríguez, H., Hernández-Dávila, J., Robledo-Torres, V. (2003). Respuesta al estrés y crecimiento de plántulas cuyas semillas fueron irradiadas con láser de baja intensidad. *AGROFAZ* 3(1):269-272
- Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robinson, S. A., Ballare, 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.
- Britt, A. B. (2004). Repair of DNA damage induced by solar UV. *Photosynthesis Research*, 81(2), 105-112.
- Brosché M. and Strid Å. 2003. Molecular events following perception of ultraviolet – B radiation by plants. *Physiologia Plantarum*. 117 (1): 1 – 10.
- Brown, J. E., Lu, T. Y., Stevens, C., Khan, V. A., Lu, J., Wilson, C. L., ... & Droby, S. (2001). The effect of low dose ultraviolet light-C seed treatment on induced resistance in cabbage to black rot (*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*). *Crop Protection*, 20(10), 873-883.
- Brown BA, Cloix C, Jiang GH, Kaiserli E, Herzyk P, Kliebenstein DJ, Jenkins GI (2005) A UV-B-specific signaling component orchestrates plant UV protection . *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102: 18225–18230.
- Carrasco-Ríos, L. 2009. Efecto de la radiación ultravioleta-B en plantas. *Idesia*. 27(3):59-76.

- Casal Bejarano, C. (2008). *Caracterización de la radiación ultravioleta en la provincia de Huelva e incidencia en la productividad y el valor biotecnológico de cultivos de interés comercial.*
- Cechin I., Fumis Terezinha de Fátima, Ligia Dokkedal A. 2007. Crecimiento y respuestas fisiológicas de las plantas de girasol expuestas a la radiación ultravioleta B. Universidad Federal de Santa Maria. Centro de Ciencias Rurais. Cienc. Rural v.37 n.1
- Coohill, T.P. (1989). Ultraviolet action spectra (280 nm to 380 nm) and solar effectiveness spectra for higher plants. *Photochem. Photobiol.* 50(4):451-457.
- Davey, M. P., Susanti, N. I., Wargent, J. J., Findlay, J. E., Quick, W. P., Paul, N. D., & Jenkins, G. I. (2012). The UV-B photoreceptor UVR8 promotes photosynthetic efficiency in *Arabidopsis thaliana* exposed to elevated levels of UV-B. *Photosynthesis research*, 114(2), 121-131.
- Demkura, P. V. (2013). Interacciones entre el ambiente lumínico y la producción de defensas contra herbívoros y patógenos en plantas. Tesis. 139 p.
- Demkura, P. V., & Ballaré, C. L. (2012). UVR8 mediates UV-B-induced *Arabidopsis* defense responses against *Botrytis cinerea* by controlling sinapate accumulation. *Molecular plant*, 5(3), 642-652.
- Díaz-Leyva, C. E., Bacópulos-Mejía, E., Ruiz-Torres, N. A., Ibarra-Jiménez, L., Gonzales-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2017). Irradiación de semillas de tomate con UV-B y UV-C: impacto sobre germinación, vigor y crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1).
- Favory, J. J., Stec, A., Gruber, H., Rizzini, L., Oravec, A., Funk, M., ... & Seidlitz, H. K. (2009). Interaction of COP1 and UVR8 regulates UV-B-induced photomorphogenesis and stress acclimation in *Arabidopsis*. *The EMBO journal*, 28(5), 591-601.

- Foroughbakhch-Pournavab, R., Bacópulos-Mejía, E., & Benavides-Mendoza, A. (2015). Efecto de la irradiación con UV-C en la germinación y vigor de tres especies vegetales. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(5), 129-137.
- Giordano, C. V., Galatro, A., Puntarulo, S., & Ballaré, C. L. (2004). The inhibitory effects of UV-B radiation (280–315 nm) on *Gunnera magellanica* growth correlate with increased DNA damage but not with oxidative damage to lipids. *Plant, Cell & Environment*, 27(11), 1415-1423.
- Gonçalves, R. J. (2002). Efecto de la radiación ultravioleta e importancia de compuestos protectores y mecanismos de reparación en especies de zooplancton de agua dulce.
- González-Aguilar, G. A., Zavaleta-Gatica, R., & Tiznado-Hernández, M. E. (2007). Improving postharvest quality of mango 'Haden' by UV-C treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), 108-116.
- Hockberger, P. E. (2002). A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms. *Photochemistry and photobiology*, 76(6), 561-579.
- Hollósy, F. (2002). Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron*, 33(2), 179-197.
- Jansen, M. A., 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. (2008). Environmental regulation of flavonoid biosynthesis. *Health Benefits of Organic Food: Effects of the Environment*, 240-262.
- Kapelev, O. I. (1989). The effect of pre-sowing OKG-II laser irradiation on the swelling and main enzymatic processes of catmint seeds. *Sbornik-Nauchnykh-Trudov-Gosudarstvennyi-Nikitskii Botanicheskii Sad*, 108, 137-144.

- Lidon FC y Ramalho JC. 2011. Impact of UV-B irradiation on photosynthetic performance and chloroplast membrane components in *Oryza sativa* L. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 104 (2011) 457–466 2011 doi:10.1016/j.jphotobiol.2011.05.004.
- Magliano, T. A., & Casal, J. J. (2004). Pre-germination seed–phytochrome signals control stem extension in dark-grown *Arabidopsis* seedlings. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 3(6), 612-616.
- Meisel, L., Urbina, D., & Pinto, M. (2011). Fotorreceptores y respuestas de plantas a señales lumínicas. *Fisiología vegetal. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile*, 18, 1-10.
- Pinto, M. E., Casati, P., Hsu, T. P., Ku, M. S., & Edwards, G. E. (1999). Effects of UV-B radiation on growth, photosynthesis, UV-B-absorbing compounds and NADP-malic enzyme in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different nitrogen conditions. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 48(2), 200-209.
- Quevedo, M. E. (1999). Efectos medioambientales sobre la morfología de la hoja. *Pharos*, 6(1).
- Rodríguez-Mendoza, M. D. L. N., Alcántar-González, G., Aguilar-Santelises, A. A., Etchevers-Barra, J. D., & Santizó-Rincón, J. A. (1998). Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra*, 16(2).
- Morales, L. O., Brosché, M., Vainonen, J., Jenkins, G. I., Wargent, J. J., Sipari, N., ... & Aphalo, P. J. (2013). Multiple roles for UV RESISTANCE LOCUS8 in regulating gene expression and metabolite accumulation in *Arabidopsis* under solar ultraviolet radiation. *Plant Physiology*, 161(2), 744-759.
- Nawkar, G. M., Maibam, P., Park, J. H., Sahi, V. P., Lee, S. Y., & Kang, C. H. (2013). UV-induced cell death in plants. *International journal of molecular sciences*, 14(1), 1608-1628.

- Paul, N. D., & Gwynn-Jones, D. (2003). Ecological roles of solar UV radiation: towards an integrated approach. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(1), 48-55.
- Promyou, S., & Supapvanich, S. (2012). Effect of ultraviolet-C (UV-C) illumination on postharvest quality and bioactive compounds in yellow bell pepper fruit (*Capsicum annuum* L.) during storage. *African Journal of Agricultural Research*, 7(28), 4084-4096.
- Rai R, Meena RP, Smita SS, Shukla A, Rai SK y Pandey-Rai S. 2011. UV-B and UV-C pre-treatments induce physiological changes and artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L. an antimalarial plant. *J Photochem Photobiol B*.2011 Dec 2;105(3):216-25. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2011.09.004.
- Rivera-Pastrana DM, Gardea-Béjar AA, Martínez-Téllez MA, Rivera-Domínguez M y González-Aguilar GA . 2007. Efectos Bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Rev. Fitotec. Méx.* Vol. 30(4) 361-372.
- Rizzini, L., Favory, J. J., Cloix, C., Faggionato, D., O'Hara, A., Kaiserli, E., ... & Ulm, R. (2011). Perception of UV-B by the *Arabidopsis* UVR8 protein. *Science*, 332(6025), 103-106.
- Rozema J, Staaij JVD, Bjorn LO y Caldwell M. 1997. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. *Trends Ecol. Evol.* 12, 22–28.
- Ruiz-López, G. A., Qüesta, A. G., & Rodríguez, S. D. C. (2010). Efecto de luz UV-C sobre las propiedades antioxidantes y calidad sensorial de repollo mínimamente procesado. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 11, 101-108.
- Shama, G., & Alderson, P. (2005). UV hormesis in fruits: a concept ripe for commercialisation. *Trends in Food Science & Technology*, 16(4), 128-136.
- Shaul, O. (2002). Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*, 15(3), 307-321.

- Sosa-Flores, V. P., Ramírez-Godina, F., Benavides-Mendoza, A., & Ramírez, H. (2014). Study of morphological and histological changes in melon plants grown from seeds irradiated with UV-B. *Journal of Applied Horticulture*, 16(3), 199-204.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134-154.
- Takahashi, M., Teranishi, M., Ishida, H., Kawasaki, J., Takeuchi, A., Yamaya, T., ... & Hidema, J. (2011). Cyclobutane pyrimidine dimer (CPD) photolyase repairs ultraviolet-B-induced CPDs in rice chloroplast and mitochondrial DNA. *The Plant Journal*, 66(3), 433-442.
- Tilbrook, K., Arongaus, A. B., Binkert, M., Heijde, M., Yin, R., & Ulm, R. (2013). The UVR8 UV-B photoreceptor: perception, signaling and response. *The Arabidopsis Book*, e0164.
- Troy, T. L., & Thennadil, S. N. (2001). Optical properties of human skin in the near infrared wavelength range of 1000 to 2200 nm. *Journal of biomedical optics*, 6(2), 167-176.
- Vera, C., Hinojosa, A., Tapia, M. L., Gonzalez, D., Bustamante, A., Luchsinger, L., & Escalona, V. (2014). Efecto de la radiación uv-b sobre los pigmentos y compuestos funcionales en dos cultivares de acelga "tipo baby". *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 15(2).
- Vicente, A. R., Pineda, C., Lemoine, L., Civello, P. M., Martinez, G. A., & Chaves, A. R. (2005). UV-C treatments reduce decay, retain quality and alleviate chilling injury in pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 35(1), 69-78.
- Villalobos, J., Mateos, L., Orgaz, F. y Federes, E. (2002) Fitotecnia, bases y tecnologías de la producción agrícola. Ediciones MundiPrensa, Madrid, España. 496p.
- Wargent, J. J., Gegas, V. C., Jenkins, G. I., Doonan, J. H., & Paul, N. D. (2009). UVR8 in *Arabidopsis thaliana* regulates multiple aspects of cellular

differentiation during leaf development in response to ultraviolet B radiation.
New Phytologist, 183(2), 315-326.