



**UNIVERSIDAD POPULAR
AUTÓNOMA DEL ESTADO DE PUEBLA**

**DECANATO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE BIOTECNOLOGÍA**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA LUZ UV-C Y LUZ AZUL
SOBRE LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y LA QUELACIÓN DE
METALES PESADOS EN PLANTAS DE JITOMATE (*Solanum
lycopersicum*)**

**TRABAJO PRÁCTICO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN BIOTECNOLOGÍA**

**PRESENTA:
Q. LUCERO FABIOLA CARRETO HERNÁNDEZ**

**DIRECTORES
DRA. ZAIDA NELLY JUÁREZ
DR. CARLOS ENRIQUE OCHOA VELASCO**

**ASESOR:
DR. LUIS DANIEL ORTEGA MARTÍNEZ**

Puebla, Pue a 16 de Noviembre de 2021



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Decanato de Ciencias Biológicas

Facultad de Biotecnología

Maestría en Biotecnología

Se aprueba el Trabajo práctico:

**Evaluación del efecto de la luz UV-C y luz azul sobre la capacidad antioxidante
y la quelación de metales pesados en plantas de jitomate (*Solanum
lycopersicum*)**

Nombre del Alumno

Lucero Fabiola Carreto Hernández

Comité Asesor

Dra. Zaida Nelly Juárez

Directora

Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco

Co-Director

CDr. Alfredo César Benítez Rojas

Asesor

Dr. Luis Daniel Ortega Martínez

Asesor

Puebla, México. 15 de Octubre de 2021

Puebla, Pue. 16 de Noviembre 2021

Dr. Elie Girgis El Kassis

Director del Programa de Maestría en Biotecnología

Asunto: Revisión de plagio para proyecto de grado

Estimado Dr. Elie Girgis El Kassis:

Antes que nada, reciba un cordial saludo y nuestro apoyo y compromiso de colaboración con los requerimientos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para las actividades de aseguramiento de la calidad y consolidación del posgrado.

Derivado del proceso de revisión de la herramienta de Antiplagio SafeAssign se detectaron los siguientes hallazgos:

Coincidencia Promedio: 12%

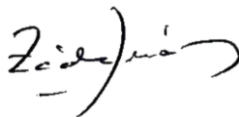
Coincidencia Máxima: 12%

Por lo anterior se vislumbra un riesgo BAJO en el análisis del documento para la obtención del grado de la alumna:

Lucero Fabiola Carreto Hernández

Se anexa reporte del informe de la herramienta.

Atentamente



Dra. Zaida Nelly Juárez

Director de Tesis

Originality Report de SafeAssign

Blackboard

SafeAssign Originality Report

Proyectos Tesis • Trabajo práctico Lucero • Enviado el lun, 15 nov 2021 19:18

LUCERO FABIOLA CARRETO HERNANDEZ

UNIVERSIDAD POPULAR
AUTÓNOMA DEL ESTADO DE PUEBLA
DECANATO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE BIOTECNOLOGÍA
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA LUZ UV-C Y LUZ AZUL SOBRE LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y LA QUELACIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)

Conteo de palabras: 13.152 Enviado el: 15/11/21 UUID de entrega: 60f109c6-1b5e-4c55-64ac-77e676f3c4a3 UUID de documento adjunto: 9440ab6b-4b07-8896-e674-5b6f157068

Resumen del informe

✓ **Riesgo bajo**

Estos documentos contienen algunas citas y frases o bloques de texto comunes que coinciden con otros documentos. Por lo general, no es necesario realizar un análisis más profundo de estos documentos, ya que no hay pruebas de plagio.

Similitud de texto general

Coincidencia promedio	Coincidencia máxima
12 %	12 %
	Trabajo.LUCEROCARRETO, ac...

Originality Reports (1)

✓ **Contenido adicional** 12 %
Trabajo.LUCEROCARRETO, actual noviembre.d...

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca nacional (919898)

A UPAEP por la beca Ordinaria

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Agradezco a:

Dios por darme la vida, la fortaleza en los momentos más difíciles de mi existir, por ser mi guía para continuar, por haberme acompañado en todo momento y brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias, felicidad y sobre todo porque sin él no hubiera sido nada de esto posible.

Mi padre por su apoyo moral, espiritual, económico en todo momento y en cada decisión de mi vida. Por todo el esfuerzo y sacrificio puesto en este y todos mis proyectos para que yo pudiera seguir estudiando. Sin ti no hubiera llegado hasta donde estoy.

A mi hermano Alejandro por estar conmigo en todo momento por su ayuda moral y económica. Gracias por mostrarme lo bueno que es tener hermanos como tú.

A mi hermano Jesús que fue el ejemplo por el cual me vi en este punto de mi vida profesional. Gracias por estar siempre presente.

Finalmente a la Dra. Zaida Nelly Juárez por brindarme su apoyo cuando más lo necesite por sus conocimientos, paciencia, dirección y tiempo para poder concluir este trabajo de investigación sin su ayuda no lo hubiera logrado.

Al Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco principal colaborador durante todo este proyecto quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo y culminación de este trabajo.

De manera especial al Mto. Alfredo César Benítez Rojas por haberme brindado su apoyo, tiempo, conocimiento y disposición en este proyecto y en mi estancia durante toda la maestría.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi Madre quien me dio la vida, su amor, su apoyo incondicional y su ejemplo. Gracias porque siempre creíste en mí y me guiaste para ser una persona de bien.

“Siempre vivirás en mis pensamientos y en mi corazón”

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
2. MARCO TEÓRICO	- 2 -
2.1. Hortalizas	- 2 -
2.1.2. Composición y propiedades químicas de las hortalizas.....	- 2 -
2.1.3. Producción de hortalizas	- 3 -
2.1.4. Planta de jitomate.....	- 4 -
2.1.5. Condiciones de crecimiento y cultivo	- 5 -
2.2. Metales pesados y su efecto en hortalizas	- 6 -
2.2.1. Metales pesados y contaminación en agua	- 8 -
2.3. Mecanismo de defensa de las plantas frente al estrés.....	- 9 -
2.3.1. Concepto de estrés en fisiología vegetal	- 9 -
2.3.2. Estrés abiótico y biótico	- 9 -
2.3.3. Mecanismos generales de respuesta al estrés.....	- 9 -
2.3.4. Estrés oxidativo.....	- 10 -
2.3.5. Respuesta sistémica.....	- 10 -
2.3.6. Mecanismo de acción de defensa de plantas vs metales pesados	- 11 -
2.4. Influencia de la longitud de onda de la luz sobre el crecimiento y la capacidad antioxidante	- 14 -
2.4.1. El espectro electromagnético	- 14 -
2.4.2. Espectroscopia Ultravioleta y Visible.....	- 15 -
2.4.3. Tipo de luz y su efecto en plantas	- 15 -
2.4.4. Efecto de la luz UV-C en hortalizas.....	- 17 -
2.4.5. Luz azul.....	- 18 -
2.5. Antioxidantes en planta de jitomate	- 18 -
2.5.1. Mecanismo de acción de los antioxidantes frente a radicales libres.....	- 18 -
2.5.2. Antioxidantes presentes en plantas de jitomate	- 19 -
3. JUSTIFICACIÓN.....	- 21 -
4. OBJETIVOS	- 22 -

5. PLAN DE TRABAJO	- 23 -
6. METODOLOGÍA.....	- 24 -
6.1. Material vegetal.....	- 24 -
6.2. Obtención de plántulas de jitomate	- 24 -
6.3. Evaluación y tratamiento de irradiación de luz UV-C y luz azul	- 24 -
6.4. Obtención de los extractos	- 25 -
6.5. Determinación de compuestos fenólicos totales	- 26 -
6.6. Determinación de la capacidad antioxidante.	- 26 -
6.7. Análisis estadístico.....	- 26 -
6.8. Tratamiento de luz azul a plántulas de jitomate.....	- 26 -
6.9. Adición y evaluación de metales pesados sobre la capacidad antioxidante de las plántulas de jitomate	- 27 -
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	- 29 -
7.1. Evaluación del efecto de irradiación de luz UV-C y luz azul sobre plántulas de jitomate mediante técnicas de compuestos fenólicos totales y DPPH.....	- 29 -
7.2. Determinación de compuestos fenólicos totales	- 30 -
7.3. Capacidad antioxidante	- 30 -
7.5. Cuantificación del efecto de la adición de luz azul y metales pesados sobre los compuestos fenólicos totales de las plántulas de jitomate	- 32 -
7.6. Medición de los metales presentes en las plántulas de jitomate	- 32 -
8. CONCLUSIONES.....	- 35 -
9. Recomendaciones	- 36 -
10. Referencias	- 37 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de irradiación.....	25
Figura 2. Tratamiento con luz azul a plántulas de jitomate.....	27
Figura 3. Evaluación de diferentes dosis de irradiación de la luz UV-C y luz azul en plántulas de jitomate y su efecto en los compuestos fenólicos totales.....	30
Figura 4. Evaluación de diferentes dosis de irradiación de la luz UV-C y luz azul en plántulas de jitomate y su efecto en la capacidad antioxidante.....	30
Figura 5. Capacidad antioxidante de plántulas de jitomate irradiadas con luz azul y contaminadas con metales pesados.....	31
Figura 6. Comparación de compuestos fenólicos totales de plántulas de jitomate irradiadas con luz azul y contaminados de metales pesados.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos por exposición a plomo, cromo, cadmio, arsénico y mercurio.....	7
Tabla 2. Espectro electromagnético (rangos aproximados)	14
Tabla 3. Rangos de longitudes de onda (nm) para diferentes colores del espectro visible.....	15
Tabla 4. Tratamiento de irradiación con luz UV-C y luz azul a plántulas de jitomate.....	24
Tabla 5. Tratamiento de adición de metales pesados a plántulas de jitomate.....	27
Tabla 6. Evaluación del tratamiento de irradiación de luz UV-C y luz azul y su influencia en la capacidad antioxidante.....	29
Tabla 7. Comparación de los 8 tratamientos de plántulas irradiadas de luz azul y contaminadas con metales pesados y su respectivo factor de bio concentración.....	33
Tabla 8. Comparación de la normatividad mexicana e internacional de los resultados de la concentración en plántulas de jitomate.....	34

RESUMEN

Los crecientes problemas de contaminación en cultivos agrícolas debido a pesticidas o agroquímicos han ocasionado problemas en la calidad de los frutos y hortalizas como el jitomate (*Solanum lycopersicum*). Este es el segundo cultivo más importante en la producción de hortalizas en México debido a que es fundamental en la alimentación porque es fuente importante de vitaminas, minerales, fibra y antioxidantes siendo que su consumo sea esencial para obtener una alimentación sana y equilibrada.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la luz UV-C y luz azul sobre la capacidad antioxidante de plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) mediante técnicas de DPPH y fenoles totales para analizar una posible quelación de metales pesados. Por ello se evaluó el tratamiento de radiación de luz UV-C y luz azul en plántulas de jitomate, posteriormente se realizaron 8 tratamientos a las plántulas, lo que concluyó la contaminación con metales de plomo, cromo y cadmio en una concentración de 10 ppm y tratamiento con luz azul durante 15 días. Al final del experimento se deshidrataron las plántulas y posteriormente se realizaron extractos para el material biológico para determinar su capacidad antioxidante y para su digestión y posterior análisis de los metales pesados citados por medio de absorción atómica.

Los valores más altos de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante se encontraron en las plántulas irradiadas con luz azul durante 15 minutos. En los tratamientos combinados se calculó el factor de bioconcentración (FBC) que fue menor a 1, de los resultados obtenidos del FBC podemos concluir que en todos los tratamientos se encontraron que las plántulas de jitomate son del tipo exclusoras y puede usarse para fitoestabilización.

Palabras clave: jitomate, plántulas, luz UV-C, luz azul, metales pesados, capacidad antioxidante.

ABSTRACT

The growing problems of contamination in agricultural crops due to pesticides or agrochemicals have caused problems in the quality of fruits and vegetables such as tomato (*Solanum lycopersicum*). This is the second most important crop in the production of vegetables in Mexico because it is essential in the diet because it is an important source of vitamins, minerals, fiber and antioxidants, and its consumption is essential to obtain a healthy and balanced diet.

The objective of this study was to evaluate the effect of UV-C light and blue light on the antioxidant capacity of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum*) by means of DPPH techniques and total phenols to analyze a possible chelation of heavy metals. For this reason, the treatment of UV-C light radiation and blue light in tomato seedlings was evaluated, later 8 treatments were carried out on the seedlings, which concluded the contamination with lead, chromium and cadmium metals in a concentration of 10 ppm and blue light treatment for 15 days. At the end of the experiment, the seedlings were dehydrated and later extracts were made for the biological material to determine its antioxidant capacity and for its digestion and subsequent analysis of the mentioned heavy metals by means of atomic absorption.

The highest values of phenolic compounds and antioxidant capacity were found in seedlings irradiated with blue light for 15 minutes. In the combined treatments, the bioconcentration factor (BCF) was calculated, which was less than 1, from the results obtained from the BCF we can conclude that in all the treatments it was found that the tomato seedlings are of the excluder type and can be used for phytostabilization.

Keywords: tomato, seedlings, UV-C light, blue light, heavy metals, antioxidant capacity.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de frutas y hortalizas en México han mostrado un aumento debido a su valor comercial, así como en su consumo por la cantidad de nutrientes que proporcionan, siendo el jitomate (*Solanum lycopersicum*) el segundo cultivo con 3.24 millones de toneladas (SIAP, 2020). Sin embargo, algunos informes reportan la presencia de metales pesados, los que van en aumento de manera alarmante, debido a la agricultura intensiva. Los metales pesados son altamente tóxicos para el medio ambiente, animales y por consiguiente para los humanos (Castro *et al.*, 2017). Por lo que es necesario investigar y aplicar diferentes metodologías para consumir productos que sean libres de estos elementos tóxicos. La luz UV-C y luz azul se han utilizado con frecuencia como estrés abiótico en plantas para aumentar la síntesis de compuestos bioactivos que han demostrado atrapar metales pesados (Barceló *et al.*, 2003). Sabiendo que las plantas generan un mecanismo de defensa ante cualquier peligro, existen varias propuestas para explicar este complejo proceso, la más empleada es la síntesis de metabolitos secundarios como los ácidos fenólicos, terpenoides, entre otros (Martens *et al.*, 1994). Por lo expuesto anteriormente, en este trabajo se evaluó el efecto de la luz UV-C y luz azul sobre la síntesis de compuestos antioxidantes en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) capaces de quelar metales pesados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Hortalizas

El término de hortaliza se entiende como un grupo numeroso de plantas con características versátiles. Son plantas herbales que tienen un ciclo de uno año o dos años, sus productos se utilizan en estado natural o procesado para la nutrición humana, con un contenido de agua superior al 70% y bajo contenido energético (menos de 100 kcal/100g). En México, dada la variedad de condiciones edafoclimáticas por la variedad de climas y suelos que existen, se pueden sembrar alrededor de 70 variedades de hortalizas durante todo el año, razón por la cual este tipo de cultivo se encuentra en el cuarto lugar a nivel mundial y el primero en el continente Americano en la producción y exportación. Las hortalizas han tenido importancia desde que en México inicio la producción agrícola, lo cual ha contribuido al desarrollo económico, regional y nacional. Las hortalizas son fundamentales en la alimentación humana, ya que son fuente importante de vitaminas, minerales, fibras y antioxidantes, haciendo que su consumo sea esencial para obtener una alimentación sana y equilibrada (Foroughbakhch *et al.*, 2010).

2.1.2. Composición y propiedades químicas de las hortalizas

Las hortalizas están compuestas de los siguientes elementos:

Agua: contienen aproximadamente entre un 70% a 80% de agua con respecto a su peso fresco.

Hidratos de carbono: el contenido de este compuesto varía según el tipo de hortalizas, así como de la cantidad de glúcidos. La distribución queda de la siguiente manera:

- Grupo A: Son hortalizas que contienen menos del 5% de hidratos de carbono. Ejemplo de este grupo son: acelga, berenjena, coliflor, lechuga, chile, rábano, jitomate, entre otros.
- Grupo B: Este tipo de hortalizas contiene entre un 5% y un 10% de carbohidratos. Pertenecen a este grupo las alcachofas, cebollas, rábanos, puerros, zanahorias y remolachas.

- Grupo C: Involucra a las hortalizas que contienen más del 10% de hidratos de carbono, por ejemplo la patata y la mandioca (Rozano *et al.*, 2004).

Vitaminas y minerales: gran parte del grupo de hortalizas presentan un alto contenido. La vitamina A está presente en la mayoría de las hortalizas al igual que la vitamina C. Cabe señalar que la vitamina C se encuentra en cantidades menores.

Lípidos y proteínas: la mayoría de las hortalizas se caracterizan por tener un contenido bajo de grasas y proteínas.

Contenido calórico: las hortalizas se caracterizan por contener bajas calorías, muchas no sobrepasan las 50 calorías por cada 100 gramos de peso excepto las papas y las alcachofas. Debido a su bajo aporte energético se consideran como parte fundamental de la dieta de las personas (Rozano *et al.*, 2004).

Fibra dietética: contienen del 2% al 10% de su peso fresco en fibras vegetales digeribles (fibra alimenticia). La fibra dietética presente en las hortalizas es de pectina y celulosa, que suele ser menos digerible que en la fruta por lo que resulta preciso la cocción de las hortalizas para su consumo (Foroughbakhch *et al.*, 2010).

2.1.3. Producción de hortalizas

En México, de acuerdo con Lugo (2013) se identifican cuatro grandes regiones de producción de hortalizas diferenciadas por su nivel de tecnificación, organización y distribución:

a) La región noreste tiene un alto nivel tecnológico y se caracteriza por grandes y medianos productores dedicados a la producción selectiva (tomates, berenjenas, pimientos, etc.) algunos de los estados representativos son: Chihuahua, Coahuila y Nuevo León.

b) El nivel de tecnología en la región Bajío-Pacífico es muy alto con una producción selectiva a base de lechuga, brócoli, coliflor y zanahoria. En esta zona se encuentran grandes productores que proceden de los estados de Jalisco, Baja California, Guanajuato y Michoacán.

c) El nivel de tecnología en la región central es de bajo a medio, la producción hortícola es muy caro y se caracteriza por la presencia de pequeños productores. El sistema hortícola local distribuye a los mercados locales, regionales y nacionales. Por otro lado, la capacidad

de producción de diferentes niveles técnicos le permite ingresar al mercado internacional siendo los estados representativos Tlaxcala, Puebla, México, Veracruz y Morelos.

d) La zona sureste se caracteriza por tener una baja producción en hortalizas así como un pequeño sector de productores, aunado a un bajo nivel tecnológico. El sistema de horticultura local distribuye la producción al mercado local. Los estados representativos son Veracruz, Chiapas, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo (Lugo, 2013).

Según el tamaño de la tierra de cultivo y las condiciones para su producción, se buscan productores con esas características específicas para su labranza. En el periodo otoño-invierno de 2018 se sabe que la producción de lechuga fue de 23,469 toneladas, 20,629 toneladas de zanahoria, 5,496 toneladas de jitomate, por mencionar las más importantes. En México, la producción tan solo en 2020 es de 3.24 millones de toneladas y Puebla se ubica entre los primeros estados productores de jitomate con una producción de 130, 766 toneladas (SIAP, 2020).

2.1.4. Planta de jitomate

La planta de jitomate es originaria de América del Sur; sin embargo, la técnica de siembra fue mejorada en México, siendo así una de las principales hortalizas de exportación que se cultiva en los estados del noroeste y occidente de este país. Según Spooner y Peralta (2005), el jitomate desde el punto de vista taxonómico se divide de la siguiente manera:

División: *Spermatophyta*

Orden: *Solanales*

Subdivisión: *Magnoliophytina*

Familia: *Solanaceae*

Clase: *Dicotyledoneas*

Género: *Solanum*

Especie: *Solanum lycopersicum*

Se conocen nueve especies del género *Solanum*, pero solamente *lycopersicum* es cultivado comercialmente como hortaliza, siendo el género y la especie más usada en la actualidad (Spooner y Peralta, 2005).

2.1.5. Condiciones de crecimiento y cultivo

El funcionamiento fisiológico de la planta de jitomate depende del clima, suelo y las características genéticas. El manejo de los factores climáticos es fundamental para el funcionamiento adecuado del cultivo (Gómez *et al.*, 2010).

La temperatura en la planta de jitomate es uno de los principales factores ambientales que afecta la eficiencia de la fotosíntesis, porque la temperatura limita los rendimientos de los cultivos hortícolas. Esta planta se desarrolla óptimamente en climas con una temperatura que oscila entre 18°C y 26°C también a temperaturas nocturnas de 17°C aproximadamente, para su mejor desarrollo y fructificación (Maroto, 2008).

Las altas temperaturas provocan modificaciones en las funciones de las plantas de jitomate, incluso llegan a impedir la fotosíntesis y pueden desorganizar sistemas enzimáticos necesarios para el desarrollo de su ciclo biológico. Esto puede ocasionar una disfunción en los cloroplastos de las células y una reducción en la asimilación de CO₂ atmosférico (Gómez *et al.*, 2010).

Las bajas temperaturas afectan negativamente la fotosíntesis, la translocación de nutrientes alterando la permeabilidad de las membranas y disminuyendo la respiración de las plantas de jitomate, si la intensidad o duración de las bajas temperaturas es limitada estos procesos pueden recuperar sus valores normales de lo contrario son afectados irreversiblemente (Colombo y Obregón, 2008).

La luz y el efecto de la intensidad luminosa tiene una gran importancia sobre el crecimiento de las plantas que relacionan principalmente la fotosíntesis y la transpiración vegetal ya que de no ser así el crecimiento, desarrollo, floración, polinización y maduración de los frutos se pueden ver afectadas. Se ha comprobado que las plantas de jitomate sometidas a altas intensidades de luz presentan enrollamiento fisiológico de las hojas inferiores y sus frutos contienen altos niveles de vitamina C (Tasuke *et al.*, 2008).

Jaramillo *et al.*, (2007) refiere la importancia de la humedad del suelo, se altera el metabolismo de la planta de manera general y la calidad de los frutos. El efecto del estrés hídrico (exceso y deficiencia de humedad) sobre plantas de jitomate afecta la mayoría de los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, tales como la apertura de los estomas, elongación del tallo, reducción de los rendimientos y la calidad de los frutos. Se

reporta que los valores más favorables para el desarrollo del jitomate se consideran del 50% y 60%, porque valores altos indican ataque de plagas o alguna enfermedad en la planta.

2.2. METALES PESADOS Y SU EFECTO EN HORTALIZAS

En la agricultura moderna es necesario el uso de agroquímicos para mantener altos rendimientos en los cultivos, pero estas medidas ocasionan problemas que alteran las propiedades químicas y biológicas del suelo. En este sentido se genera una contaminación por metales pesados en ríos, lagos, aguas subterráneas, erosión del terreno, agotamiento de minerales del suelo entre otras. Cabe mencionar que este impacto negativo va en aumento por el uso de la agricultura intensiva (Aráuz *et al.*, 2018). En los ecosistemas naturales, las plantas actúan como filtros, tratando de eliminar, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en el suelo, lodos, agua y sedimentos. Los metales contaminantes más importantes dada su toxicidad y abundancia son: arsénico, plomo, cromo y cadmio (ver Tabla 1). (Castro, 2017).

Tabla 1. Efectos por exposición de Plomo, Cromo, Cadmio, Arsénico y mercurio.

Elemento	Efecto en vegetales	Efecto en la salud	Fuentes de contaminación
Plomo	Inhibe la fotosíntesis y los efectos enzimáticos.	Los niños pueden tener pequeños déficits de atención y problemas de aprendizaje. Adultos trastornos renales e hipertensión.	Corrosión de tuberías en viviendas, deterioro de depósitos naturales.
Cromo	Degrada la estructura del cloroplasto e inhibe la fotosíntesis.	Dermatitis alérgica.	Aguas residuales de acerías y papeleras, erosión de sedimentos naturales.
Cadmio	Inhibe la fotosíntesis así como la síntesis de clorofila y la transpiración.	Daño renal	Corrosión de tuberías galvanizadas, erosión de depósitos naturales, aguas residuales de refinerías de metales y desechos de pintura.
Arsénico	A medida que se inhibe la producción de enzimas, se obstruye la clorofila de las hojas.	Daño en la piel, problemas circulatorios, riesgo alto de cáncer.	Erosión de sedimentos naturales, aguas residuales de procesos de fabricación de vidrio y electrónica.

Prieto *et al.*, (2009).

El peligro está en la tendencia a la bioacumulación en los campos agrícolas. La bioacumulación se refiere al aumento en la concentración de una determinada sustancia química en el organismo dentro de un cierto período de tiempo. Esta concentración aumenta a medida que ascienda a la cadena trófica (Prieto *et al.*, 2009).

La toxicidad en las células depende de su estado de oxidación: redox activos (Fe, Cu, Cr y Co) que alteran el equilibrio redox estimulando la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) mediante la reacción de Fenton y Haber- Weiss; y los redox inactivos (Cd, Zn, Ni, Al, As) que interaccionan con el mecanismo de defensa antioxidante, impidiendo la cadena de transporte de electrones o bien produciendo peroxidación lipídica (Yadav, 2010). Frente a estos daños las plantas desarrollan mecanismos para defenderse y así frenar la toxicidad que ocasionan los metales pesados, los más importantes se mencionan a continuación:

- Retención de los metales pesados en la membrana plasmática.
- Bloqueo de entrada y transporte por cambio en el pH de la rizósfera y el almacenamiento en la vacuola.
- Síntesis de agentes quelantes de metales pesados, como fitoquelatina y metalotioneína.
- La síntesis orgánica de polifenoles, como flavonoides y taninos que se asocian con sistemas de defensa de las plantas que tienen efectos antioxidantes.
- Inducción de mecanismos que contrarresten los efectos dañinos de ROS como la producción de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX) y catalasa (CAT) (Pérez, 2015).

2.2.1. Metales pesados y contaminación en agua

El uso excesivo de los recursos naturales y el mal manejo de los residuos sólidos urbanos son los principales mecanismos por los que el agua subterránea es contaminada, principalmente los de la industria contienen metales pesados que pueden ser perjudiciales para la salud humana, el medio ambiente, animales y la gran mayoría de plantas. De acuerdo a la OMS la presencia de metales pesados en agua potable se debe a diversas causas como el uso de fertilizantes y pesticidas, pero no atribuye a todos este origen tal es el caso del Cu, Pb y Zn. Su presencia se explica más por la corrosión en el interior de tuberías que sirven para la distribución del agua. Así como soldaduras, tuberías galvanizadas y accesorios metálicos de plomería, así como pila eléctricas pueden ocasionar contaminación del agua por Cd (Nozgarrry *et al.*, 2017).

El valle de Puebla es atravesado por dos importantes ríos, Atoyac y el Zahuapan después de la unión de estos, el río Atoyac atraviesa la ciudad de Puebla para descargar en la presa de Valsequillo sus aguas residuales, estas son vertidas al lago de sus cauces naturales con escaso tratamiento lo que genera una gran contaminación. El desarrollo industrial y la falta de saneamiento en la región han provocado en los últimos años un aumento de contaminación por falta de infraestructura de saneamiento, las cargas asentadas al margen de los ríos carecen de tratamiento por lo que contribuyen a su contaminación (Bonilla *et al.*, 2015).

Por otra parte lo que reporta Norzagary *et al.*, (2017) en su estudio realizado en el valle de Puebla encuentra que en los estudios realizados para cobre y zinc se encuentran dentro de los límites permisibles por la normatividad mexicana, los metales cadmio y plomo superaron significativamente el límite permitido.

2.3. MECANISMO DE DEFENSA DE LAS PLANTAS FRENTE AL ESTRÉS

2.3.1. Concepto de estrés en fisiología vegetal

El término estrés en plantas se define como respuesta bioquímica o fisiológica desfavorable que afecta o dificulta el crecimiento de la planta, estas condiciones promueven una respuesta de defensa que implica genes que codifican proteínas para reparar el daño celular sintetizando metabolitos secundarios con características antimicrobianas y antioxidantes. Los compuestos bioactivos incluyen terpenos, compuestos fenólicos totales, alcaloides etc. Estos se obtienen por diferentes rutas metabólicas como la del ácido shikímico, mevalonato por mencionar algunas. Por lo que el estrés se define como cualquier factor ambiental biótico o abiótico que reduce o aumenta la tasa de algún proceso fisiológico (Grumezescu *et al.*, 2017).

2.3.2. Estrés abiótico y biótico

El estrés abiótico incluye factores como la salinidad, la sequía, las temperaturas extremas (calor, frío, congelación) y la radiación UV. También se encuentran factores químicos como los metales pesados que contaminan el aire. El estrés biótico es causado por la acción de otros seres vivos: animales, otras plantas, microorganismos y otros agentes (Montoliu, 2010).

2.3.3. Mecanismos generales de respuesta al estrés

De acuerdo a Azcon *et al.*, (2008) la respuesta al estrés puede ser de diferentes tipos del más específico al más general y se pueden enlistar los siguientes mecanismos:

- Cambios en la actividad hormonal: la modificación de los niveles hormonales puede incrementar la resistencia al estrés.
- Alteraciones en el desarrollo de las plantas: Se reduce el número de células reproductivas que favorecen su desarrollo.
- El área de transpiración se reduce por la separación de los tejidos dañados quitando el foco de infección en estrés biótico.
- Síntesis de nuevas proteínas: ejemplos de estas proteínas son la ubiquitina y las proteasas, que intervienen en la degradación de proteínas dañadas, el plegamiento de proteínas desnaturalizadas por estrés y la prevención de la formación de agregados proteicos irreversibles.
- La síntesis de metabolitos secundarios protectores: por mencionar algunos: terpenoides, fenoles, alcaloides, etc.

2.3.4. Estrés oxidativo

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son formas parcialmente reducidas de oxígeno. A pesar del papel fisiológico que desempeñan, también dan lugar a reacciones de oxidación indeseadas contra las cuales los organismos han desarrollado defensas antioxidantes. Los daños que provocan las ROS son:

- inhibición de enzimas capaces de reaccionar con ellas.
- reacción con los pigmentos tipo clorofila causando su degradación.
- peroxidación de lípidos.,
- fragmentación del DNA producida por la reacción de los radicales hidroxil con las bases nitrogenadas difícil de reparar (Mano, 2002).

2.3.5. Respuesta sistémica

Las plantas pueden protegerse contra ataques de patógenos, artrópodos herbívoros, daño mecánico, o contacto con algunos químicos. Se ha observado que algún daño que recibe la planta la inmuniza contra infecciones posteriores, se sabe que el primer patógeno o daño induce la expresión de reacciones de resistencia contra subsecuentes infecciones. Esta capacidad de las células para repeler los ataques subsecuentes, se dispersa a través de toda la planta, a esta respuesta se le llama resistencia sistémica adquirida (RSA). La fuerza y

estabilidad de la resistencia inducida durante semanas pueden ser influenciadas por factores como las condiciones climáticas y la nutrición (Camarena *et al.*, 2007).

2.3.6. Mecanismo de acción de defensa de plantas vs metales pesados

Las plantas fueron desarrollando métodos para absorber y almacenar los nutrientes que no necesita debido a un mecanismo electroquímico. La fitotoxicidad de los metales pesados se presenta en suelos particularmente ácidos que ocasionan estrés oxidativo afectando la fotosíntesis, su crecimiento y formación de raíces (Ruíz, 2012).

Estos mecanismos les han permitido a las plantas desarrollar 3 estrategias básicas para resistir a los elevados niveles de metales acumulados en sus tejidos que serían extremadamente tóxicos para otro organismo. Estas estrategias son:

- 1) exclusión: poca acumulación del metal en la parte aérea de la planta. Otras acumulan el metal en la parte aérea en una forma no toxica para la planta, siendo la exclusión la más característica de las especies sensibles tolerantes a los metales.
- 2) bio indicadora: este mecanismo se caracteriza porque las plantas almacenan metales en sus tejidos, expresando los niveles que existen en el suelo.
- 3) hiper acumulación: se caracteriza por la capacidad de las plantas de reservar metales en sus tejidos en concentraciones altas. Presentan bajo contenido de biomasa debido a que utilizan más energía en los procesos biológicos para adaptarse a concentraciones altas de metales.

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distinto grado adoptando diferentes estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker *et al.*, 2000).

Los cambios evolutivos son la razón por la que diferentes mecanismos intentan inactivar el metabolismo de elementos que representan un riesgo para la integridad celular. Estos mecanismos se dividen en 2 tipos:

- 1) La co-tolerancia es el resultado de mecanismos determinados que permiten tolerancia a varios metales.
- 2) Tolerancia múltiple en la que se utiliza una serie de mecanismos independientes entre sí para producir tolerancia para cada metal o múltiples metales que interactúan para evitar

daños a las plantas, las evidencias indican que esta tolerancia se presenta en la mayoría de las plantas (Macnair *et al.*, 2000).

Considerando la presencia de estas tolerancias en las plantas se dividen los posibles mecanismos en las siguientes formas:

1) Mecanismos externos de tolerancia.- influenciados por microorganismos entre los que se encuentran los hongos micorrícicos.

2) Mecanismos internos de tolerancia.- este tipo de mecanismos consideran a los exudados radicales que están formados principalmente por ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AO) generados principalmente a partir del ciclo del ácido tricarboxílico. La resistencia a los metales en este sistema de radicales libres se debe a su capacidad para afectar la solubilidad de elementos esenciales y no esenciales mediante procesos de acidificación, quelación, precipitación y redox (Salt *et al.*, 2000).

Cuando el metal entra en contacto con las puntas de las raíces, se puede producir AO en la planta, lo que activa el flujo de AO, lo que permite que AO ingrese a las células a través de diferentes vías. Inducirá el metabolismo de AO y se producirá la protonación de compuestos orgánicos, y luego los protones se transferirán al citosol para formar complejos con cationes no esenciales. Además, el pH citoplasmático permanece estable a través de la función de coordinación del transportador de AO y el canal de K (Ryan y Dehlaize, 2001).

El secuestro de metales está relacionado al incremento de la actividad de la peroxidasa que estimula la biosíntesis de la lignina en respuesta al estrés causado por metales como Zn, Cu, Cd (Carrier *et al.*, 2003).

A continuación se mencionan los mecanismos internos de tolerancia:

Quelación de los metales en el citosol por diversos ligandos: los ligandos como las fitoquelatinas, las metalotioneínas, los ácidos orgánicos, las proteínas de estrés térmico y los aminoácidos favorecen la desintoxicación manteniendo una concentración estable de iones de metales de citosol (Clemens, 2001).

Fitoquelatinas: el mecanismo de acción consiste en la formación de complejos no tóxicos con iones de metales mediante la interacción con los grupos tioles de cisteína formando un complejo FQ-metal de bajo peso molecular, consecutivamente se une a iones sulfuro (S^{2-}) en el citosol formando moléculas complejas de alto peso molecular (CAPM). Después estas moléculas traspasan el tonoplasto entrando a la vacuola y los ácidos orgánicos que se

encuentran ahí como el malato, citrato y oxalato detienen a los iones de los metales disociando el complejo FQ- metal. Aunque todavía no está claro que le ocurre a las fitoquelatinas una vez separada del metal, sin embargo se explica que las FQS pueden ser degradadas en la vacuola o pueden retornar al citoplasma para formar nuevos complejos con los iones de los metales (Gadapati y Macfie, 2006).

Otra hipótesis sobre la protección de las plantas contra el estrés, se basa en la síntesis de productos que proceden del metabolismo secundario. Esta protección requiere que el metal incremente la resistencia de la planta frente al factor que causó el estrés (Martens *et al.*, 1994; Vázquez *et al.*, 2006).

Hay dos categorías de fitorremediación en suelos contaminados con metales pesados: fitoestabilización de plantas y extracción de plantas.

- Fitoestabilización se buscan géneros excluyentes que almacenen una cantidad alta de metales en la raíz y así impedir que se transfieran a la parte aérea de la planta y estar al alcance para otros seres vivos.
- Fitoextracción se buscan especies de tipo acumuladoras, hiperacumuladoras donde el contaminante sea transportado de la raíz a la parte aérea de la planta y posteriormente pueda ser cosechado y confinado (Volke-Sepulveda *et al.*, 2005).

Para saber si una especie vegetal puede ser utilizada en un tratamiento de fitorremediación se tiene que tomar en cuenta el factor de bio concentración (FBC) y el factor de traslocación (FT). El FBC establece la eficacia que tiene la planta para almacenar en su tejido el metal que procede del suelo y se calcula así:

$$FBC = \frac{\text{concentración de metales en el tejido}}{\text{concentración de metales en el suelo}}$$

Cabe mencionar que la sensibilidad de las especies vegetales a los metales pesados varía considerablemente a través de familias, reinos y las diferentes respuestas de las plantas a los metales pesados puede ser atribuida a factores genéticos y fisiológicos (Ali *et al.*, 2013).

2.4. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE ONDA DE LA LUZ SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

2.4.1. El espectro electromagnético

La luz y las diversas radiaciones son expresiones de energía que viajan en el espacio a la máxima velocidad permitida: la velocidad de la luz. El sol nos provee de la mayor parte de la energía que los seres vivos requieren en el planeta, la manera directa nos llega en forma de luz o radiación (usada en procesos fotosintéticos). La luz y la radiación pertenecen a un rango muy amplio que se denomina espectro electromagnético, el espectro se ha dividido en diferentes regiones, pero no tienen límites estrictos entre regiones cercanas. Se utilizan estos parámetros para referirse al espectro electromagnético: frecuencia y longitud de onda (Skoog, 1998).

Se divide en diferentes regiones espectrales que tienen límites arbitrarios. El desarrollo de aplicaciones en diferentes regiones depende de la capacidad técnica para producir fuentes de radiaciones adecuadas y detectores o medidores sensibles a estas regiones. En la Tabla 2 se indica los rangos aproximados de frecuencias (Hz ó ciclos/seg) y longitudes de onda (metros) y energías promedio (eV) de las diferentes regiones del espectro electromagnético (Fontal, 2005).

Tabla 2. Espectro electromagnético (rangos aproximados).

Región	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda	Energía del fotón (eV, promedio)
Rayos gamma	10^{22} - 10^{19}	10^{-11} - 10^{-14}	1010
Rayos-X	10^{17} - 10^{20}	10^{-8} - 10^{-11}	105
Ultravioleta	10^{15} - 10^{17}	10^{-6} - 10^{-8}	103
Visible	10^{14} - 10^{15}	4×10^{-6} - 7×10^{-6}	1
Infrarrojo	10^{11} - 10^{14}	10^{-3} - 10^{-5}	10-mar
Microondas	10^9 - 10^{11}	10^{-1} - 10^{-3}	10-may
Ondas de radio	10^3 - 10^9	10^5 - 10^{-1}	oct-15

2.4.2. Espectroscopia Ultravioleta y Visible

La radiación ultravioleta (UV), luz visible (Vis) y la luz infrarroja (IR) son parte de la región visible del espectro electromagnético. Al considerar el impacto de la radiación ultravioleta en la salud humana y el medio ambiente, los rayos ultravioleta generalmente se subdividen en UVA (380-315nm), también conocida como onda larga o luz negra y UVB (315-280nm) además conocida como onda media y UVC (200-280nm). El espectro visible es una porción pequeña del espectro electromagnético y cualquier energía producida en esta estrecha banda producirá la sensación de visión cuando estimula el ojo humano normal (Fontal, 2005).

En la Tabla 3, podemos ver los rangos de longitud de onda expresados en nm y los diferentes colores a los que corresponden.

Tabla 3. Rangos de longitud de onda (nm) para diferentes colores del espectro visible.

Rojo	650-750 nm	Azul	435-480
Naranja	590-650	Índigo	420-440
Amarillo	580-595	Violeta	400-435
Verde	500-560	Púrpura	No es un color espectral puro

Cada banda del espectro visible produce una sensación de color diferente, la división entre colores no es fina sino una transición gradual de uno al otro. Esta técnica mide la interacción de moléculas con la radiación electromagnética, la luz que se encuentra en la luz visible y la luz ultravioleta de los espectros electromagnéticos presenta una energía de 150-400 kJmol⁻¹. La energía de la luz es usada para promover electrones de un estado de excitación a otro, por lo que esta técnica se considera excelente para seguir reacciones de catálisis (Christian, 1981).

2.4.3. Tipo de luz y su efecto en plantas

La radiación solar es importante porque constituye la base sobre la cual se organiza la vida en nuestro planeta, la participación de la luz en el crecimiento de las plantas es compleja y tiene 2 funciones importantes en el crecimiento de las plantas como fuente de energía para la fotosíntesis o para regular el momento de la floración. Los seres vivos pueden usar la

mayor parte del espectro electromagnético que cae sobre la superficie de la Tierra, especialmente la parte visible del espectro que llamamos luz. Por lo tanto, el crecimiento de las plantas y su desarrollo a veces se alteran como respuesta a los cambios en el color de la luz irradiada y su longitud de onda (Nguy *et al.*, 2015).

Algunos de los efectos de las diferentes longitudes de onda en las plantas son las siguientes

- El rango de longitud de onda entre 400nm y 520 nm corresponde al espectro visible e incluye luz violeta, azul y verde. Tiene una fuerte influencia en el crecimiento vegetal y la fotosíntesis.
- Entre 520nm y 610 nm corresponde al rango de longitud de onda del espectro visible, está compuesto por luz verde, amarilla y naranja. Teniendo poco efecto en el desarrollo vegetativo y la fotosíntesis.
- En el rango de 610nm y 720 nm pertenece al espectro visible que comprende luz roja. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo, fotosíntesis, floración y germinación (Ramos y Ramírez, 2016).

En la mayoría de los casos, las plantas tienen la capacidad de responder a la calidad de la luz de diferentes formas. La calidad de la luz puede entenderse como el color o la longitud de onda, su intensidad (es decir, la densidad del flujo de fotones) y una combinación de ambas. Este aspecto es de gran importancia en las comunidades vegetales, cultivos y los ecosistemas vegetales, porque las plantas absorben un cierto rango de radiación incidente y transmiten la radiación no absorbida a las plantas cercanas (Nguy *et al.*, 2015).

Las hojas y tallos de las plantas absorben fotones en el rango azul y rojo del espectro visible. También poseen diferentes tipos de fotorreceptores que les sirven para relacionarse con la captación de luz y facilitar el control de los procesos involucrados en el proceso de homeostasis (Stroch *et al.*, 2015).

El crecimiento de los vegetales se ve afectado por factores como la intensidad y la calidad de la luz que es captada por órganos encargados de realizar la fotosíntesis. Por lo tanto cuando se generan cambios en la calidad o intensidad de la radiación se producen afectaciones en la anatomía y fisiología de la planta, influenciados por el color o longitud de onda que llega a la superficie de las hojas (Johkan *et al.*, 2010).

Los cultivos de interior solo emiten longitudes de onda de luz correspondientes a valores cercanos al pico de absorción del proceso fotoquímico de la planta, que se encuentran entre 400nm y 500 nm y entre 600 y 700 nm. Estas longitudes de onda estimulan la germinación, crecimiento vegetativo, desarrollo y floración de las plantas (Ramos y Ramírez, 2016).

La luz artificial que es usada para el crecimiento de las plantas funciona de la siguiente manera:

- Aporta la luz que necesita la planta.
- En invierno complementa la luz natural que recibe la planta.
- Extienden el periodo de exposición de luz con el propósito de aumentar su crecimiento y floración.

Esta tecnología es importante porque estos dispositivos pueden colocarse muy cerca de las plantas para emitir un alto flujo de luz, no producen luz ultravioleta ni infrarroja, lo que es un alivio para quienes están expuestos a los cultivos verticales. Un aspecto importante de las luces LED es que la luz generada se concentra en la parte exterior del dispositivo, siendo diferente a otros sistemas de iluminación. El desafío es encontrar la relación de longitudes de onda correcta y más apropiada para la producción de semillas para reducir costos relacionados con la energía y aumentar la calidad de la producción (Macías *et al.*, 2012).

2.4.4. Efecto de la luz UV-C en hortalizas

En varios estudios sobre la aplicación de luz UV-C en hortalizas indican un incremento de compuestos fenólicos totales así como capacidad antioxidante que pueden inducir a mecanismos de defensa. Además la irradiación con luz UV-C aplicada como tratamiento poscosecha aumenta la concentración de flavonoides. Este tipo de luz puede usarse para generar estrés abiótico para estimular metabolitos secundarios tanto de frutas como de hortalizas, sin embargo este efecto depende de varios factores como el tipo de irradiación UV-A, UV-B y UV-C (Ávila *et al.*, 2016).

Este procedimiento puede impulsar una respuesta de defensa natural de las plantas provocando la biosíntesis de fitoalexinas aumentando la producción de enzimas como la fenilalanina amonio liasa y la actividad quitinasa. Se propone que a dosis altas de radiación

se puede estimular los procesos necesarios en las células generando cambios efectivos en la homeostasis de las plantas. Estos cambios están en función de la dosis y de las características del alimento, así que un tratamiento correcto con radiación UV-C debería presentar reducción de carga microbiológica, no tener efectos negativos en los atributos sensoriales del alimento y aumentar características nutrimentales propias del producto (Haro y Guerrero, 2013).

2.4.5. Luz azul

La luz azul es uno de los factores que influye como regulador de procesos fisiológicos no solo actúa como un sustrato energético. La luz azul afecta aspectos del crecimiento y desarrollo en la planta. El mecanismo de defensa a la exposición de este tipo de luz es la inhibición de la elongación del hipocótilo, la regulación de la floración, la curvatura fototrópica, la apertura estomática así como la regulación de los genes. Este tipo de luz azul también es útil para inducir niveles más altos de actividad antioxidante y contenido de polifenoles totales (Casierra y Pinto, 2011).

2.5. ANTIOXIDANTES EN PLANTA DE JITOMATE

3.5.1. Mecanismo de acción de los antioxidantes frente a radicales libres

Los compuestos antioxidantes pueden disminuir la oxidación mediante la captación de radicales libres. Recordando que un radical libre se define como cualquier especie capaz de contener uno o más electrones libres en forma de singulete, esta presencia de electrones libres hace que los mismos sean altamente reactivos debido a que requieren otro electrón para completar el orbital y volverse estables. Las estructuras químicas así como sus mecanismos de acción de los compuestos antioxidantes llegan a ser muy variados, los antioxidantes pueden ser moléculas capaces de neutralizar los radicales libres aceptando o donando electrones, para eliminar la condición desapareada del radical. Las moléculas antioxidantes pueden reaccionar directamente con los radicales reactivos y destruirlos, aunque también puedan convertirse en nuevos radicales que son menos peligrosos que los radicales que neutralizaron (Jian-Ming *et al.*, 2010).

2.5.2. Antioxidantes presentes en plantas de jitomate

El contenido de antioxidantes en el jitomate puede variar de acuerdo con la ubicación en el fruto, se reporta que el pericarpio del jitomate contiene los niveles más altos de antioxidantes principalmente flavonoides (chalcona, naringenina, rutina y quercetina glicósido), compuestos fenólicos, ácido ascórbico, carotenoides totales y licopeno. Se considera al licopeno, flavonoides, compuestos fenólicos, vitaminas C y E, como responsables de la actividad antioxidante de los jitomates tanto crudos como procesados (Toor y Savage, 2005).

La pulpa y las semillas contienen minerales (Fe, Mn, Zn y Cu), así como ácidos grasos monoinsaturados como el oleico (Steward *et al.*, 2000; Toor y Savage, 2005).

Carotenoides: se sabe que una molécula de β -caroteno puede reaccionar captando hasta 1000 moléculas de oxígeno singlete. También los carotenos son capaces de captar radicales peroxilo a través de la adición de este radical a sistemas conjugados; de esta manera el radical se estabiliza por resonancia (García, 2004).

El ácido ascórbico: también conocido como vitamina C protege contra el daño oxidativo de los componentes celulares y lipoproteínas circulantes, se encuentran en ácido L-ascórbico y ácido dehidroascórbico. El ácido ascórbico es un aceptor de radicales muy efectivo frente a superóxidos, peróxido de hidrógeno, hipoclorito y oxígeno singlete (Yanishlieva-Maslarova, 2001).

Los flavonoides: son compuestos polifenólicos que se forman en las plantas a partir de aminoácidos aromáticos fenilalanina y tirosina. La capacidad antioxidante de los flavonoides se debe a las propiedades redox de los grupos hidroxifenólicos y de las diferentes partes de la estructura química. Tienen excelentes propiedades de quelación de metales de transición por lo que desempeñan un papel importante en la protección frente a fenómenos de daño oxidativo, el mecanismo exacto aún no es muy claro sin embargo estudios recientes explican que la actividad antioxidante puede basarse en la donación de hidrógeno (Williams *et al.*, 2004).

Los compuestos fenólicos: están formados por un anillo aromático unido por lo menos a un grupo oxhidrilo, pero con otros sustituyentes en el anillo se forman ácidos fenólicos como el ferúlico, cumárico y cinámico. Los compuestos fenólicos pueden funcionar como antioxidantes a través de dos mecanismos principales:

a) captadores de radicales libres: se comportan como donantes de hidrogeno o electrones evitando las reacciones en cadena en donde se encuentran los radicales libres. El radical fenoxilo formado es poco reactivo porque se estabiliza por resonancia en el anillo aromático.

b) quelantes: en esta reacción se necesita la presencia de grupos hidroxilos cercanos al anillo aromático. De este modo los o-dihidroxifenoles son secuestradores efectivos de iones metálicos e inhiben la generación de radicales libres por la reacción de Fenton (García, 2004).

3. JUSTIFICACIÓN

El consumo de hortalizas como el jitomate ha ido en aumento debido al alto contenido de nutrientes que posee. Sin embargo, una de las principales problemáticas que presentan es la contaminación con los metales pesados en los sistemas agrícolas de producción intensiva debido al uso de diferentes sustancias para mantener su rendimiento, calidad e inocuidad entre los que destacan los plaguicidas y fertilizantes. De la misma forma, es utilizada agua para su riego, la cual puede contener metales pesados como Pb, Cr, Cd; lo que ocasiona contaminación en jitomates, así como un impacto en los nutrientes. Cuando estos frutos son consumidos pueden ocasionar enfermedades en humanos y animales, como también impactar al medio ambiente de la misma forma (Mancilla *et al.*, 2012).

Se ha buscado una alternativa a estos problemas, y una de las tecnologías por su versatilidad y resultado es el uso de radiación ultravioleta de onda corta y luz azul para el procesamiento de alimentos en cosecha y poscosecha. Las radiaciones con luz UV y visible pueden estresar de manera abiótica a las plantas y desencadenar la producción de metabolitos secundarios capaces de quelar los metales pesados contaminados de las plantas. Por lo anterior, el estudio de este tipo de agentes quelantes en plantas de jitomate es de gran interés toda vez que se buscaría con esto reducir la presencia de los mismos en los frutos y en consecuencia en humanos.

4. OBJETIVOS

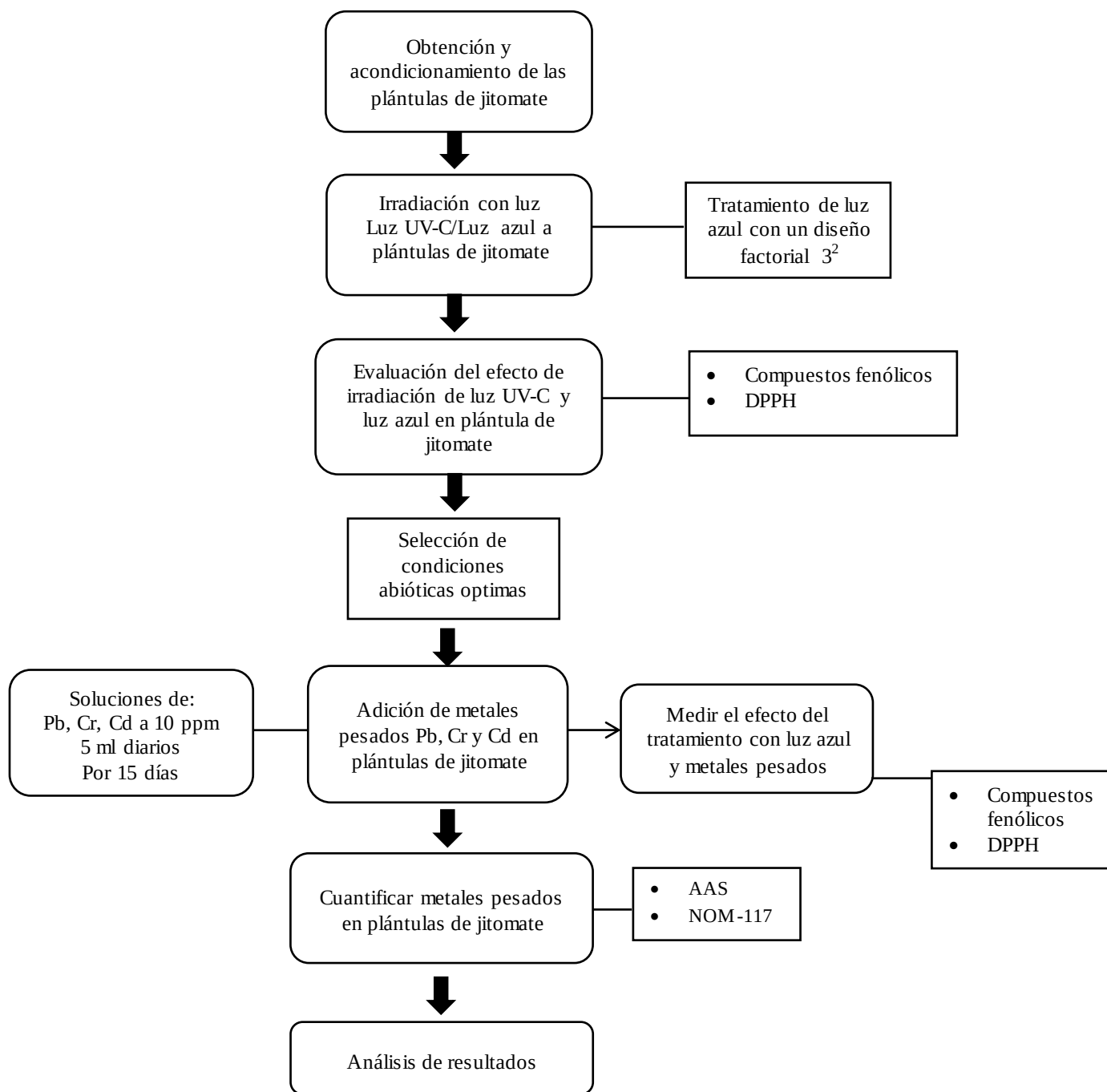
Objetivo general

Evaluar el efecto de la luz UV-C y luz azul sobre la capacidad antioxidante en plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) mediante técnicas de DPPH y fenoles totales para analizar su posible quelación de metales pesados por medio de absorción atómica.

Objetivos particulares

- Evaluar el efecto de luz UV-C y luz azul sobre los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*)
- Valorar el efecto de la adición de metales pesados Plomo, Cromo, Cadmio sobre la capacidad antioxidante de plántulas de jitomate.
- Cuantificar el efecto de la aplicación de luz y metales pesados sobre los compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de las plantas.
- Cuantificar los metales pesados presentes en las plántulas de jitomate irradiadas con luz azul, mediante absorción atómica.

5. PLAN DE TRABAJO



6. METODOLOGÍA

6.1. Material vegetal

Las plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) que se utilizaron fueron adquiridas en InnovusCor empresa dedicada al diseño de áreas verdes y desarrollo de proyectos productivos y sustentables. Ubicada en Tlaxco No. 929 colonia La Paz, Puebla.

6.2. Obtención de plántulas de jitomate

Primero se inició con la siembra, la que se realizó de forma indirecta por medio de un semillero de 30 tapones (56 x 26 cm) con una mezcla de vermiculita y perlita (3:1). Durante este periodo se suministró una humedad constante entre 65 y 70% y temperatura entre 25°C.

Posteriormente la germinación, luego de 15 y 20 días después de la siembra a temperatura de 25°C y donde recibieron al menos 6 horas de luz solar.

Luego se trasplantaron las plántulas de jitomate a un recipiente de 200 ml donde se mezcló perlita 50% y vermiculita 50%. Las plántulas fueron tratadas con una solución nutritiva de HidroViva® e irradiación con luz UV-C y luz azul (Chung *et al.*, 2019).

6.3. Evaluación y tratamiento de irradiación de luz UV-C y luz azul

Para evaluar el efecto de la luz UV-C y luz azul se realizó un diseño factorial 3^2 variando los tiempos de exposición a las plántulas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Tratamiento de irradiación con luz UV-C y luz azul a plántulas de jitomate.

Luz UV-C 254 nm (minutos)	Luz azul 420-460 nm (minutos)
0	0
0	30
10	0
10	30
5	30
10	15
5	15
5	15
5	0

Los 9 tratamientos de radiación con luz UV-C y luz azul se realizaron en las plántulas de jitomate usando 30 plántulas por cada tipo de luz y por cada tiempo (luz UV-C 0, 5, 10 minutos y luz azul 0, 15, 30 minutos) dando un total de 180 plántulas irradiadas. Recibieron la dosis de luz en un periodo de 30 días, en el equipo de la Figura 1. Cabe mencionar que la dosis de luz UV-C y luz azul se propusieron de acuerdo con algunos ensayos preliminares realizados en el laboratorio (Ávila *et al.*, 2016).

Las dosis de irradiación de las lámparas se llevaron a cabo utilizando un radiómetro digital Lightmeter (Modelo DT-1309 con una interfaz RS-232, Londres, Reino Unido).

Para luz azul (Modelo TLD 30W/03 Aqua Coral, Philips, DF, México).

Para luz UV-C (Modelo G15T8, General electric, Connecticut, EE. UU).



Figura 1. Equipo de irradiación.

6.4. Obtención de los extractos

Se obtuvieron los extractos de las plántulas de jitomate después del tratamiento de las mismas con irradiación con luz UV-C (0, 5, 10 minutos) y luz azul (0, 15, 30 minutos) ver Tabla 3.

Las plántulas de jitomate se deshidrataron a 50°C por 24 horas y posteriormente, se realizó la extracción del material biológico. Se pesó 1 g de plántula seca y se combina con 25 ml de metanol para su extracción. La mezcla se dejó en agitación constante por 30 minutos a temperatura ambiente, posteriormente se filtró el extracto obtenido y se almacenó a 4 °C para su posterior análisis (Hernández *et al.*, 2016).

6.5. Determinación de compuestos fenólicos totales

Para la determinación de fenoles totales se utilizó el reactivo de Folin-Ciocalteu, el método se fundamenta en su carácter reductor y es el más empleado. La absorbancia que pertenece al color azul se mide en el rango de 765 nm.

Para la determinación de compuestos fenólicos totales se adicionó en un tubo de ensayo 1 mililitro de reactivo de Folin-Ciocalteu (0.1 N), 500 µL de etanol 90%, luego se mezcló con 500 µL de extracto vegetal, después de 3 minutos, se añadió 1 ml de Na₂CO₃ (0.5%). La mezcla se almacenó durante 30 minutos en oscuridad y temperatura ambiente.

Finalmente se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis a 765 nm. Se realizó una curva de calibración con ácido gálico como estándar, el contenido de fenoles totales se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico GAE/100 mg presentes en cada extracto.

6.6. Determinación de la capacidad antioxidante.

Se basa en la medida de la absorbancia del radical DPPH. La actividad antioxidante de los tratamientos se realizó según la metodología propuesta por Hernández y colaboradores (2016). Se mezcló en un tubo de ensayo 1 ml de DPPH (0.004%) más 500 µL de etanol al 90% y 500 µL de extracto vegetal, luego se almacenó; durante 30 minutos en un lugar oscuro a temperatura ambiente. Posteriormente, se leyó la absorbancia de las soluciones en un espectrofotómetro UV-Vis 517 nm. La curva de calibración que se realizó para expresar la actividad antioxidante se midió en equivalentes de trolox (µM/g).

6.7. Análisis estadístico

Todos los análisis fueron realizados por triplicado. Los resultados fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa MiniTab 18. Se seleccionó un nivel de confianza del 95% y la prueba de Tukey para decidir diferencia significativa entre los resultados.

6.8. Tratamiento de luz azul a plántulas de jitomate

Las plántulas de jitomate se sometieron al tratamiento previamente evaluado de irradiación de luz, como se muestra en la Figura 2. Siendo el tiempo seleccionado de 15 minutos y de luz azul.



Figura 2. Tratamiento con luz azul a plántulas de jitomate.

6.9. Adición y evaluación de metales pesados sobre la capacidad antioxidante de las plántulas de jitomate

Se valoró el efecto de la adición de metales pesados en el desarrollo de las plántulas de jitomate. Se aplicaron soluciones de los metales plomo, cadmio y cromo a 10 ppm en cantidades de 5 ml diarios durante 15 días como se muestran en la Tabla 5 (Martins *et al.*, 2017).

Tabla 5. Tratamiento de adición de metales pesados a plántulas de jitomate.

Tratamiento	Metal pesado
control	Ninguno
control	Cadmio
control	Cromo
control	Plomo
Luz azul	Ninguno
Luz azul	Cadmio
Luz azul	Cromo
Luz azul	Plomo

El efecto del tratamiento de irradiación de luz azul y la adición de metales pesados en los 8 tratamientos se valoró mediante la capacidad antioxidante de plántulas de jitomate, con la técnica de DPPH y fenoles totales.

6.10. Cuantificación de metales pesados presentes en las plántulas de jitomate mediante absorción atómica

Para realizar este análisis se tomó como referencia “NOM-117-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimento, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica” Esta determinación se realizó en el laboratorio BioIndu ubicado en 39 poniente No.928 colonia Gabriel Pastor Puebla, Puebla.

Acondicionamiento. Las muestras de plántulas de jitomate se molieron en un mortero con pistilo, se pesaron y almacenaron en el laboratorio.

Digestión por vía seca. Se hizo por vía seca, las muestras de plántulas de jitomate se incineraron en una mufla. Las muestras fueron transferidas a un crisol de porcelana previamente tarado, las muestras se introdujeron en la mufla y se sometieron a calentamiento a 550°C por 6 horas. Posteriormente se sacaron los crisoles hasta llegar a una temperatura ambiente en la mufla.

Posteriormente se agregó 5 ml de HNO₃ concentrado por las paredes del crisol y se aforo a 100 ml de agua des ionizada, se dejó en reposo por 14 horas. Se filtró en papel whatman No. 2 y recolectando en un matraz aforado de 100 ml antes de la determinación y por último se aforo con agua de ionizada.

Estándares de calibración

Se preparó el estándar de calibración utilizando el mismo tipo de ácido y la misma concentración en la muestra después de la digestión. La concentración de los estándares fue de 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.6, 3.2 y 6 ppm para todos los metales. Con el mismo porcentaje de acidez con el que las muestras son preparadas.

Se corrió un blanco de reactivos y de digestión, y se procedió, a leer en el espectrofotómetro de absorción atómica.

Una vez que se obtuvo la muestra lista para ser empleada en el espectrofotómetro de absorción atómica con llama, se eligió la longitud de 250 nm con lámpara de cátodo hueco. Posteriormente se trazó la curva de calibración de absorbancia mediante el uso de equipo de cómputo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Evaluación del efecto de irradiación de luz UV-C y luz azul sobre plántulas de jitomate mediante técnicas de compuestos fenólicos totales y DPPH

Los resultados del efecto del tratamiento de irradiación con luz UV-C y luz azul sobre los compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante se presentan en la Tabla 6.

La luz es un factor primordial en el desarrollo de las plantas, diversos estudios señalan que tienen la capacidad de responder de diferentes formas a la irradiación de luz porque las plantas poseen diferentes tipos de fotorreceptores que absorben la luz (Ávila *et al.*, 2016).

Se observa el efecto de las diferentes dosis de radiación para promover la síntesis de metabolitos secundarios en ambos tratamientos, siendo la capacidad antioxidante la que muestra mayor incremento. Aunque los estudios relacionados con los efectos de la luz son relativamente nuevos se puede atribuir este resultado a que la capacidad antioxidante que se encuentra en la parte de tallo y hoja de la planta (Stroch *et al.*, 2015) y cabe recordar que se analizó solo la plántula de jitomate, en cuanto a la aplicación de la luz UV-C diversos autores mencionan que ayuda a incrementar compuestos fenólicos, sin embargo dosis altas puede ocasionar daño al tejido vegetal por lo tanto este tipo de luz depende de factores como la dosis y tiempo.

Tabla 6. Evaluación del tratamiento de irradiación de luz UV-C y luz azul y su influencia en la capacidad antioxidante.

Tiempo de radiación (minutos)	Fenoles totales mgGAE/10	Capacidad antioxidante mg/Trolox/100
Luz UV-C		
0	50.44	138.76
5	65.72	155.36
10	72.93	167.24
Luz azul		
15	73.72	180.41
20	64.62	152.46
30	62.01	146.94

7.2. Determinación de compuestos fenólicos totales

En la Figura 3 se muestran los resultados de compuestos fenólicos totales de las plántulas de jitomate, se observan los 6 diferentes tiempos de tratamiento de la luz UV-C y luz azul siendo el tiempo de 15 minutos el que presenta mayor cantidad de compuestos fenólicos con irradiación de luz azul, este tipo de luz es capaz de estimular los criptocromos aumentando compuestos fenólicos según lo que refiere Ávila *et al.*, (2016).

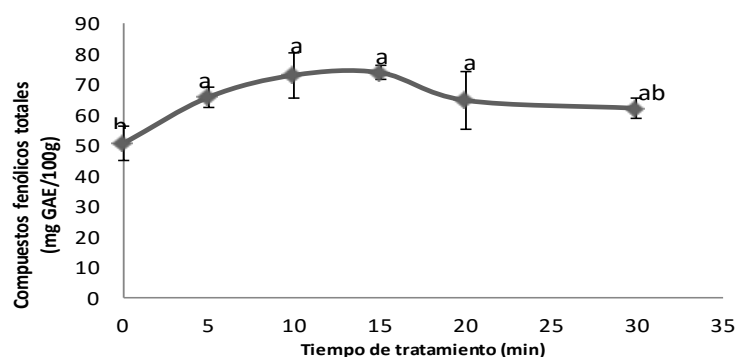


Figura 3. Evaluación de diferentes dosis de irradiación de luz UV-C y luz azul plántulas de jitomate y su efecto en los compuestos fenólicos totales.

7.3. Capacidad antioxidante

En la Figura 4 se muestran los resultados de la prueba de capacidad antioxidante por el método de DPPH.

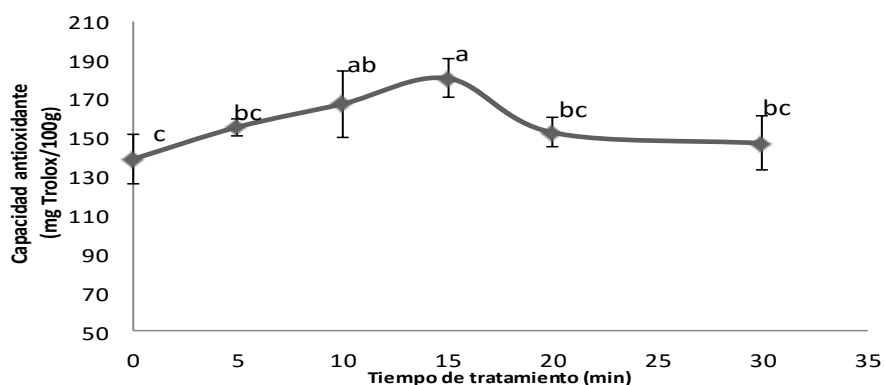


Figura 4. Evaluación de diferentes dosis de irradiación de luz UV-C y luz azul en plántulas de jitomate y su efecto en la capacidad antioxidante.

Se observa en la Figura 4 los tratamientos de capacidad antioxidante en plántulas de jitomate con irradiación de luz UV-C y luz azul presentando un incremento de capacidad antioxidante en comparación con compuestos fenólicos totales de acuerdo al análisis de relación de Pearson (0.841) indica una relación positiva entre las 2 variables a medida que la capacidad antioxidante aumenta el contenido de fenoles totales también va aumentando mostrando una correlación significativa. Sin embargo el incremento de metabolitos secundarios se refleja en el tiempo de 15 minutos con capacidad antioxidante y con irradiación de luz azul, el parámetro de tiempo y tipo de luz es clave para los siguientes estudios porque nos señala las condiciones óptimas para estimular los fotorreceptores que inducen la producción de compuestos antioxidantes, la activación de enzimas antioxidantes como la fenilalanina amonio-liasa (PAL) (Ávila *et al.*, 2016).

7.4. Cuantificación del efecto de la adición de luz azul y metales pesados sobre la capacidad antioxidante de las plántulas de jitomate

En la Figura 5 se observan los resultados de los tratamientos de las plántulas irradiadas con luces azules y contaminadas con metales pesados (Pb, Cr, Cd).

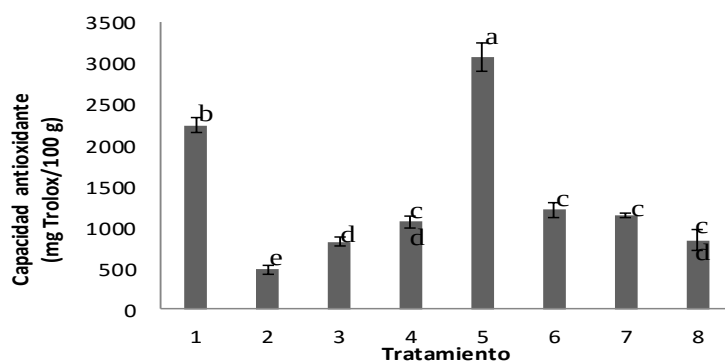


Figura 5. Capacidad antioxidante de plántulas de jitomate irradiadas con luz azul y contaminadas con metales pesados.

Se observa en la Figura 5 que el tratamiento que presentó mayor capacidad antioxidante fue el 5 ($p < 0.05$). Este tratamiento fue irradiado únicamente con luz azul. El tratamiento 2 fue contaminado con cadmio y sin aplicación de luz azul mostrando un bajo nivel de compuestos antioxidantes de acuerdo a Prieto *et al.*, (2009) el estrés producido por el

cadmio a las plántulas de jitomate ocasionan inhibición de la fotosíntesis dañando el tejido vegetal.

7.5. Cuantificación del efecto de la adición de luz azul y metales pesados sobre los compuestos fenólicos totales de las plántulas de jitomate

En la Figura 6 se aprecia el comportamiento de los compuestos fenólicos de los 8 tratamientos sometidos algunos a irradiación de luz azul y adición de metales como plomo, cromo y cadmio.

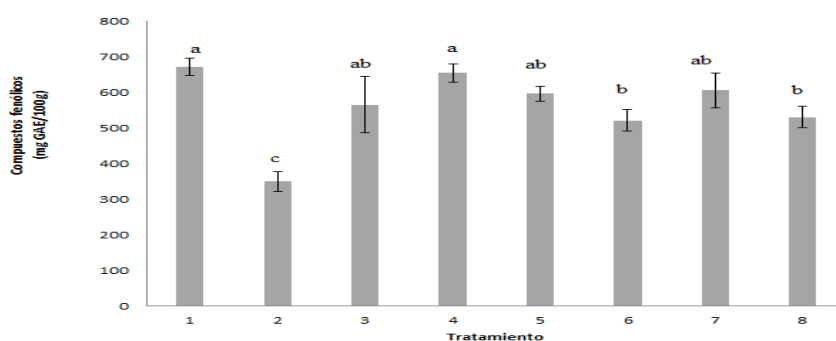


Figura 6. Comparación de compuestos fenólicos totales de plántulas de jitomate irradiadas con luz azul y contaminadas de metales pesados.

Se observa que el tratamiento que tuvo un aumento de compuestos fenólicos fue el 4, con contaminación de plomo y sin aplicación de luz azul respondiendo al estrés abiótico con los compuestos fenólicos propios de las plántulas de jitomate.

En el tratamiento 2 se aprecia el valor más bajo de compuestos fenólicos debido principalmente a que estos se encuentran en niveles altos en el fruto de la planta de jitomate (Steward *et al.*, 2000) y a la intoxicación de las plántulas por cadmio que inhibe la acción enzimática y la fotosíntesis.

7.6. Medición de los metales presentes en las plántulas de jitomate

En la Tabla 7 se muestran los tratamientos de plántulas de jitomate irradiadas con luz azul y adicionadas con metales pesados así como el resultado de cada uno de los tratamientos después de este proceso y la respuesta que tuvieron las plántulas al ser expuestas a estos factores de estrés abiótico.

Tabla 7. Comparación de los 8 tratamientos de plántulas irradiadas de luz azul y contaminadas con metales pesados y su respectivo factor de bioconcentración.

Muestra	Tratamiento	Metal pesado	Concentración de metales pesados en plantas (mg/L)	*Factor de Bioconcentración
1	Control	Ninguno	Ninguno	0.0043
2	Control	Cadmio	0.14	0.0002
3	Control	Cromo	0.28	0.0037
4	Control	Plomo	0.17	0.0023
5	Luz azul	Ninguno	Ninguno	0.0051
6	Luz azul	Cadmio	0.014	0.0002
7	Luz azul	Cromo	0.28	0.0037
8	Luz azul	Plomo	0.17	0.0023

* Determina la eficiencia con la que las plantas acumulan metales del suelo en sus tejidos. Valores mayores a 1 indican que la planta tiene capacidad de bio acumular el metal.

La concentración de las soluciones de Pb, Cr y Cd en riego fue de 75 mg/L. Se observa que la concentración de metales pesados medidos por absorción atómica fue diferente para cada tratamiento encontrando plomo y cadmio en los límites permisibles de acuerdo a la normatividad mexicana (ver Tabla 8) mientras que el cromo presentó valores altos en comparación con los otros 2 metales, se sabe que los efectos negativos del cromo en plantas es la degradación de la estructura de los cloroplastos que son los encargados de tomar la luz solar y utilizarla para hacer alimento para la planta, también llevan a cabo procesos metabólicos como la síntesis de metabolitos secundarios. Es importante señalar que el cromo también se puede encontrar en tuberías de agua desgastadas coadyuvando a generar un aumento de contaminación y un bajo nivel de antioxidantes. Sin embargo en la Tabla 8 los valores reportados para cromo son permisibles de acuerdo a NOM-001-ECOL-1996 y a las normas internacionales (EPA).

Tabla 8. Comparación de la normatividad mexicana e internacional de los resultados de la concentración en plomo, cromo y cadmio encontrados en plántulas de jitomate.

Metal	Concentración	Límites permisibles (NOM-001-ECOL-1996) (mg/L)	Límites permisibles EPA
Plomo	0.2375*	10	50-300
Cromo	0.28	1	NA
Cadmio	0.01	0.1	400

*Desviación estándar n=8 (0.08207) para plomo

Yadav *et al.*, (2018) señala que las plantas pueden adoptar distintas estrategias para contrarrestar la toxicidad de metales pesados en su entorno; el factor de bio concentración indica que especies de plantas pueden ser consideradas acumuladoras, tolerantes o exclusoras de los elementos de interés. Así mismo las plántulas de jitomate entran en el grupo de plantas exclusoras por los resultados de $FBC < 1$ dado que las plantas exclusoras bloquean el transporte del metal desde la raíz y la concentración de FBC baja.

8. CONCLUSIONES

Lo expuesto a lo largo de este trabajo permite a llegar a las siguientes conclusiones:

- El efecto que tuvo la luz UV-C y luz azul en las plántulas de jitomate tuvo un aumento en su capacidad antioxidante sin embargo la luz azul fue el tratamiento más eficiente para aumentar la síntesis de metabolitos secundarios.
- Las plantas pueden adoptar distintas estrategias para contrarrestar la toxicidad de metales pesados en su entorno cabe señalar que las plántulas de jitomate mostraron ser exclusoras es decir bloquean el transporte del metal desde la raíz.
- Como se mencionó anteriormente las plántulas mostraron una respuesta al estrés abiótico causado por la luz azul siendo la capacidad antioxidante la que presento un aumento de metabolitos secundarios en comparación con los compuestos fenólicos totales.
- La contaminación de los metales Pb, Cr y Cd en las plántulas de jitomate tuvo un efecto toxico siendo el Cr el que tuvo una concentración alta en las plántulas.
- Sin embargo el tratamiento de luz azul que recibieron las plántulas ayudo a optimizar su respuesta frente al estrés oxidativo de los metales pesados mediante el incremento de su capacidad antioxidante.

9. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda:

- Extender esta investigación a un mayor número de repeticiones en cuanto al diseño experimental para determinar así mayores diferencias significativas entre los diferentes tratamientos.
- Realizar el cultivo de las plántulas de jitomate en condiciones de invernadero y llevarlo hasta la obtención del fruto para poder determinar la producción de metabolitos secundarios en raíz, tallo y fruto.
- Mejorar aspectos del diseño de sistema de iluminación (lámparas más eficientes en invernadero) controlando mejor el tiempo de exposición.
- Realizar más estudios químicos tales como espectroscópicos (IR, RMN y UV), así como también PCR, etc. para tener más información acerca de la respuesta sistémica de las plantas y entender el mecanismo de reacción para poder mejorar su producción desde el punto de vista agronómico, químico y funcional.

10. REFERENCIAS

- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Resumen nacional de ganadería. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/539442/Bolet_n_avance_produccion_tomate_rojo_enero_2020.pdf
- Castro, N., Moreno, R., Calderón, F., Moreno, Alicia., Tamariz, J. (2017). Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con agua residuales en Puebla y Tlaxcala. México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, (9)3: 467-485
- Barceló, J. y Poschenrieder, C. (2003). Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to Science*, 2(3): 333-344. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.
- Martens, S., Boyd, R., (1994). The ecological significance of nickel hyperaccumulation a plant chemical defense. *Oecologia*, 98: 379-384
- Foroughbakhch, R., Hernández, J., Carrillo, A., López, J., Villegas, O., (2010). Hortalizas de Nuevo León. *Importancia alimenticia de las hortalizas en Nuevo León*. pp. 95–99
- Rozano, V., Quiroz, C., Aosta, J., Pimentel, L., Quiñones, E. (2004). Hortalizas la llave de la energía. *Revista digital Universitaria. UNAM*, 5 (7): 3-4
- Lugo, D. (2013). Supermercados, estrategias y pequeños productores hortícolas en el municipio de Acatzingo: el caso Wal-Mart. *Economía, Sociedad y Territorio*, (42) 17: 315-349
- Spooner, D., Paralta, I., Knapp, S. (2005). Nuevas especies de tomates silvestres (*Solanum lycopersicum*: *Solanaceae*) del norte de Perú. *Systematic Botany*, 424-434
- Gómez, O., Casanova, A., Cardoza, H., Piñeiro, F., Hernández, J., Murguido, C., León, M., Hernández, A. (2010). Guía técnica para la producción del cultivo del tomate. *Editora Agroecología*. La Habana Cuba
- Maroto, J.V. (2008) Consumo de hortalizas y salud. *Agrícola vergel*, 315: 138-143.
- Colombo, M., Obregón, R. (2008). Horticultura general. Consideraciones del cultivo del tomate y manejo. *INTA-Estación experimental Agropecuaria Bella vista*. Centro Regional Corrientes, Publicación técnica N° 24. ISSN 1515-9299

- Tazuke, A., Boonkorkaew, P., Hikosaka, S., Sujiyama, N. (2008). Factors affecting fruit abortion in a gynoeceious cucumber cultivar. *Journal of Applied Horticulture*, 10(1): 8-14
- Jaramillo, J., Rodríguez, V., Guzmán, M., Zapata, M., Rengifo, T. (2007). Buenas prácticas Agrícolas en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. *Manual técnico Tampico, México*, 122
- Aráuz, Z., Mendoza, J., Zuniga, A. (2018). Efecto de la agricultura de conservación en las propiedades físicas del suelo. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
- Castro Castillo L.T. (2017). Determinación del grado de acumulación de metales pesados en las plantas asociadas al Río Bogotá, transecto Villapinzón-Tocancipa con fines de biorremediación. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/708
- Prieto, J., González, C., Román, A., Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 10: 29-44
- Yadav, S. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76: 167-179
- Pérez, P. (2015). Biotecnología ambiental: desarrollo de estrategias biotecnológicas para la remediación de metales pesados. Facultad de Farmacia. (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla
- Norzagarry, M., Ruiz, R., Espinoza, L., Valdez, D., Llanes, O. (2017). Interacciones entre el desarrollo económico y la contaminación del agua por metales pesados: caso Puebla. *Entorno académico*, 40-46
- Bonilla, M., Ayala, A., González, S., Santamaría, J., Silva, S. (2015). Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 “Valsequillo” para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de producción Académica y gestión educativa*. ISSN 2007- 8412
- Grumezescu, A., Holban, A. (2017). FOOD BIOENGINEERING, FOOD BIOCONVERSION. Capítulo 9. Ed. *Academic press*, pp. 319-320

- Montoliu, A. (2010). Respuestas fisiológicas de los cítricos sometidos a condiciones de estrés biótico y abiótico. Aspectos comunes y específicos. Tesis doctoral, Universitat Jaume I de Castellón, del área de conocimiento de producción vegetal del departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural.
- Azcón, B., Talón, M. (2008). Fundamentos de fisiología vegetal. Capítulo 29: Fisiología de las plantas y el estrés (2da. ed.) Interamericana- McGraw-Hill, Madrid, pp. 577-597.
- Mano, J. (2002). Early events in environmental stresses in plants-induction mechanisms of oxidative stress. *Oxidative stress in plants*. Ed: Inzé, D., Van Montagu, M. Taylor y Francis, London.UK, pp217-246
- Camarena, G., Torre, R. (2007). Resistencia sistémica adquirida en plantas: estado actual. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 13 (2):157-162
- Ruiz, E., Armenta, M. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional contaminación Ambiental*. 28(2):103-117
- Baker, A., McGrath, S., Reeves, R., Smith, J. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (eds. Terry, N. y Bañuelos, G.), pp. 85-107, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- Macnair, M., Tilstone, G., Smith, S. (200). The genetics of metal tolerance and accumulation in higher plants. En Terry Ny Bañuelos G. Eds. *Phytoremediation of contaminated soil and water*, 235-250
- Salt, D., Kato, N., Kraner, U., Smith, R., Raskin, I. (2000). The role of root exudates in nickel hyperaccumulation and tolerance in accumulator and non accumulator species of *Thlaspi*. Terry N. y Bañuelos G.S Eds. *Phytoremediation of contaminated soil and water*. 189-200
- Ryan, P., Delhaize, E., Jones, D. (2001). Function and mechanism of organic acid exudation from root. *Annual Review of plant physiology and plant molecular Biology*, 52: 527-560
- Carrier, P., Baryl, A., Havaux, M. (2003). Cadmium distribution and microlocalization in oilseed rape (*Brassica napus*) after long-term growth on cadmium-contaminated soil. *Planta*, 216: 939-950

- Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212: 475-486
- Gadapati, W., Macfie, S. (2006). Phytochelatins are only partially correlated with Cd-stress in two species of Brassica. *Plant Science*, 170: 471-480
- Martens, S.N. y Boyd, R.S. (1994). The ecological significance of nickel hyperaccumulation-a plant chemical defense. *Oecologia* 98: 379-384.
- Vázquez, S., Goldsbrough, P., Carpena, R. (2006). Assessing the relative contributions of phytochelatines and the cell Wall to cadmium resistance in white lupin. *Physiologia Plantarum* 128 (3): 487-495.
- Volke-Sepulveda, T., Velasco-Trejo, J.A., De la Rosa-Pérez, D.A. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Instituto Nacional de Ecología*. Ciudad de México, México, 144 pp.
- Ali, H., Khan, E., Anwar, M. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and application. *Chemosphere*, 7 (91), 869-881.
- Skoog, D.A. James; Holler F. James; Principios de análisis instrumental, 5° ed.; ed. McGraw-Hill (1998), pp. 219-239.
- Fontal, B. El espectro Electromagnético y sus aplicaciones. (2005). Escuela para la enseñanza de la química.
- Christian, G.D.1981. Química analítica 2ª ed. Edición Limusa
- Nguy, R., Suyker, A., Xiangming, X. (2015). Modeling gross primary production of maize and soybean croplands using light quality, temperatura, wáter stress, and phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213:160-172
- Ramos, Y., Ramírez, E. (2016). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores vertical farming (VF). *Informador técnico (Colombia)*, 111-120
- Stroch, M., Materova, Z., Vrábl, D., Karlicky, V., Sigut, L., Nezval, J., Spunda, V. (2015). Protective effect of UV-A radiation during acclimation of the photosynthetic apparatus to UV-B treatment. *Plant physiology and Biochemistry*, 96: 90-96

- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45:1809-1814
- Macías, A., Ramos, Y., F, Ulianov. (2012). Estudio de los beneficios del cambio de bombillas de sodio de alta presión por diodos emisores de luz de alto brillo. *El Hombre y la Máquina*, 39:12-18
- Ávila, R., Navarro, A., Vera, O., Hernández, P., Ochoa, C. (2016). Ultraviolet light stimulation of bioactive compounds with antioxidant capacity of fruits and vegetables. *Plant Secondary Metabolites Volume 2*. capítulo 7. pp. 269
- Haro, J., Guerrero, J. (2013). Efecto de la radiación UV-C en frutas y verduras. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, 13(1): 68-77
- Casierra, F., Pinto, J. (2011). Crecimiento de plantas de Remolacha (*Beta vulgaris* L. var. Crosby Egipcia) bajo coberturas de color. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, (64)2: 6081-6091
- Jian, M., Peter, H., Qizhi, Y., Changly, Ch. (2010). Mecanismos químicos y moleculares de los antioxidantes: enfoques experimentales y sistemas modelo. *Journal of Celular and Molecular Medicine*, 14 (4): 840-860
- Toor, R., Savage, G., (2005). Antioxidant activity in different fractions of tomatoes. *Food Res. Int.* 38(5):487–494
- Steward, A. J.; Bozonnet, S.; Mullen, W. y Jenkins, G. I. (2000). Occurrence of flavonols in tomatoes and tomato-based products. *J. Agric. Food Chem.* 48(7):2663-2669.
- García, I. (2004). El balance redox y la alimentación. Balance antioxidante/pro-oxidante. *Salud y enfermedad*. Cuba. Editorial Palcograf. 309 pp.
- Yanishlieva-Maslarova, N. V. (2001). Inhibición de la oxidación. Pokorny, J., Yanishlieva, N. y Gordon M. (Eds.). *Antioxidantes de los alimentos. Aplicaciones prácticas*. España. Editorial Acribia. 364pp.
- Williams, R., Spencer, J., Rice, Evans, C. (2004). Flavonoides: ¿antioxidantes o moléculas de señalización? *Biología Médica de radicales libres*, 36(7): 838-849
- Mancilla, O., Ortega, H., Ramírez, C., Usanga, E., Ramos, R., Reyes, A. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(1): 39-48

- Chung, M., Paudel, N., Seung, K., Chang, Y., Bimal, K. (2019). Corrección a: La influencia de la luz Wavelength en crecimiento y capacidad antioxidante en *Pachyrhizus* (L.) Urbano. *Journal of Plant Growth Regulation*. Springer US. doi: 10.1007/s00344-019-10014-1
- Hernández, P., Ávila, R., Guerrero, B., Navarro, A., Corona, E., Ochoa, C. (2016). Optimization of Antioxidant Compounds Extraction from Fruit By-Products: Apple Pomace, Orange and Banana Peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(1), 103–115.
- Martins, B., Secchi, J., Lima, P., Correa, C., Sousa, A., Oliveira, J., Michael, F., Inácio, A. (2017). Effect of phosphorus (P) doses on tomato seedlings production in poor nutrients substrates and its importance on fruit yield. *Australian Journal of Crop Science*, 11(5): 567–572
- Norma oficial mexicana nom-117-ssa1-1994, bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
- Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L.M., Singh, N., Rezania, S., Khan S.A. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecol Eng.* (120) 274-298. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.039.
- EPA. 2007. Reporte de calidad del agua potable. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories EPA 822-R-04-005.