



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**FITOEEXTRACCIÓN DE PLOMO, CADMIO Y
CROMO CON RÁBANO (*Raphanus sativus* L.) Y
CILANTRO (*Coriandrum sativum* L.).**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGA**

PRESENTA

VÁZQUEZ VILLALBA VIRIDIANA MONSERRAT

DIRECTORA DE TESIS

DRA. HORTENSIA ROSAS ACEVEDO



CD. MX., 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, 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 donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Nada permanece ni vuelve a ser igual; porque al final de los caminos,
siempre un recuerdo muere; más, un pensamiento y un puño de letras,
jamás...”

Rafael Vázquez Nieto

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a:

Mi mamá Montserrat Villalba Rodríguez, una hermosa mujer que me enseñó a vivir con determinación y coraje, y quien siempre está presente en mis pensamientos y en mi corazón.

Mi papá Rafael Vázquez Nieto, un hombre creativo y trabajador, y quién día a día me motiva a alcanzar mis metas y a nunca abandonar mis ilusiones.

Mi hermana Lisset Guadalupe, la pequeña más dulce y optimista, y quien da a mi vida una inmensurable alegría.

Y mi hermano Heros Rafael, una persona inteligente y de quien admiro su paciencia y entereza.

Los amo profundamente, Viridiana Monserrat Vázquez Villalba.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por su inmenso amor y paciencia. Y especialmente a mi papá y mamá, pues todo lo que tengo es gracias a ustedes; gracias por confiar en mí, por su apoyo incondicional y por guiarme a lo largo de mi vida.

También quiero agradecer:

A la Dra. Hortensia Rosas Acevedo por permitirme concluir esta tesis bajo su asesoría; gracias por su tiempo y dedicación al revisar mi trabajo, y por sus valiosas aportaciones.

A la Dra. Esther Matiana García Amador por darme la oportunidad de trabajar con usted; gracias por sus consejos y enseñanzas durante el desarrollo de esta investigación, y así mismo por su apoyo y confianza para llevarla a término.

A la Dra. Claudia Janette de la Rosa Mera, gracias por su colaboración y asesoría en la realización de esta tesis.

A la profesora Elvia García Santos, la Dra. María Socorro Orozco Almanza y el Dr. Gerardo Cruz Flores, gracias por su tiempo para la revisión del manuscrito y sus consejos para mejorarlo.

A Anadely Alejandra Velázquez Téllez, gracias por brindarme tu amistad y apoyo incondicional, por ser la mejor compañera de estudio y por todos los increíbles momentos que hemos compartido.

Y a todos los profesores que durante mi formación, generaron en mí el entusiasmo e interés por las distintas áreas de la Biología.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	1
Agradecimientos.....	2
RESUMEN.....	8
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Contaminación del suelo.....	12
2.2 Contaminación por metales pesados.....	12
2.3 Metales pesados.....	13
2.4 Características de los metales pesados:.....	14
Plomo.....	14
Cadmio.....	15
Cromo.....	16
2.5 Biorremediación de suelos contaminados.....	17
2.6 Fitorremediación.....	17
2.7 Fitoextracción.....	19
2.8 Especies potenciales para la fitoextracción.....	20
2.9 <i>Raphanus sativus</i> L.....	21
2.10 Antecedentes de fitorremediación con <i>Raphanus sativus</i>	22
2.11 <i>Coriandrum sativum</i> L.....	22
2.12 Antecedentes de fitorremediación con <i>Coriandrum sativum</i>	23
III. JUSTIFICACIÓN.....	24
IV. HIPÓTESIS.....	25
V. OBJETIVO GENERAL.....	25
VI. OBJETIVOS PARTICULARES.....	25
VII. MATERIAL Y MÉTODO.....	26
7.1 Material biológico.....	26
7.2 Sustrato y riego.....	26
7.3 Diseño experimental.....	27
7.4 Geminación y riego.....	28
7.5 Rotación y variables de respuesta.....	29
7.6 Cosecha.....	29
7.7 Digestión.....	29

7.8	Análisis de metales pesados.....	30
7.9	Análisis estadístico	31
7.10	Índice de tolerancia	31
7.11	Factor de translocación	31
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
8.1	SUPERVIVENCIA.....	32
8.2	CRECIMIENTO DE LA PARTE AÉREA.....	33
	Tratamientos con Plomo.....	33
	Tratamientos con Cadmio	36
	Tratamientos con Cromo.....	39
	Tratamientos con Mezcla de metales.....	42
8.3	LONGITUD DE LAS RAÍCES	45
8.4	ÍNDICE DE TOLERANCIA	51
8.5	METALES PESADOS EN ÓRGANOS DE <i>Raphanus sativus</i>	52
	Plomo	52
	Cadmio	55
	Cromo.....	57
8.6	METALES PESADOS EN ÓRGANOS DE <i>Coriandrum sativum</i>	59
	Plomo	59
	Cadmio	61
	Cromo.....	63
IX.	CONCLUSIONES.....	65
X.	REFERENCIAS	66
XI.	ANEXOS	71
	Anexo 1: Concentración promedio de metales pesados (mg kg ⁻¹ en peso seco) en órganos de <i>Raphanus sativus</i> (rábano), Concentración total por tratamiento y Factor de translocación.	71
	ANEXO 2: Concentración promedio de metales pesados (mg kg ⁻¹ en peso seco) en órganos de <i>Coriandrum sativum</i> (cilantro), Concentración total por tratamiento y Factor de translocación.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de Fitorremediación	18
Figura 2. Germinación de <i>Raphanus sativus</i>	28
Figura 3. Germinación de <i>Coriandrum sativum</i>	28
Figura 4. Material vegetal durante secado	29
Figura 5. Material de rábano y cilantro molido	30
Figura 6. a) Muestras durante la digestión triácida, b) Muestras al finalizar el proceso	30
Figura 7. Supervivencia de rábano bajo distintos tratamientos	32
Figura 8. Supervivencia de cilantro bajo distintos tratamientos	33
Figura 9. Crecimiento de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con Pb	34
Figura 10. Aspecto de <i>R. sativus</i> bajo tratamiento con plomo.....	34
Figura 11. Crecimiento de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con Pb	35
Figura 12. Aspecto de <i>C. sativum</i> bajo tratamiento con plomo.....	36
Figura 13. Crecimiento de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con Cd	37
Figura 14. Aspecto de <i>R. sativus</i> bajo tratamiento con cadmio	37
Figura 15. Crecimiento de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con Cd	38
Figura 16. Aspecto de <i>C. sativum</i> bajo tratamiento con cadmio.....	39
Figura 17. Crecimiento de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con Cr	40
Figura 18. Aspecto de <i>R. sativus</i> bajo tratamiento con cromo.....	40
Figura 19. Crecimiento de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con Cr.....	41
Figura 20. Aspecto de <i>C. sativum</i> bajo tratamiento con cromo	42
Figura 21. Crecimiento de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con mezcla de metales.....	43
Figura 22. Aspecto de <i>R. sativus</i> bajo tratamiento con mezcla de metales	43
Figura 23. Crecimiento de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con mezcla de metales.....	44
Figura 24. Aspecto de <i>C. sativum</i> bajo tratamiento con mezcla de metales.....	45
Figura 25. Raíz de rábano bajo tratamientos con cadmio	46
Figura 26. Raíz de rábano bajo tratamientos con cromo	47
Figura 27. Raíz de rábano bajo tratamientos con mezcla de metales	47
Figura 28. Raíz de rábano bajo tratamientos con plomo	48

Figura 29. Raíz de cilantro bajo tratamientos con cromo	49
Figura 30. Raíz de cilantro bajo tratamientos con mezcla de metales.....	50
Figura 31. Raíz de cilantro bajo tratamientos con plomo.....	50
Figura 32. Raíz de cilantro bajo tratamientos con cadmio.....	51
Figura 33. Concentración promedio de plomo en <i>Raphanus sativus</i>	53
Figura 34. Concentración promedio de cadmio en <i>Raphanus sativus</i>	56
Figura 35. Concentración promedio de cromo en <i>Raphanus sativus</i>	58
Figura 36. Concentración promedio de plomo en <i>Coriandrum sativum</i>	60
Figura 37. Concentración promedio de cadmio en <i>Coriandrum sativum</i>	62
Figura 38. Concentración promedio de cromo en <i>Coriandrum sativum</i>	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Concentraciones empleadas en la investigación	27
Cuadro 2. Metales pesados: rango normal y concentraciones críticas en plantas	27
Cuadro 3. Altura promedio de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con Pb	33
Cuadro 4. Altura promedio de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con Pb	35
Cuadro 5. Altura promedio de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con Cd	36
Cuadro 6. Altura promedio de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con Cd	38
Cuadro 7. Altura promedio de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con Cr	39
Cuadro 8. Altura promedio de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con Cr	41
Cuadro 9. Altura promedio de la parte aérea de <i>R. sativus</i> en tratamientos con mezcla de metales	42
Cuadro 10. Altura promedio de la parte aérea de <i>C. sativum</i> en tratamientos con mezcla de metales	44
Cuadro 11. Longitud y diámetro promedio de la raíz de <i>Raphanus sativus</i>	45
Cuadro 12. Longitud promedio de la raíz de <i>Coriandrum sativum</i>	48
Cuadro 13. Índice de tolerancia (%).....	51
Cuadro 14. Factor de Translocación de plomo en <i>Raphanus sativus</i> y Potencial de Fitorremediación	54
Cuadro 15. Factor de Translocación de cadmio en <i>Raphanus sativus</i> y Potencial de Fitorremediación	56
Cuadro 16. Factor de Translocación de cromo en <i>Raphanus sativus</i> y Potencial de Fitorremediación	58
Cuadro 17. Factor de Translocación de plomo en <i>Coriandrum sativum</i> y Potencial de Fitorremediación	60
Cuadro 18. Factor de Translocación de cadmio en <i>Coriandrum sativum</i> y Potencial de Fitorremediación	62
Cuadro 19. Factor de Translocación de cromo en <i>Coriandrum sativum</i> y Potencial de Fitorremediación	64

RESUMEN

La contaminación de suelos por metales pesados es una problemática ambiental para la cual se han diseñado distintas tecnologías de recuperación, dentro de las cuales se encuentra la fitoextracción.

En el presente estudio, se evaluó y comparó el potencial de fitoextracción de dos especies: rábano (*Raphanus sativus* L.) y cilantro (*Coriandrum sativum* L.), para el tratamiento de suelos contaminados por plomo, cadmio y cromo.

Las especies de interés fueron cultivadas bajo el método de hidroponía durante siete semanas. En las dos últimas semanas se emplearon concentraciones conocidas de plomo (50 y 150 mg kg⁻¹), cadmio (5 y 20 mg kg⁻¹) y cromo (5 y 15 mg kg⁻¹) para el riego de los tratamientos con cada uno de los metales pesados, además de dos tratamientos con la mezcla de estos. Al finalizar los tratamientos, se procedió a la cosecha y desecación del material vegetal. Posteriormente se realizó una digestión triácida y mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, se determinó el contenido de metales pesados en raíces y parte aérea de cada especie. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente por el método de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD).

Los resultados señalan que *R. sativus* y *C. sativum* son especies con potencial de fitorremediación de suelos contaminados por plomo, cadmio y cromo. En el caso de rábano la descontaminación es a través del proceso de fitoextracción, mientras que en cilantro es por medio del proceso de fitoestabilización.

De las dos especies, el rábano mostró ser más tolerante que el cilantro, su índice de tolerancia para cromo fue de 108.7% - 129.6%, para cadmio 100% - 103.4%, para plomo 96.6% - 101.3% y para mezcla de metales 90.9%. En *C. sativum* el porcentaje de tolerancia fue menor a 100 en la mayoría de tratamientos, a excepción de Cd5 donde se obtuvo 101.7%.

Se encontró una mayor acumulación de los metales en la raíz de ambas especies:

En *R. sativus* la concentración de plomo en tratamientos con 50 mg kg⁻¹ fue 1.04 mg kg⁻¹, con 150 mg kg⁻¹ fue 1.76 mg kg⁻¹, mientras que en la mezcla de metales fue de 0.84 a 4.61 mg kg⁻¹. La concentración de cadmio en tratamientos con 5 mg kg⁻¹ fue 0.45 mg kg⁻¹, con 20 mg kg⁻¹ fue 1.98 mg kg⁻¹, y en la mezcla de metales fue de 0.87 a 2.57 mg kg⁻¹. La concentración de cromo con 5 mg kg⁻¹ fue 1.58 mg kg⁻¹, con 15 mg kg⁻¹ fue 4.005 mg kg⁻¹, para la mezcla de metales fue de 0.08 a 0.35 mg kg⁻¹.

En *C. sativum* la concentración de plomo en tratamientos con 50 mg kg⁻¹ fue 15.36 mg kg⁻¹, con 150 mg kg⁻¹ fue 23.28 mg kg⁻¹, mientras que en la mezcla de metales fue de 6.51 a 27.6 mg kg⁻¹. La concentración de cadmio en tratamientos con 5 mg kg⁻¹ fue 2.48 mg kg⁻¹, con 20 mg kg⁻¹ fue 2.59 mg kg⁻¹, y en la mezcla de metales fue de 1.92 a 2.51 mg kg⁻¹. La concentración de cromo con 5 mg kg⁻¹ fue 2.17 mg kg⁻¹, con 15 mg kg⁻¹ fue 3.99 mg kg⁻¹, para la mezcla de metales fue de 2.09 a 3.11 mg kg⁻¹.

Se concluyó que *Raphanus sativus* si tiene potencial de fitoextracción, ya que su raíz es un órgano de almacenamiento que no trasloca tan fácilmente los iones metálicos hacia la parte aérea, lo que da lugar a una mayor concentración de metales pesados en la parte cosechable de esta hortaliza. En el caso de *Coriandrum sativum* su potencial es de fitoestabilización, pues para considerarla como una especie fitoextractora, es necesario un factor de translocación mayor al que se obtuvo en este estudio.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural frágil y no renovable, que constituye un sistema dinámico con un gran número de funciones ambientales, económicas, sociales y culturales (Huayllani Enriquez, 2016). Es receptor de todo tipo de residuos producidos por las actividades humanas, entre las fuentes de contaminación del suelo es preciso resaltar la generada por los metales pesados (Zumalave-Rey, 2018).

La contaminación del suelo por metales pesados es un problema que ha ido en aumento debido principalmente a actividades antrópicas. Entre las principales fuentes de contaminación se encuentran la minería, metalúrgica, agricultura, la industria y actividades militares (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017; Peralta-Pérez *et al.*, 2010).

La importancia de su estudio y su consiguiente solución radica principalmente en la silenciosa exposición a metales pesados, a la que están sometidas las poblaciones y su disponibilidad a través de la cadena trófica, así como el riesgo ambiental que representa (Zumalave-Rey, *op. cit.*).

Los metales pesados son considerados como elementos peligrosos para los seres vivos en general, debido a que ejercen una elevada toxicidad a bajas concentraciones y pueden ser bioacumulables (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007). Una acumulación excesiva de metales pesados puede tener efectos negativos en la fertilidad del suelo, afectar las funciones del ecosistema y generar riesgos a la salud de los seres humanos y otros animales (Turan y Esringü, 2007).

En la actualidad se dispone de varias tecnologías para la recuperación o tratamiento de suelos contaminados con metales pesados. Dentro de estas encontramos a la fitoextracción, una técnica en la que se emplean plantas que poseen una capacidad natural por encima de lo usual para extraer contaminantes del suelo mediante sus raíces y acumularlos en las partes cosechables (Díez Lázaro, 2008; Delgadillo-López *et al.*, 2011).

La mayoría de los estudios sobre fitoextracción se han basado en experimentos hidropónicos, que han permitido determinar la eficacia de absorción y la tolerancia de algunas especies (Marchiol *et al.*, 2004).

El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar el potencial de fitoextracción de dos especies cultivadas a nivel invernadero: rábano (*Raphanus sativus* L.) y cilantro (*Coriandrum sativum* L.), para el tratamiento de suelos contaminados por plomo (50 y 150 mg kg⁻¹), cadmio (5 y 20 mg kg⁻¹) y cromo (5 y 15 mg kg⁻¹), además de dos tratamientos con la mezcla de estos metales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación del suelo

El suelo es un recurso natural frágil y no renovable, que constituye un sistema dinámico con un gran número de funciones ambientales, económicas, sociales y culturales (Huayllani Enriquez, 2016).

El término “contaminación del suelo” se refiere a la presencia en el suelo de un químico o una sustancia fuera de sitio y/o presente en una concentración más alta de lo normal, que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado. Las principales fuentes de contaminación del suelo son antropogénicas, la cantidad y diversidad de contaminantes se encuentra en constante incremento como consecuencia del desarrollo agroquímico e industrial (Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2019).

2.2 Contaminación por metales pesados

Las concentraciones crecientes de metales pesados en el suelo de forma disponible, se consideran un riesgo severo y peligroso ya que están implicadas en una red compleja de interacciones entre suelo-planta-animal. Las principales fuentes de contaminación son la minería, metalúrgica, agricultura, industria y actividades militares (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017; Peralta-Pérez *et al.*, 2010; Carranza Bautista, 2009).

Actualmente, el desarrollo de nuevas tecnologías de toda índole depende de los elementos que se obtienen por actividades minerometalúrgicas, ya que muchos de los componentes de los nuevos equipos (computadoras, instrumentos analíticos y teléfonos celulares, entre otros) están fabricados de metales como el hierro, cobre, cadmio, oro, plomo, plata y otros elementos como el silicio. La excavación de minas, la remoción de minerales, así como el proceso y la extracción de metales puede causar daños ambientales y en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo,

se pueden dañar tierras de cultivo, favorecer la erosión del suelo y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos.

Por otro lado, las industrias especializadas en el proceso de metales (siderúrgicas y metalúrgicas) pueden emitir partículas de dimensiones micrométricas, que son fácilmente transportadas por el viento a grandes distancias y causan problemas en la salud de diferentes poblaciones (Volke Sepúlveda *et al.*, 2005).

El riesgo ambiental derivado de la contaminación por metales pesados se relaciona directamente con la concentración, especiación y biodisponibilidad específica de cada metal, que determinan su reactividad, movilidad y absorción (Díez Lázaro, 2008).

En México, existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos. Los elementos potencialmente tóxicos más comunes en nuestro país son: plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), selenio (Se) mercurio (Hg), arsénico (As) y cromo (Cr) (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017; Nungaray-Arteaga, 2014).

2.3 Metales pesados

Los metales pesados son todos aquellos metales estables y metaloides que tienen una densidad mayor a 5 g cm^{-3} o su número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos. La Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos considera que los metales pesados están conformados por 38 elementos, pero generalmente son 12 los que se utilizan con más frecuencia y son descargados como parte de una serie de residuos al ambiente: Cd, Co, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn (Carranza Bautista, 2009).

Elementos como el Fe, Mo y Mn son elementos traza importantes con baja toxicidad; el Zn, Ni, Cu, Co y Cr son tóxicos con importancia biológica moderada; mientras que el Cd, Hg y Pb no tienen importancia biológica significativa como elementos traza y son considerados altamente tóxicos (Volke Sepúlveda *et al.*, 2005).

Los metales pesados poseen una alta persistencia en el ambiente y baja solubilidad en la biota. Son considerados como elementos peligrosos para los seres vivos en general, debido a que ejercen una elevada toxicidad y pueden ser bioacumulables. La toxicidad está causada frecuentemente por la imposibilidad del organismo afectado para mantener los niveles necesarios de excreción, el proceso se agrava durante el paso por las distintas cadenas tróficas, debido a que los niveles de incorporación sufren un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones, a este proceso se le denomina biomagnificación. Mientras que la bioacumulación es un aumento de la concentración del contaminante en un organismo durante un cierto plazo, de forma que llega a ser superior a la del contaminante presente en el ambiente (Huayllani Enriquez, 2016; Navarro-Aviñó *et al.*, 2007).

Otro aspecto importante para considerar es la presencia simultánea de los metales pesados, ya que sus efectos pueden ser tóxicamente sinérgicos o antagónicos. Por tanto, existe cierta dificultad para predecir los efectos reales de los contaminantes en el medio, los cuales pueden ser inocuos, letales o subletales (no matan al individuo, pero producen daños a nivel genético o fisiológico) (Navarro-Aviñó *op. cit.*).

2.4 Características de los metales pesados:

Plomo

El plomo es un catión divalente, sus valencias son +2 y +4, de las cuales Pb (II) es la forma más común y reactiva. Está presente en la corteza terrestre de forma natural en pequeñas cantidades (0.002%). Las principales fuentes de emisión de plomo al ambiente son la fundición y el procesamiento de metales, el reciclamiento de baterías ácidas de plomo, la manufactura de pigmentos químicos, la minería a través de la disposición de jales mineros y la contaminación de la atmósfera debido al uso de gasolinas con plomo (Covarrubias y Peña-Cabriaes *op. cit.*; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005).

La mayor parte del Pb liberado en el ambiente es retenido en las capas superficiales del suelo; los principales procesos que dictan su destino en éste incluyen la adsorción, el intercambio iónico, la precipitación y el acomplejamiento con materia orgánica (Nungaray-Arteaga, 2014; Volke-Sepúlveda *op. cit.*).

Los síntomas específicos de toxicidad por Pb en las plantas son la inhibición del crecimiento de la raíz, retraso en el crecimiento de la planta y clorosis. Estudios de absorción de Pb en plantas han demostrado que la mayor parte de este se queda en las raíces (Alvarado *et al.*, 2011).

Cadmio

El cadmio es un elemento traza que se encuentra de forma natural como otavita (CdCO_3) y greenockita (CdS); está normalmente asociado al zinc, cobre o plomo. Éste es un metal sin función biológica conocida (Huayllani-Enriquez, 2016; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005; Carranza-Bautista, 2009).

Tiene múltiples aplicaciones debido a su resistencia a la corrosión, es utilizado para la electrodeposición en otros metales especialmente el acero y el hierro, que son utilizados en tornillos, tuercas de seguridad, pestillos y diversas partes de aviones y vehículos de motor; también se emplea en la fabricación de baterías eléctricas de níquel-cadmio, celdas fotoeléctricas, filamentos luminiscentes, fotografía, pigmentos, esmaltes y como estabilizador del cloruro polivinilo (PVC) (Huayllani Enriquez *op. cit.*; Carranza-Bautista *op. cit.*).

El aporte de cadmio a los ecosistemas es causado por el mal manejo de los residuos de la industria minera, metalúrgica y energética; el uso excesivo de fertilizantes fosfatados, así como por la mala disposición de residuos sólidos municipales y quema de plásticos (principalmente PVC). Tiende a depositarse y adherirse a la materia orgánica del suelo; sin embargo, parte de él se disuelve en agua, por lo que puede llegar a los cuerpos de agua (Volke-Sepúlveda *op. cit.*; Carranza-Bautista *op. cit.*).

El cadmio es uno de los metales más tóxicos para las plantas vasculares, es absorbido fácilmente por las raíces y sus efectos se pueden presentar en concentraciones muy bajas ($1-10 \text{ mg kg}^{-1}$). El exceso de iones Cd puede causar numerosos síntomas, puesto que tiene la capacidad de intervenir en el metabolismo de las plantas, en numerosas reacciones enzimáticas y sustituir algunos elementos esenciales debido a que su comportamiento químico es parecido, como es el caso del Mn, Zn y Ca. Afecta la tasa de transpiración, ya que interviene en el funcionamiento del transporte de agua y equilibrio hídrico, interviene en la apertura y cierre de estomas e inhibe el crecimiento de las raíces y la división celular en plantas. La acumulación de cadmio en hojas afecta la fotosíntesis, principalmente la actividad del fotosistema (II) ocasionando una disminución en la formación del pigmento fotosintético. La ruta metabólica del nitrógeno también se ve afectada, lo que conduce a la muerte de los vegetales a corto plazo. Los síntomas de las lesiones en las plantas por la toxicidad del cadmio consisten en manchas necróticas y una reducción del número de yemas apicales, así como la inhibición del crecimiento; en las hojas más jóvenes se observa clorosis y encorvamiento, además de adelgazamiento en tallos (Carranza-Bautista, 2009).

Debido a esto, el cadmio es reconocido como uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas (Reyes *et al.*, 2016).

Cromo

Es uno de los elementos menos comunes y no se encuentra naturalmente en forma elemental, sólo en compuestos (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005). El cromo puede existir en diferentes formas, dependiendo de su estado de oxidación, puede encontrarse en estado líquido, sólido o gaseoso. Las formas químicas más comunes son el Cr (0), Cr (III) y Cr (VI), siendo este último su forma más tóxica (Covarrubias y Peña-Cabriales, 2017).

El Cr entra al medio ambiente por actividades como la industria textil, de pinturas, cementera y las tenerías. En México la industria de la curtiduría es una de las que

más aporta a la contaminación por este elemento, debido al uso de sales de cromo para el procesado de las pieles (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005; Covarrubias *op. cit.*).

Los síntomas de toxicidad por cromo en plantas son inhibición del crecimiento, clorosis en hojas jóvenes, daño en las células de las raíces, y reducción en la tasa de germinación de las semillas y el crecimiento de las radículas (Panda y Choudhury, 2005).

2.5 Biorremediación de suelos contaminados

En la actualidad se dispone de varias tecnologías para la recuperación o tratamiento de suelos contaminados, todas diseñadas para aislar o eliminar dichas sustancias mediante procesos físico-químicos, térmicos o biológicos (Díez Lázaro, 2008).

Las técnicas biológicas o biorremediación, se utilizan para remover, degradar o transformar compuestos tóxicos en productos metabólicos inocuos o menos tóxicos, a través de los procesos naturales que llevan a cabo distintos organismos vivos, principalmente plantas, hongos y bacterias (Nungaray-Arteaga, 2014; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2002).

2.6 Fitorremediación

Dentro de la biorremediación encontramos a la fitorremediación, que se define como el uso de plantas para remediar matrices contaminadas (suelos, sedimentos, agua y aire) mediante la extracción, transformación, degradación y/o estabilización de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Peralta-Pérez *et al.*, 2010). Esta tecnología emplea las capacidades o estrategias diversas, tanto fisiológicas como bioquímicas que presentan algunas plantas, para acumular sustancias tóxicas en sus tejidos, así como las interacciones de los microorganismos en su rizosfera. De manera que, dependiendo de las características del contaminante, este puede ser inmovilizado, volatilizado o degradado en la zona de la raíz o en la planta (Mendoza Correa, 2018; Carranza-Bautista, 2009).

La fitorremediación es una técnica que presenta varias ventajas: se puede realizar *in situ.* y *ex situ.*; no requiere consumo de energía; es de bajo costo; no se necesita de personal especializado para su aplicación, sólo con conocimientos en prácticas agronómicas convencionales; y mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, debido a la formación de una cubierta vegetal. Sin embargo, tiene algunas limitaciones como la profundidad de acción, pues se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta; el tiempo de implementación que requiere en algunas especies como los árboles o arbustos, donde la fitorremediación es un proceso relativamente lento; su dependencia con el clima y el tipo de suelo de la zona de aplicación; además, en el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados pueden ser liberados nuevamente al ambiente (Ferreyroa, 2016; Delgadillo-López *et al.*, 2011).

Las tecnologías de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención: rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización; o eliminación: fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización (Figura 1) (Nungaray-Arteaga, 2014; Delgadillo-López *op. cit.*).

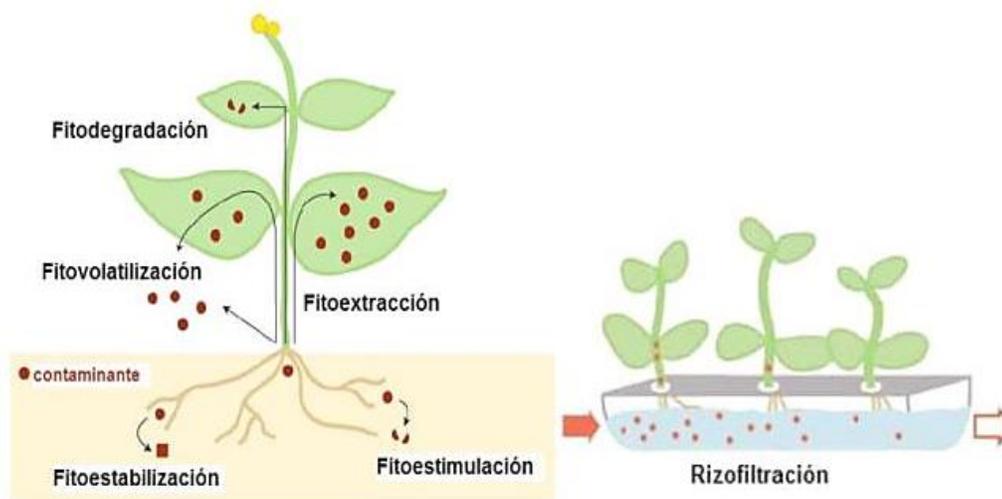


Figura 1. Mecanismos de Fitorremediación (Pilon-Smits, 2005 citado por Díez Lázaro, 2008)

2.7 Fitoextracción

La fitoextracción o fitoacumulación, se refiere al uso de plantas que poseen una capacidad natural por encima de lo usual para extraer contaminantes del suelo mediante sus raíces y acumularlos en las partes cosechables (Delgadillo-López *op cit.*; Díez Lázaro, 2008).

Las plantas que se emplean para la fitoextracción deben poseer ciertas características, tales como: rápido crecimiento, alta producción de biomasa, fácil de cosechar, capacidad de extraer contaminantes y acumularlos preferiblemente en la parte aérea, y tolerancia a altas concentraciones de metales pesados (Marchiol *et al.*, 2004).

Para considerar viable el proceso, es importante que la acumulación del contaminante tenga lugar en la parte aérea de la planta, aunque algunos autores consideran que también la extracción de las raíces es una opción viable en algunos casos (Díez-Lázaro *op. cit.*).

La capacidad fitoextractora de una planta depende de su capacidad de absorber, translocar y secuestrar el metal de interés en su parte cosechable, así como de la cantidad de biomasa que produce (Díez-Lázaro *op. cit.*). Las fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados son las siguientes (Delgadillo-López *et al.*, 2011; Navarro-Aviñó, 2007):

Fase I. Implica el transporte de los metales pesados al interior de la planta y después, al interior de la célula. La raíz constituye el tejido de entrada principal de los metales, los cuales llegan por difusión en el medio, mediante flujo masivo o por intercambio catiónico. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular, ya sea por vía apoplástica o simplástica.

Fase II. Una vez dentro de la planta, las especies metálicas son secuestradas o acomplejadas mediante la unión a ligandos específicos. Entre los quelantes producidos por las plantas se encuentran los ácidos orgánicos (ácidos cítrico,

oxálico y málico), algunos aminoácidos (histidina y cisteína) y dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metaloteínas.

Fase III. Involucra la compartimentalización y detoxificación, proceso por el cual, el complejo ligando-metal queda retenido en la vacuola.

2.8 Especies potenciales para la fitoextracción

La extracción de metales pesados por medio de las plantas, es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta (Prieto-Méndez *et al.*, 2009).

Los organismos que se utilizan en la fitorremediación son específicos para cada contaminante, por lo tanto, cuando se establece un tratamiento se debe considerar el contaminante para saber la especie de planta a utilizar (Mendoza Correa, 2018).

Para la fitoextracción se prefiere emplear plantas hiperacumuladoras, es decir plantas que acumulan en su biomasa aérea más de 1,000 mg kg⁻¹ de Co, Cu, Ni, Pb o Se, más de 10,000 mg kg⁻¹ de Mn o Zn o más de 100 mg kg⁻¹ de Cd. Se han identificado aproximadamente 400 especies hiperacumuladoras (pertenecientes a 45 familias), sin embargo, la mayor parte de estas plantas acumulan un único metal (Díez-Lázaro, 2008).

La mayoría de los estudios sobre fitoextracción se han basado en experimentos hidropónicos, que han permitido determinar la eficacia de absorción y la tolerancia de algunas especies (Marchiol *et al.*, 2004).

La capacidad que poseen las plantas para resistir los metales que se acumulan de manera excesiva en su cuerpo, se conoce como tolerancia (Nungaray-Arteaga, 2014).

La membrana plasmática es un sistema complejo que puede estar involucrada en la tolerancia a metales pesados, reduciendo la captación o estimulando las bombas

de flujo de metales que promueven la entrada al citosol. Se sabe que las plantas tolerantes protegen la membrana plasmática mediante mecanismos de reparación que mantienen su integridad; utilizando mecanismos de protección como proteínas de choque térmico, metalotioneinas, etc.; mejorando los mecanismos de homeostasis de metal; promoviendo un influjo reducido a través de la membrana, y un eflujo selectivo metabólicamente más conveniente que los mecanismos específicos de influjo y restricción (Navarro-Aviñó, 2007).

A continuación, se describe a las especies que son de interés para el presente estudio:

2.9 *Raphanus sativus* L.

Clase: Equisetopsida C. Agardh.

Subclase: Magnoliidae Novák ex Takht.

Superorden: Rosanae Takht.

Orden: Brassicales Bromhead.

Familia: Brassicaceae Burnett.

Género: *Raphanus* L.

(Missouri Botanical Garden, 2018).

El rábano es un cultivo hortícola de rápida maduración que puede ser cultivado tanto en suelos minerales como orgánicos. El producto comestible de esta especie es su raíz engrosada de color rojizo, rosa, blanco o combinado. Los rábanos son poco exigentes al tipo de clima y pueden sembrarse durante todas las épocas del año (Gómez-Pérez, 2011).

Su desarrollo vegetativo tiene lugar entre 6 y 30 °C, la temperatura óptima se encuentra entre 18 y 22 °C. Prefiere los suelos arenosos, neutros, con un alto contenido de materia orgánica y con capacidad de retener abundante humedad, necesaria para el rápido desarrollo del cultivo. La humedad del suelo debe

encontrarse entre un 60% a 65% de la capacidad de campo. Por lo general, sus semillas germinan entre los primeros 7 a 10 días, dependiendo de la variedad y las condiciones ambientales. Su cosecha debe realizarse después de 20 a 30 días de la siembra (Hydroenvironment, 2018).

2.10 Antecedentes de fitorremediación con *Raphanus sativus*

En 2013, Hoyos-Cerna y Guerrero-Padilla emplearon esta especie para determinar la concentración de plomo y cadmio en tratamientos de 150 y 300 mg L⁻¹ de cada metal, los resultados indican que estos metales se bioacumulan con mayor concentración en la raíz del rábano en soluciones de 300 mg L⁻¹, mostrando una relación direccional ascendente con las soluciones concentradas de los tratamientos.

Otro antecedente relevante lo presentaron Marchiol *et al.*, (2004) en Italia, al investigar el potencial de fitoextracción de la canola y el rábano en suelos con múltiples contaminantes (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn). Los datos obtenidos indican que ambas especies son moderadamente tolerantes en presencia de suelos multi contaminados. Además, mostraron una diferencia estadísticamente significativa en la fitoextracción de metales pesados, donde el rábano tiene mayor eficiencia que la canola para concentrar altas cantidades de Cd, Ni y Pb.

2.11 *Coriandrum sativum* L.

Clase: Equisetopsida C. Agardh

Subclase: Magnoliidae Novák ex Takht.

Superorden: Asteranae Takht.

Orden: Apiales Nakai

Familia: Apiaceae Lindl.

Género: *Coriandrum* L.

(Missouri Botanical Garden, 2018).

El cilantro es una planta anual de fácil y rápido crecimiento, crece bastante bien en sombra parcial. Para obtener altos rendimientos el suelo debe ser de textura ligera y rico en materia orgánica, sus requerimientos de humedad son altos al principio del ciclo de cultivo. Una de las principales características a conocer para su cultivo es que su sistema radical está compuesto por una raíz principal, axonomorfa, muy delgada y altamente ramificada, por lo cual, su siembra es directa y no se recomienda el trasplante (Hernández-Dávila, 2003).

Puede soportar temperaturas de 13 a 24 °C, sin embargo, para un óptimo crecimiento y desarrollo, se recomienda sembrar en lugares templados preferentemente de 18 a 20 °C. Otro dato importante para su cultivo es mantener un pH de 6.8 a 5.5. Bajo estas condiciones, en la mayoría de las variedades la germinación se presenta aproximadamente de 7 a 10 días; mientras que la cosecha debe realizarse entre los 45 a 55 días después de la germinación, que es cuando ha completado la formación de hojas basales y se inicia el crecimiento reproductivo (Hydroenvironment, 2018).

2.12 Antecedentes de fitorremediación con *Coriandrum sativum*

Cahuasqui-Toscano (2011) determinó la concentración de plomo, cadmio y níquel en muestras de cilantro de un cultivo rural en Ecuador, los resultados señalan que el contenido de estos metales es mayor en hojas y tallos que en raíces, y que el Cd presenta mayor bioacumulación en comparación con Ni y Pb.

En 2014, Mahmood y Malik evaluaron varias especies (dentro de ellas *Coriandrum sativum*) contaminadas con metales pesados (Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Cd, Mn y Zn). El estudio lo realizaron en Pakistán, tomando muestras de agua, suelo y de las plantas cultivadas en dos zonas agrícolas de la ciudad de Lahore. Sus resultados indican que las hortalizas de hoja como el cilantro, presentan una mayor capacidad de acumular metales pesados, en comparación con hortalizas de raíz y tubérculos, debido a que su factor de translocación suele ser más alto.

III. JUSTIFICACIÓN

La contaminación de suelos por metales pesados, es una creciente problemática ambiental que requiere de nuestra continua atención.

Con el objetivo de complementar el conocimiento actual acerca de la fitoextracción como tecnología para disminuir y/o eliminar metales pesados del suelo, en el presente estudio se evaluó el potencial de dos especies para el tratamiento de plomo, cadmio y cromo.

Las especies seleccionadas fueron: *Raphanus sativus* L. (rábano) y *Coriandrum sativum* L. (cilantro), puesto que se encontró en la bibliografía que ambas son plantas acumuladoras de altas concentraciones de metales pesados, además presentan un rápido crecimiento, alta producción de biomasa y son fáciles de cosechar.

Por consiguiente, se pretende investigar la eficiencia de cada especie para acumular metales bajo distintos tratamientos, así como su resistencia a éstos.

Las preguntas a resolver fueron:

- ¿En qué parte de las plantas habrá mayor acumulación de metales pesados?
- ¿Cómo se verá afectada la supervivencia y el crecimiento de *Raphanus sativus* y *Coriandrum sativum* en cada tratamiento?
- ¿Qué especie tiene mayor potencial de fitoextracción para la descontaminación de suelos?
- ¿La acumulación de plomo, cadmio y cromo disminuirá en tratamientos con mezcla de metales?

IV. HIPÓTESIS

Raphanus sativus y *Coriandrum sativum* son plantas fitoextractoras de plomo, cadmio y cromo, sin embargo, su potencial para acumular metales en la parte cosechable, puede verse comprometido en presencia de más de un contaminante. Por tanto, se espera que su capacidad de acumulación sea menor en suelos contaminados con una mezcla de metales, en comparación de tratamientos con un solo metal.

V. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y comparar el potencial de fitoextracción de rábano (*Raphanus sativus* L.) y cilantro (*Coriandrum sativum* L.) para el tratamiento de suelos contaminados por plomo (50 y 150 mg kg⁻¹), cadmio (5 y 20 mg kg⁻¹) y cromo (5 y 15 mg kg⁻¹), así como en dos tratamientos con la mezcla de estos metales.

VI. OBJETIVOS PARTICULARES

- Examinar el crecimiento y la supervivencia de testigos y tratamientos con metales.
- Analizar la concentración de plomo, cadmio y cromo acumulado en los órganos (raíz y parte aérea) de *Raphanus sativus* y *Coriandrum sativum*.
- Evaluar el potencial de fitorremediación de rábano y cilantro, para determinar su eficiencia como plantas fitoextractoras.

VII. MATERIAL Y MÉTODO

El trabajo experimental se realizó en las instalaciones de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Campo II. El cultivo hidropónico de las plantas tuvo lugar en el invernadero de la Facultad. La digestión y el análisis de las muestras vegetales, se llevaron a cabo en el Laboratorio L301 de Contaminación y Fitorremediación de Suelos y el Laboratorio de Servicios de la Carrera de Biología de Absorción Atómica, respectivamente.

7.1 Material biológico

Se emplearon semillas comerciales de rábano (*Raphanus sativus* L.) y cilantro (*Coriandrum sativum* L.), las cuales se lavaron con una solución de hipoclorito al 5% para desinfectar.

7.2 Sustrato y riego

Se empleó agrolita como sustrato y solución nutritiva comercial para hortalizas Hydroenvironment para el riego. A partir de la siembra de las semillas hasta cinco semanas después de la germinación, todas las plantas se regaron de manera manual cada tercer día para mantener la humedad a capacidad de campo. Durante las dos últimas semanas, el riego fue específico de acuerdo al diseño experimental: para los testigos se usó solución nutritiva, mientras que para los tratamientos con metales pesados se empleó una preparación de solución nutritiva adicionada con concentraciones conocidas de plomo, cadmio y cromo (Cuadro 1), obtenidas a partir de soluciones patrón comercial. Para estas concentraciones, se tomó en cuenta los valores normales y críticos para plantas, de acuerdo con Alloway (1995) como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Concentraciones empleadas en la investigación.

Elemento	Tratamiento	Clave	Concentración empleada (mg kg ⁻¹)
Plomo	Concentración 1	Pb50	50
	Concentración 2	Pb150	150
Cadmio	Concentración 1	Cd5	5
	Concentración 2	Cd20	20
Cromo	Concentración 1	Cr5	5
	Concentración 2	Cr15	15
Pb, Cd, Cr	Mezcla 1	M1	50,5,5
	Mezcla 2	M2	150,20,15

Cuadro 2. Metales pesados: rango normal y concentraciones críticas en plantas.

Elemento	Rango normal en plantas (mg kg ⁻¹) *	Concentración crítica en plantas (mg kg ⁻¹)	
		a	b
Plomo	0.2-20	3-300	---
Cadmio	0.1-2.4	5-30	4-200
Cromo	0.02-1	15-50	4-40

* Bowen, 1979; a. Kabata-Pendias & Pendias, 1992; b. McNichol, 1985 (citados por Alloway, 1995).

7.3 Diseño experimental

Por cada elemento se formaron tres lotes: testigos, concentración 1 y concentración 2, además de dos mezclas (mezcla 1 y mezcla 2); cada uno de diez macetas. Las macetas consistieron en bolsas de plástico negro de 15x15 cm, las cuales se llenaron con sustrato hasta los 10 cm y se colocaron sobre un plato hondo de unicel, esto con el fin de evitar cualquier derrame al momento del riego.

7.4 Geminación y riego

Se realizó una siembra directa en ambas especies:



Figura 2. Germinación de *Raphanus sativus*

Para *R. sativus* se colocó una semilla por maceta, que germinó al tercer día bajo condiciones promedio de 30.3°C y 26% de humedad (Figura 2).



Figura 3. Germinación de *Coriandrum sativum*

Para *C. sativum* se empleó de cuatro a cinco semillas por maceta, las cuales germinaron ocho días después en condiciones promedio de 25°C y 37.75% de humedad (Figura 3).

7.5 Rotación y variables de respuesta

Las macetas fueron constantemente rotadas para que tuvieran las mismas condiciones de luz solar. Durante el cultivo de las plantas se registró el porcentaje de supervivencia, el crecimiento de la parte aérea y la presencia o ausencia de síntomas por toxicidad.

7.6 Cosecha

Al finalizar los tratamientos las plantas fueron cosechadas: cada individuo se enjuagó con agua desionizada, se pesó y midió; se colocó en bolsas de papel estraza y se dejó secar a temperatura ambiente hasta peso constante (Figura 4).



Figura 4. Material vegetal durante secado

7.7 Digestión

El material vegetal seco fue seccionado en raíz y parte aérea, se molió en mortero (Figura 5), y se pesó 0.5 g de cada órgano para su digestión en una mezcla triácida con 1 ml de ácido perclórico (HClO_4), 5 ml de ácido nítrico (HNO_3) y 0.5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), Figura 6 (Radojevic y Bashkin, 2006).



Figura 5. Material de rábano y cilantro molido



Figura 6. a) Muestras durante la digestión triácida, b) Muestras al finalizar el proceso

7.8 Análisis de metales pesados

Se determinó la concentración de Pb, Cd y Cr absorbidos en raíces y parte aérea de cada especie, mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con equipo Spectraa 200 marca Varian (Zapata-Cruz y Galván-Villanueva, 2004).

7.9 Análisis estadístico

Los datos de la concentración de metales fueron analizados en el programa estadístico Statgraphics Centurion 18, utilizando el método de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) con un nivel de confianza del 95.0%.

7.10 Índice de tolerancia

Para medir la respuesta de adaptación del rábano y cilantro durante su cultivo en un medio contaminado, se calculó el índice de tolerancia (IT) (Wilkins, 1978):

$$IT = (\text{Media de longitud de raíz con metal} / \text{Media de longitud de raíz sin metal}) \times 100$$

7.11 Factor de translocación

Para evaluar la capacidad de translocación de los metales a la parte aérea de las plantas, se obtuvo el factor de translocación (FT):

$$FT = \text{Concentración del metal en la parte aérea} / \text{Concentración del metal en raíces}$$

Audet y Charest (2007) señalan que cuando el factor de translocación es mayor a 1, la planta es hiperacumuladora; cuando el valor es menor a 1, se trata de una planta fitoestabilizadora. Yoon *et al.*, (2016) indican que el proceso de fitoextracción generalmente requiere la translocación de metales pesados a la parte cosechable de la planta, por ejemplo, los tallos y hojas, mientras que la tolerancia se restringe al suelo y raíz.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 SUPERVIVENCIA

La supervivencia en *Raphanus sativus* (rábano) fue del 100% en testigos y 100% en tratamientos con plomo, cadmio, cromo y mezcla de metales (Figura 7), mientras que en *Coriandrum sativum* (cilantro) los testigos presentaron 100% de supervivencia y los tratamientos con metales 80% (Figura 8).

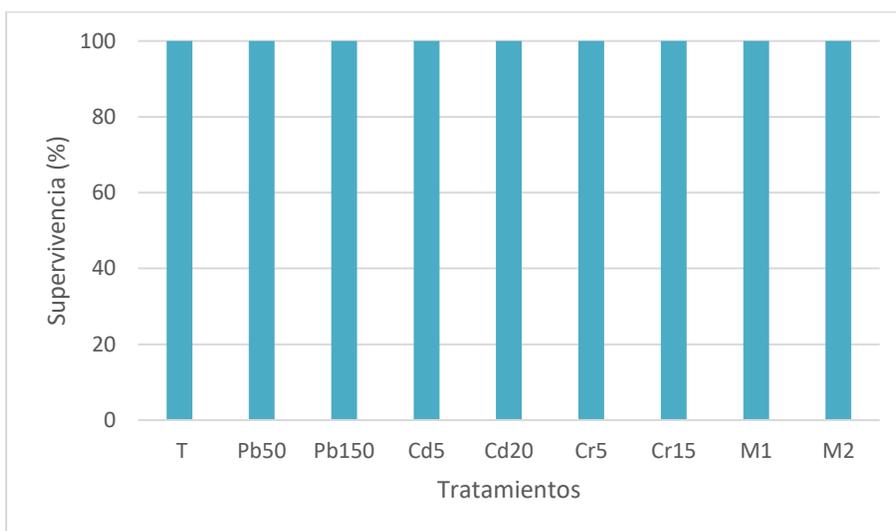


Figura 7. Supervivencia de rábano bajo distintos tratamientos: T (testigos), Pb (50 y 150 mg kg⁻¹ de plomo), Cd (5 y 20 mg kg⁻¹ de cadmio), Cr (5 y 15 mg kg⁻¹ de cromo), M (mezcla 1 y 2). Los datos que se muestran son la media (n=10)

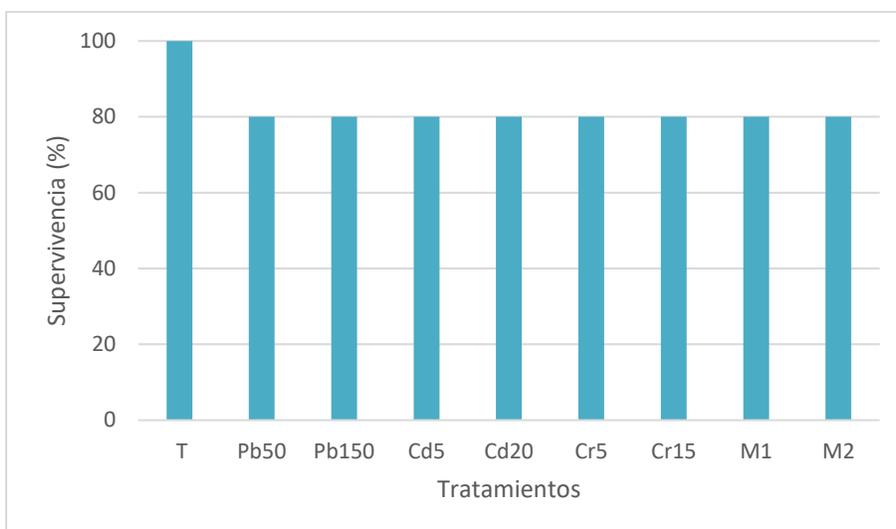


Figura 8. Supervivencia de cilantro bajo distintos tratamientos: T (testigos), Pb (50 y 150 mg kg⁻¹ de plomo), Cd (5 y 20 mg kg⁻¹ de cadmio), Cr (5 y 15 mg kg⁻¹ de cromo), M (mezcla 1 y 2). Los datos que se muestran son la media (n=10)

8.2 CRECIMIENTO DE LA PARTE AÉREA

Los individuos presentaron un crecimiento lineal durante siete semanas, a continuación, se muestra la altura promedio de cada especie al inicio y término de cada tratamiento:

Tratamientos con Plomo

En *R. sativus* los testigos registraron la menor altura inicial y final (Cuadro 3), sin embargo, su crecimiento y apariencia fue similar al de Pb50 y Pb150 (Figura 9), de manera que no presentaron síntomas por toxicidad (Figura 10).

Cuadro 3. *Altura promedio de la parte aérea de R. sativus en tratamientos con Pb.*

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	21.44 ± 1.74	26 ± 1.74
Pb50	22.4 ± 0.93	26.45 ± 0.72
Pb150	23.8 ± 1	26.4 ± 1.18

Donde Pb50 es el tratamiento con 50 mg kg⁻¹ de plomo y Pb150 el tratamiento con 150 mg kg⁻¹ de plomo

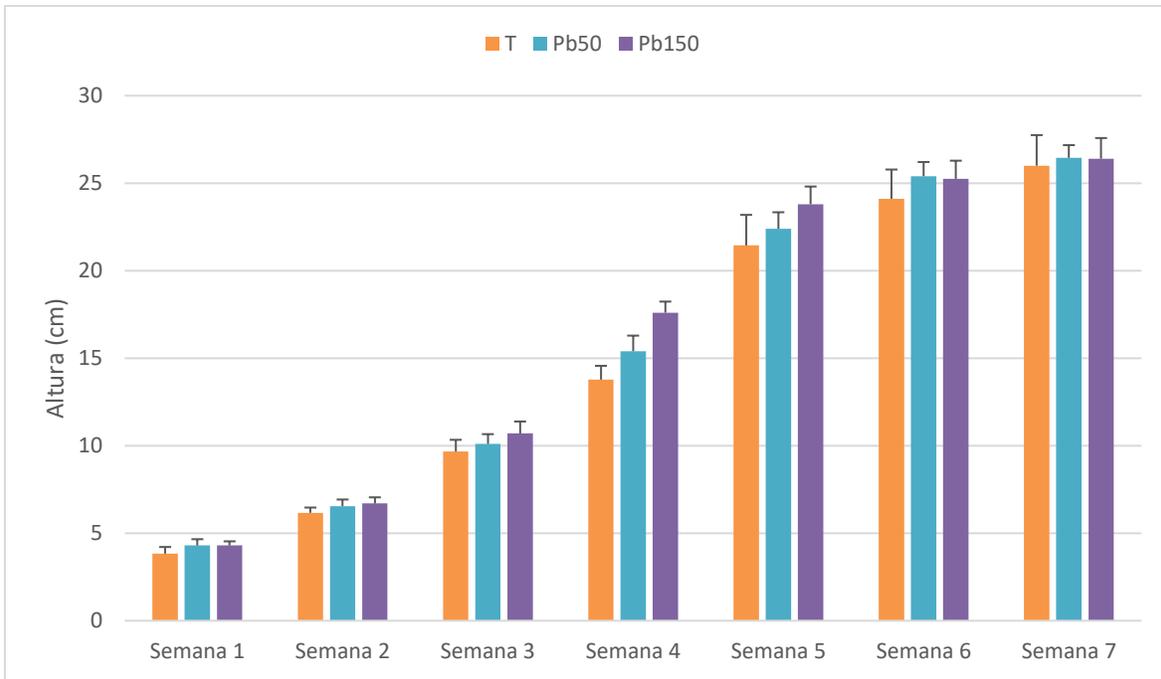


Figura 9. Crecimiento de la parte aérea de *R. sativus* en tratamientos con Pb. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=10)



Figura 10. Aspecto de *R. sativus* bajo tratamiento con plomo: a) Pb50 b) Pb150

En *C. sativum* las plantas del tratamiento Pb50 fueron las de menor altura inicial y final; los testigos y Pb150 alcanzaron la misma altura final (Cuadro 4, Figura 11). La última semana de tratamiento los individuos de Pb50 mostraron clorosis; por otra parte, los ejemplares de Pb150 murieron.

Gaur *et al.*, (2017) observaron que altas concentraciones de plomo afectan significativamente la parte aérea de la planta, disminuyendo su capacidad de tolerancia y provocando su muerte como en este caso (Figura 12).

Cuadro 4. Altura promedio de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con Pb.

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	16.2 ± 0.92	19.25 ± 1.2
Pb50	14.5 ± 1.7	19 ± 2
Pb150	16.68 ± 0.92	19.25 ± 1.2

Donde Pb50 es el tratamiento con 50 mg kg⁻¹ de plomo y Pb150 el tratamiento con 150 mg kg⁻¹ de plomo

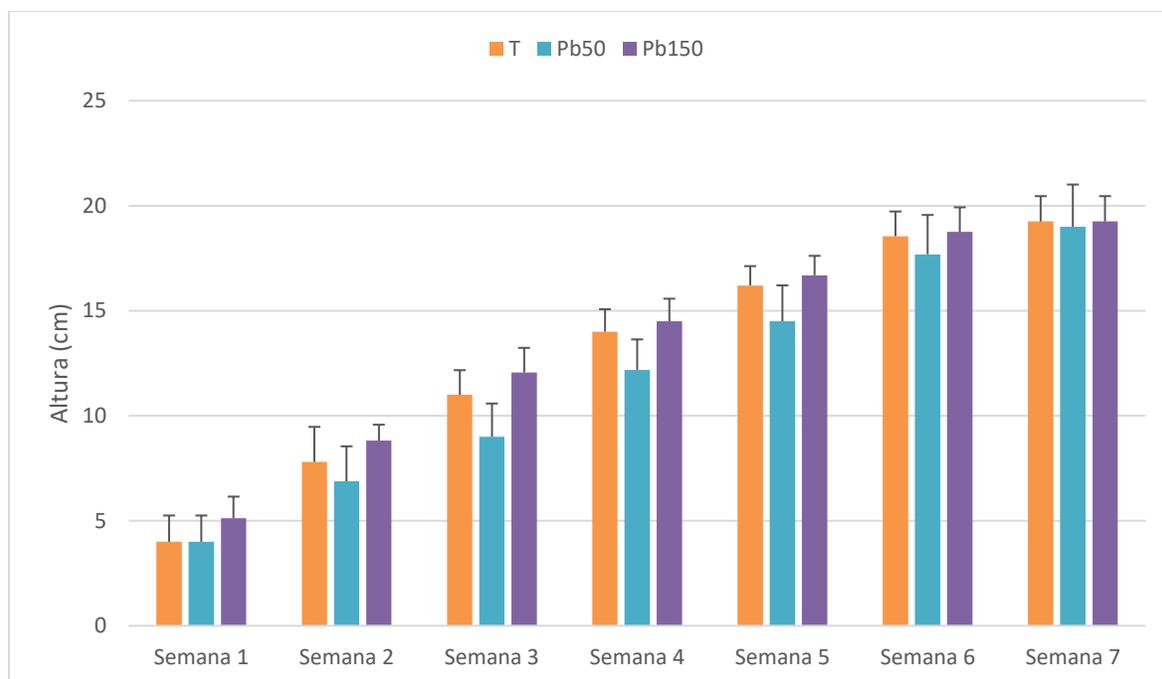


Figura 11. Crecimiento de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con Pb. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=10)



Figura 12. Aspecto de *C. sativum* bajo tratamiento con plomo: a) Pb50 b) Pb150

Tratamientos con Cadmio

En *R. sativus* los testigos tuvieron la mayor altura al inicio y final del tratamiento (Cuadro 5). Se observó que el crecimiento en Cd5 y Cd20 fue parecido (Figura 13), además durante la séptima semana las plantas de ambos tratamientos mostraron clorosis (Figura 14), un síntoma por toxicidad que está relacionado con la cantidad de metal que la planta puede translocar, como se explica más adelante en el apartado Metales Pesados en Órganos de *Raphanus sativus*.

Cuadro 5. *Altura promedio de la parte aérea de R. sativus en tratamientos con Cd.*

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	22.55 ± 1.27	26 ± 1.15
Cd5	20.15 ± 1.01	24.35 ± 1.2
Cd20	20.81 ± 1.13	25.68 ± 0.91

Donde Cd5 es el tratamiento con 5 mg kg⁻¹ de cadmio y Cd20 el tratamiento con 20 mg kg⁻¹ de cadmio

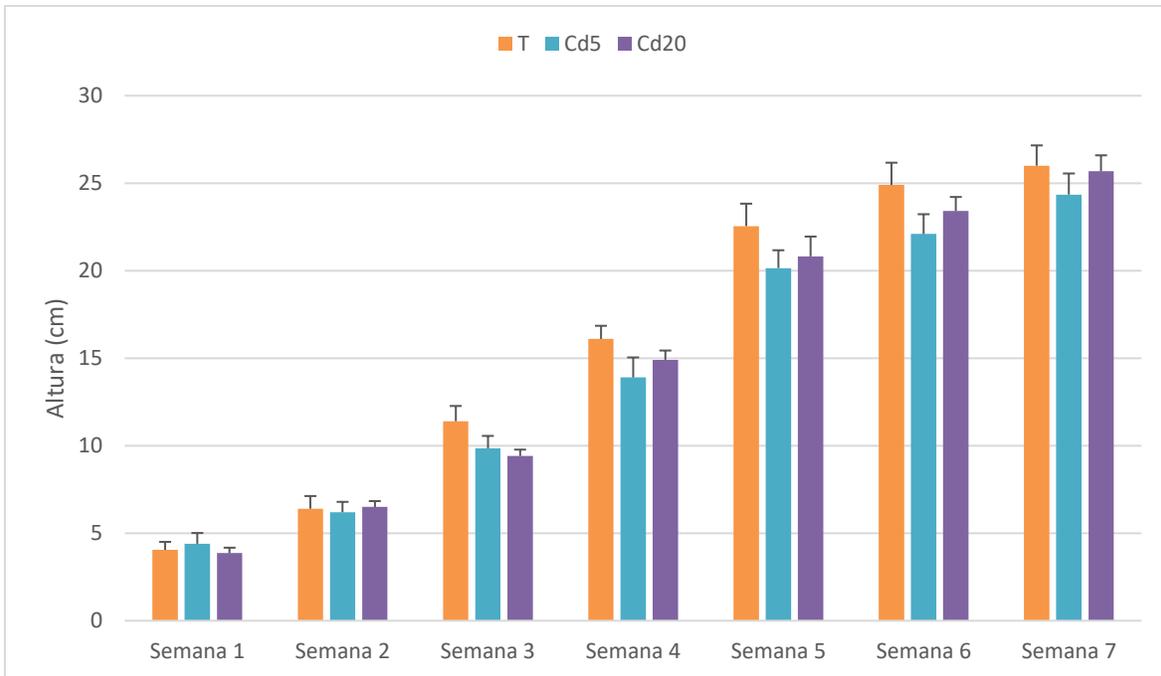


Figura 13. Crecimiento de la parte aérea de *R. sativus* en tratamientos con Cd. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=10)



Figura 14. Aspecto de *R. sativus* bajo tratamiento con cadmio: a) Cd5 b) Cd20

En *C. sativum* la altura final en testigos fue la más alta, mientras que en Cd20 fue la más baja (Cuadro 6, Figura 15). En la última semana algunos de los individuos del tratamiento Cd20 presentaron marchitez; mientras que en Cd5 se observó clorosis (Figura 16).

Cuadro 6. Altura promedio de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con Cd.

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	17.3 ± 1.51	21.36 ± 1.14
Cd5	17.18 ± 1.08	21.25 ± 1.14
Cd20	17.25 ± 1.51	19.18 ± 1.56

Donde Cd5 es el tratamiento con 5 mg kg⁻¹ de cadmio y Cd20 el tratamiento con 20 mg kg⁻¹ de cadmio

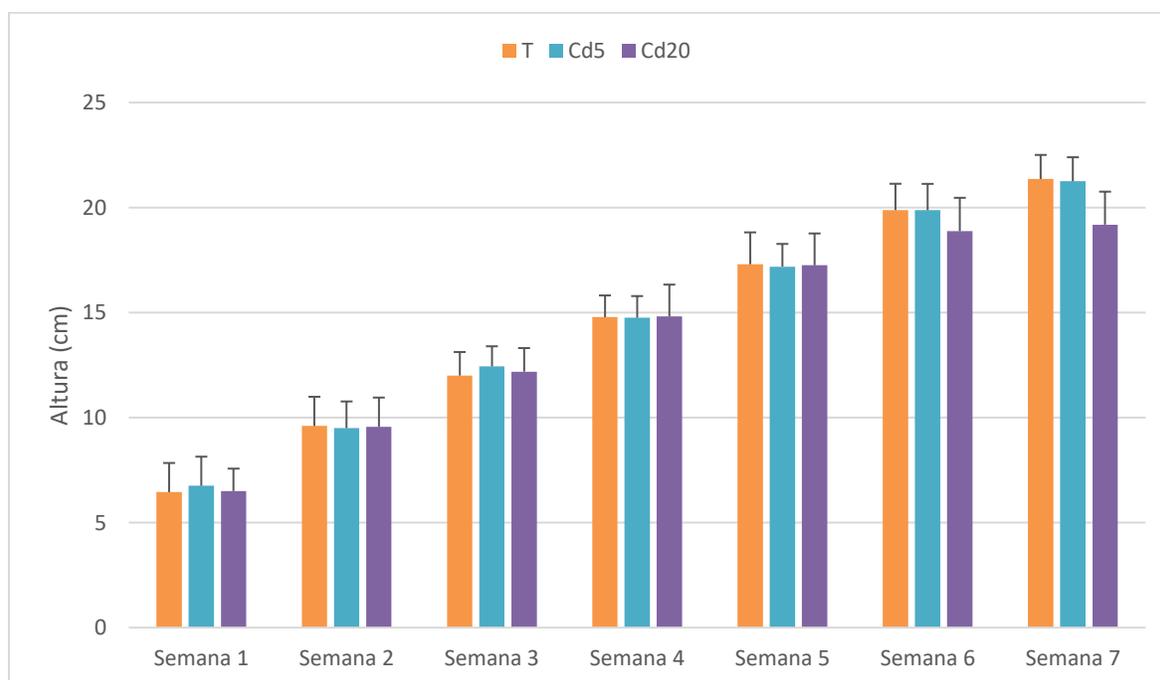


Figura 15. Crecimiento de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con Cd. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=10)



Figura 16. Aspecto de *C. sativum* bajo tratamiento con cadmio: a) Cd5 b) Cd20

Tratamientos con Cromo

En *R. sativus* la menor altura inicial y final registrada fue para Cr5, la mayor fue para Cr15 (Cuadro 7). Se encontró que el crecimiento de las muestras con metal fue semejante al de testigos (Figura 17), asimismo, no mostraron síntomas por toxicidad (Figura 18).

Cuadro 7. *Altura promedio de la parte aérea de R. sativus en tratamientos con Cr.*

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	21.9 ± 1.12	25.4 ± 1.31
Cr5	20.35 ± 1.46	24.1 ± 1.57
Cr15	22.1 ± 0.75	25.5 ± 0.76

Donde Cr5 es el tratamiento con 5 mg kg⁻¹ de cromo y Cr15 el tratamiento con 15 mg kg⁻¹ de cromo

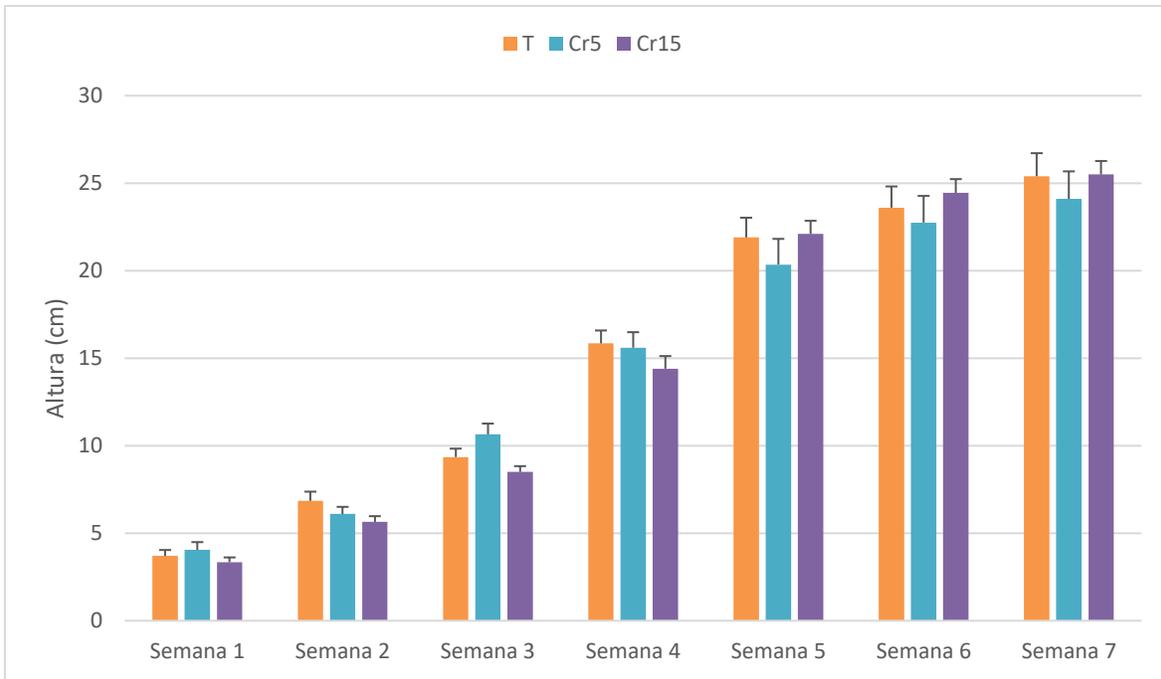


Figura 17. Crecimiento de la parte aérea de *R. sativus* en tratamientos con Cr. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=10)



Figura 18. Aspecto de *R. sativus* bajo tratamiento con cromo: a) Cr5 b) Cr15

En *C. sativum* los tratamientos con menor y mayor altura final, fueron Cr5 y testigos respectivamente (Cuadro 8), estos últimos mostraron un crecimiento parecido con Cr15 (Figura 19). Durante la última semana, los individuos de los dos tratamientos con cromo presentaron clorosis (Figura 20).

Cuadro 8. Altura promedio de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con Cr.

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	16.98 ± 1.16	20.35 ± 0.88
Cr5	15.43 ± 1.16	17.5 ± 1.07
Cr15	17.43 ± 1.21	20.06 ± 0.88

Donde Cr5 es el tratamiento con 5 mg kg⁻¹ de cromo y Cr15 el tratamiento con 15 mg kg⁻¹ de cromo

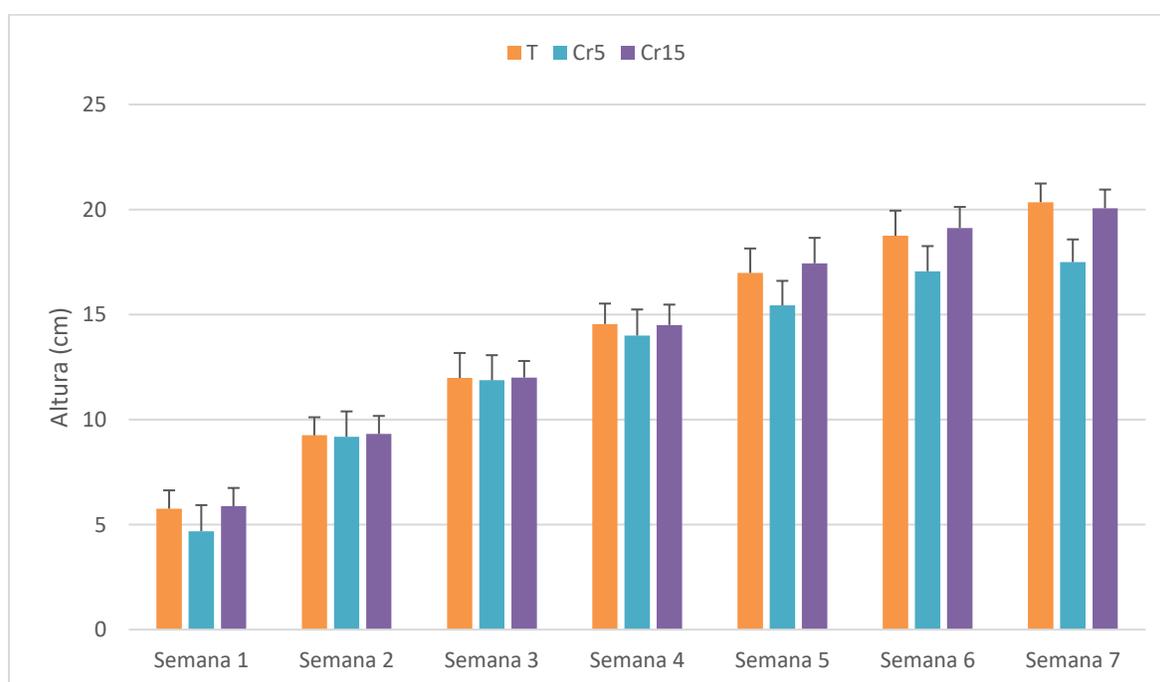


Figura 19. Crecimiento de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con Cr. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=10)



Figura 20. Aspecto de *C. sativum* bajo tratamiento con cromo: a) Cr5 b) Cr15

Tratamientos con Mezcla de metales

Los ejemplares de M2 en *R. sativus* presentaron la mayor altura inicial, empero su altura final fue la menor de todas, siendo M1 el de mayor altura final (Cuadro 9). Los testigos tuvieron un crecimiento similar a M1 (Figura 21). En la séptima semana las plantas de M1 y M2 mostraron clorosis y necrosis (Figura 22).

Cuadro 9. *Altura promedio de la parte aérea de R. sativus en tratamientos con mezcla de metales.*

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	21.38 ± 1.22	26.33 ± 1.23
M1	21.9 ± 1.16	26.75 ± 0.95
M2	22.2 ± 0.91	25.1 ± 1.27

Donde M1 es la mezcla con 50 mg kg⁻¹ de plomo, 5 mg kg⁻¹ de cadmio y 5 mg kg⁻¹ de cromo; y M2 la mezcla con 150 mg kg⁻¹ de plomo, 20 mg kg⁻¹ de cadmio y 15 mg kg⁻¹ de cromo

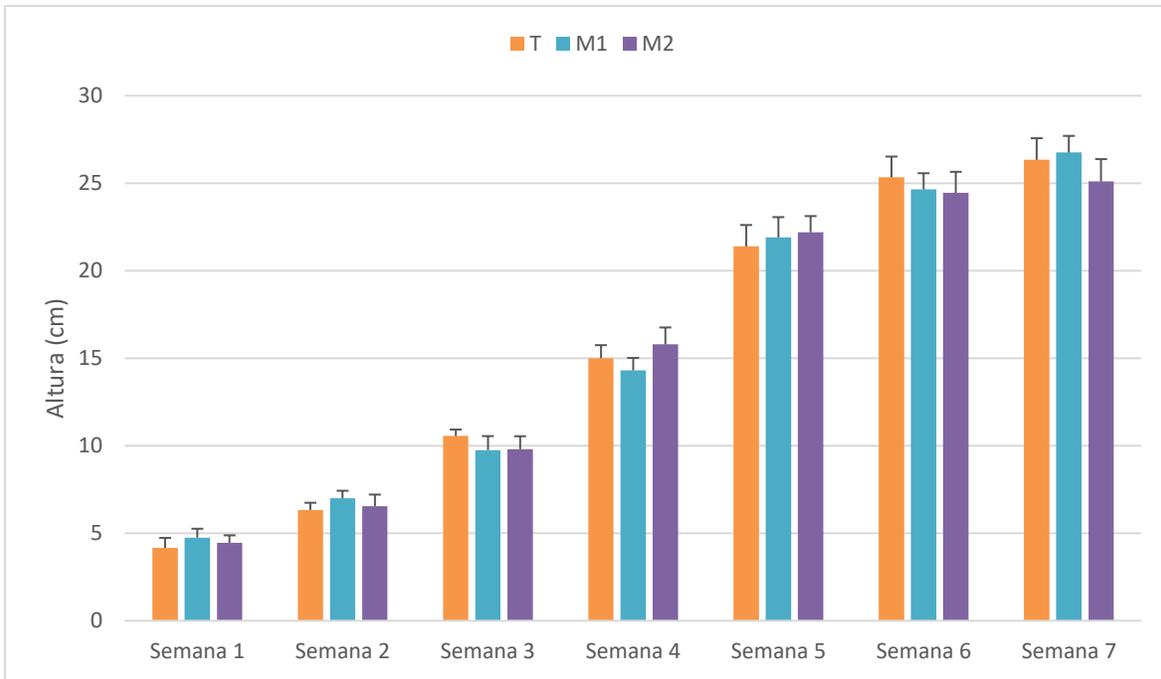


Figura 21. Crecimiento de la parte aérea de *R. sativus* en tratamientos con mezcla de metales. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=10)



Figura 22. Aspecto de *R. sativus* bajo tratamiento con mezcla de metales: a) M1 b) M2

En *C. sativum* M1 fue el tratamiento con menor altura inicial y final (Cuadro 10). Por otra parte, M2 tuvo un crecimiento equiparable al de testigos (Figura 23). En la última semana M1 y M2 manifestaron necrosis (Figura 24).

Cuadro 10. Altura promedio de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con mezcla de metales.

TRATAMIENTO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)
Testigo	16.83 ± 1.58	21 ± 1.7
M1	16.68 ± 1.58	19.31 ± 1.75
M2	17.31 ± 1.53	20.87 ± 1.7

Donde M1 es la mezcla con 50 mg kg⁻¹ de plomo, 5 mg kg⁻¹ de cadmio y 5 mg kg⁻¹ de cromo; y M2 la mezcla con 150 mg kg⁻¹ de plomo, 20 mg kg⁻¹ de cadmio y 15 mg kg⁻¹ de cromo

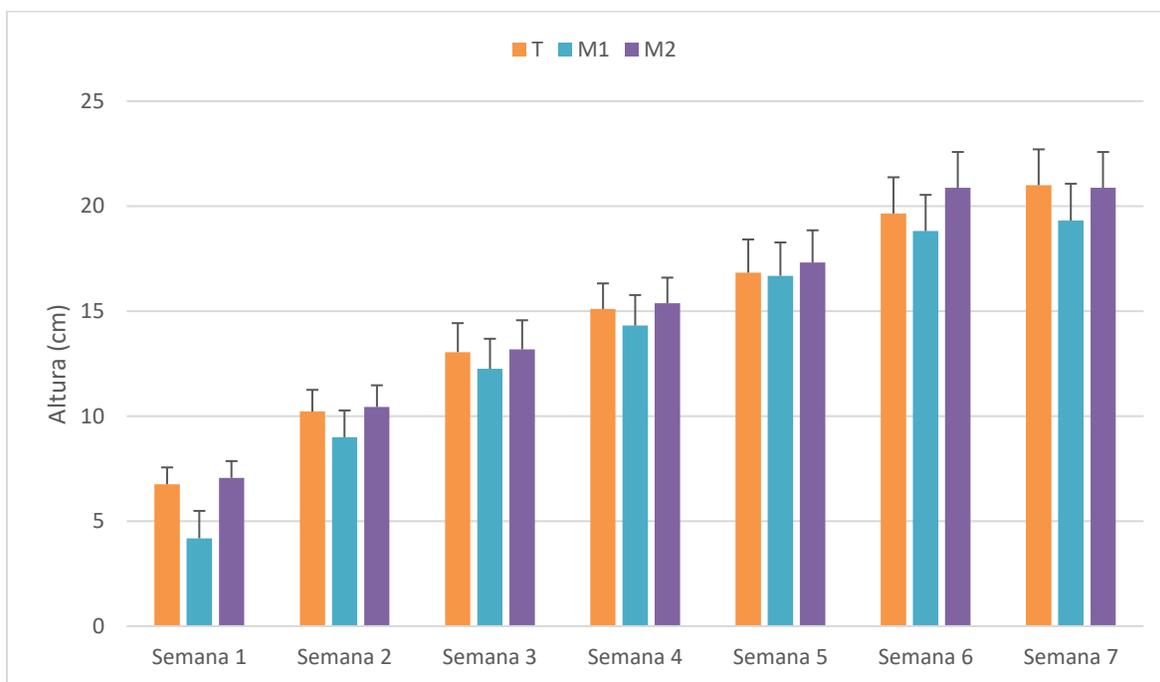


Figura 23. Crecimiento de la parte aérea de *C. sativum* en tratamientos con mezcla de metales. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=10)



Figura 24. Aspecto de *C. sativum* bajo tratamiento con mezcla de metales: a) M1 b) M2

8.3 LONGITUD DE LAS RAÍCES

Al realizar la cosecha se registró la longitud de la raíz de las plantas, además del diámetro en el caso de *Raphanus sativus* (Cuadro 11).

Cuadro 11. Longitud y diámetro promedio de la raíz de *Raphanus sativus*.

Tratamiento	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
Cd20	6.05	6.45
Cr5	5.9	6.2
CdT	5.85	7.2
Cd5	5.85	5.65
MT	5.83	6.55
Pb50	5.4	6.25
PbT	5.33	5.88
M1	5.3	5.15
M2	5.3	5.1
Pb150	5.15	5.65
Cr15	4.95	4.9

CrT

4.55

5.15

Donde CdT, CrT, PbT y MT son testigos; Cd5 y Cd20 son tratamientos con cadmio; Cr5 y Cr15 son tratamientos con cromo; Pb50 y Pb150 son tratamientos con plomo; M1 y M2 son mezclas. Los datos que se muestran son la media (n=10)

De todos los tratamientos con metales pesados en los ejemplares de rábano, Cd20 fue el que alcanzó una mayor longitud de raíz, con un diámetro de 6.45 cm. Respecto al resto de los tratamientos con cadmio, la longitud que se registró para CdT y Cd5 fue la misma, pero con 1.55 cm de diferencia en el diámetro (Figura 25).



Figura 25. Raíz de rábano bajo tratamientos con cadmio: a) CdT (testigo), b) Cd5 (5 mg kg⁻¹), c) Cd20 (20 mg kg⁻¹)

Cr5 obtuvo la segunda mayor longitud, su diámetro fue de 6.2 cm. Por el contrario, CrT y Cr15 tuvieron las dos longitudes más bajas, sus diámetros fueron 5.15 y 4.9 cm respectivamente (Figura 26).



Figura 26. Raíz de rábano bajo tratamientos con cromo: a) CrT (testigo), b) Cr5 (5 mg kg⁻¹), c) Cr15 (15 mg kg⁻¹)

De las mezclas de metales, los testigos (MT) alcanzaron la quinta mayor longitud de raíz, con un diámetro de 6.55 cm. Por otra parte, la longitud de la mezcla 1 (M1) fue igual a la de la mezcla 2 (M2), en cuanto a sus diámetros hubo una desigualdad de 0.05 cm entre ambas (Figura 27).



Figura 27. Raíz de rábano bajo tratamientos con mezcla de metales: a) MT (testigo), b) M1 (mezcla 1), c) M2 (mezcla 2)

Pb50 obtuvo la sexta mayor longitud, su diámetro fue 6.25 cm. En comparación con este tratamiento PbT y Pb150 tuvieron una menor longitud y diámetro (Figura 28).



Figura 28. Raíz de rábano bajo tratamientos con plomo: a) PbT (testigo), b) Pb50 (50 mg kg⁻¹), c) Pb150 (150 mg kg⁻¹)

Los datos de la longitud de raíz para los tratamientos en *C. sativum* se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12. Longitud promedio de la raíz de *Coriandrum sativum*.

Tratamiento	Longitud (cm)
CrT	7.64
Cr15	7.62
Cr5	7.25
MT	7.1
PbT	6.75
Pb50	6.68
M1	6.56
Cd5	5.93
CdT	5.83
Cd20	4.43
M2	3.81

Donde CdT, CrT, PbT y MT son testigos; Cd5 y Cd20 son tratamientos con cadmio; Cr5 y Cr15 son tratamientos con cromo; Pb50 y Pb150 son tratamientos con plomo; M1 y M2 son mezclas. Los datos que se muestran son la media (n=10)

En los ejemplares de cilantro, CrT alcanzó la mayor longitud de raíz seguida por Cr15 y Cr5 con 7.64, 7.62 y 7.25 cm correspondientemente (Figura 29).



Figura 29. Raíz de cilantro bajo tratamientos con cromo: a) CrT (testigo), b) Cr5 (5 mg kg⁻¹), c) Cr15 (15 mg kg⁻¹)

MT alcanzó la cuarta mayor longitud con 7.1 cm, de los demás tratamientos con mezcla de metales, M2 fue la más baja con 3.81 cm (Figura 30).



Figura 30. Raíz de cilantro bajo tratamientos con mezcla de metales: a) MT (testigo), b) M1 (mezcla 1), c) M2 (mezcla 2)

PbT alcanzó la quinta mayor longitud de raíz con 6.75 cm, mientras que Pb150 sólo midió 3.75 cm, siendo la menor longitud de todos los tratamientos con metales (Figura 31).



Figura 31. Raíz de cilantro bajo tratamientos con plomo: a) PbT (testigo), b) Pb50 (50 mg kg⁻¹), c) Pb150 (150 mg kg⁻¹)

Cd5 alcanzó la octava mayor longitud de raíz con 5.93 cm, por debajo de ella encontramos a CdT y Cd20 con 5.83 y 4.43 cm (Figura 32).



Figura 32. Raíz de cilantro bajo tratamientos con cadmio: a) CdT (testigo), b) Cd5 (5 mg kg⁻¹), c) Cd20 (20 mg kg⁻¹)

8.4 ÍNDICE DE TOLERANCIA

Cuadro 13. Índice de tolerancia (%).

Tratamiento	<i>Raphanus sativus</i>	<i>Coriandrum sativum</i>
Pb 50	101.31	98.96
Pb 150	96.62	55.55
Cd 5	100	101.71
Cd 20	103.41	75.98
Cr 5	129.67	94.89
Cr 15	108.79	99.73
M1	90.90	92.39
M2	90.90	53.66

Donde Pb50 y Pb150 son tratamientos con plomo, Cd5 y Cd20 son tratamientos con cadmio, Cr5 y Cr15 son tratamientos con cromo, M1 y M2 son mezclas. Los datos que se muestran son la media (n=10)

En el cuadro 13 se observó que *Raphanus sativus* fue más tolerante al cromo con un índice de 108.79%-129.67%, seguido de cadmio (100%-103.41%) y plomo (96.62%-101.3%). Al comparar estos porcentajes con los de las mezclas M1 y M2 (90.90%), se encontró que la tolerancia del rábano disminuye en presencia de varios metales, lo cual constata que es una especie moderadamente tolerante a suelos que contienen múltiples contaminantes como señalan Marchiol *et al.*, (2004).

En *Coriandrum sativum* el porcentaje de tolerancia fue menor a 100 en la mayoría de tratamientos, a excepción de Cd5 donde el índice de tolerancia fue 101.71%. Los resultados muestran que el cilantro tiene una baja tolerancia al plomo, cadmio y cromo en concentraciones de rango crítico en plantas, ya sea que se encuentren en mezcla con otros metales o no.

8.5 METALES PESADOS EN ÓRGANOS DE *Raphanus sativus*

Plomo

La concentración de plomo en los tratamientos con *R. sativus* fue mayor en la raíz que en la parte aérea (tallo y hojas), Figura 33.

Hoyos-Cerna y Guerrero-Padilla (2013) mencionan que metales como plomo y cadmio suelen ser acumulados en mayor concentración en la raíz (parte comestible de este tipo de hortalizas) debido a la especialización de almacenamiento de dicho órgano. Existen otros estudios en los que se ha reportado que el plomo es más propenso a acumularse en la raíz de *Raphanus sativus*, en 2009 Kapourchal y colaboradores investigaron la capacidad de extracción del rábano en suelos contaminados con plomo, sus resultados mostraron una mayor acumulación de este metal en las raíces en comparación con la parte aérea.

Se observó que a medida que aumenta la concentración de plomo en los tratamientos, tiende a ser mayor la cantidad de metal absorbido por *R. sativus*. En la raíz la concentración del tratamiento Pb150 fue 1.76 mg kg⁻¹, es decir 1.69 veces

más que la concentración de Pb50 (1.04 mg kg^{-1}); en la mezcla 2 se obtuvo 4.61 mg kg^{-1} , esto es 5.49 veces más que la mezcla 1 (0.84 mg kg^{-1}).

En la parte aérea de Pb50 la concentración fue 0.33 mg kg^{-1} , que es 1.1 veces más que Pb150 (0.3 mg kg^{-1}); en la mezcla 2 se registró 0.43 mg kg^{-1} , que es 4.05 veces más que la mezcla 1 (0.106 mg kg^{-1}) (Anexo 1).

Los datos muestran que hay un aumento de la concentración de plomo en la mezcla 2, tratamiento en el cual además de Pb, estuvieron presentes el Cd y Cr. De acuerdo con Hedayatzadeh *et al.*, (2020), es posible que la bioacumulación de plomo incremente en los diferentes órganos de las plantas en presencia de cadmio.

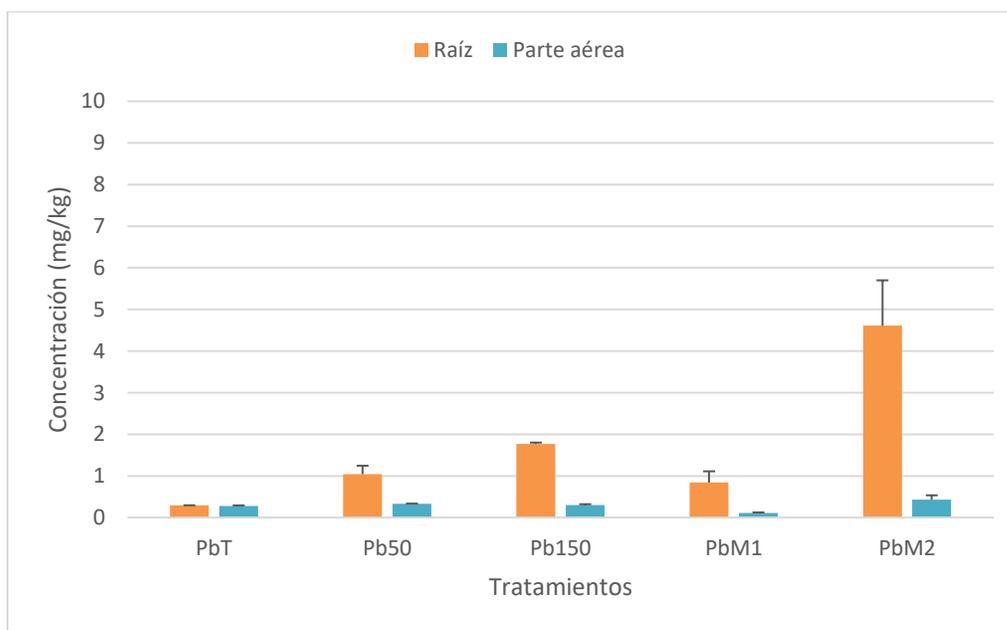


Figura 33. Concentración promedio de plomo en *Raphanus sativus*. Donde T representa a testigos, Pb50 a tratamientos con 50 mg kg^{-1} , Pb150 a tratamientos con 150 mg kg^{-1} , M1 a la mezcla 1 y M2 a la mezcla 2. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=3)

El factor de translocación en los tratamientos de plomo fue menor a 1 (Cuadro 14). Este resultado corrobora el obtenido por Hedayatzadeh *et al.*, (2020) quienes también encontraron que la cantidad de plomo translocado a tallos y hojas de rábano es menor a 1.

Especies como *R. sativus* no realizan una translocación de todos los iones metálicos hacia la parte aérea debido a que presentan una raíz primaria morfológicamente de reserva (Hoyos-Cerna y Guerrero-Padilla, 2013).

A pesar de presentar un bajo factor de translocación, motivo por el cual se consideraría como una planta fitoestabilizadora, es importante recordar que el potencial fitoextractor de una planta depende de su capacidad para absorber, translocar y secuestrar el metal de interés en su parte cosechable (Díez-Lázaro, 2008), que en el caso del rábano es la raíz.

Cuadro 14. Factor de Translocación de plomo en *Raphanus sativus* y Potencial de Fitorremediación*.

TRATAMIENTO	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN
Pb50	0.31	Fitoestabilizador
Pb150	0.16	Fitoestabilizador
M1	0.12	Fitoestabilizador
M2	0.09	Fitoestabilizador

*De acuerdo con Audet y Charest (2007). Los datos que se muestran son la media (n=3)

Cadmio

En los tratamientos con cadmio se registró una mayor concentración del metal en la raíz de *R. sativus*, Figura 34. Esto confirma los resultados de Hoyos-Cerna y Padilla-Guerrero (2013), quienes al respecto mencionan que la poca movilidad del metal a través de la planta es porque se mantiene adherido a la pared celular de las raíces, por tanto, se transporta en menor cantidad a la parte aérea.

Igualmente, Vásquez-Ramos y Celis-Llamoga (2020) señalan que hay una mayor concentración de cadmio en la raíz de rábano bajo tratamientos con 1, 15 y 30 mg kg⁻¹ de cadmio. Además, observaron que, al aumentar la concentración del metal, la cantidad absorbida por la planta es mayor. Lo cual coincide con los resultados de esta investigación, donde la concentración de la raíz para Cd20 fue 1.98 mg kg⁻¹, es decir 4.3 veces mayor que en Cd5 (0.45 mg kg⁻¹); en la mezcla 2 se obtuvo 2.57 mg kg⁻¹, que es 2.9 veces más que la mezcla 1 (0.87 mg kg⁻¹).

En la parte aérea de Cd20 se registró 1.45 mg kg⁻¹, esto es 3.2 veces más que en Cd5 (0.45 mg kg⁻¹); en la mezcla 2 la concentración fue de 1.12 mg kg⁻¹, que es 1.9 veces más que la mezcla 1 (0.58 mg kg⁻¹) (Anexo 1).

Al aumentar la disponibilidad de cadmio en el suelo y la acumulación de este en la planta, se interfiere con la translocación de algunos cationes metálicos con comportamiento electroquímico similar, que cumplen funciones fisiológicas importantes como el hierro, cuya deficiencia en la translocación de las raíces hacia las hojas origina una baja actividad fotosintética por la disminución en la producción de clorofila, y en consecuencia produce clorosis (Hoyos-Cerna y Guerrero-Padilla, 2013).

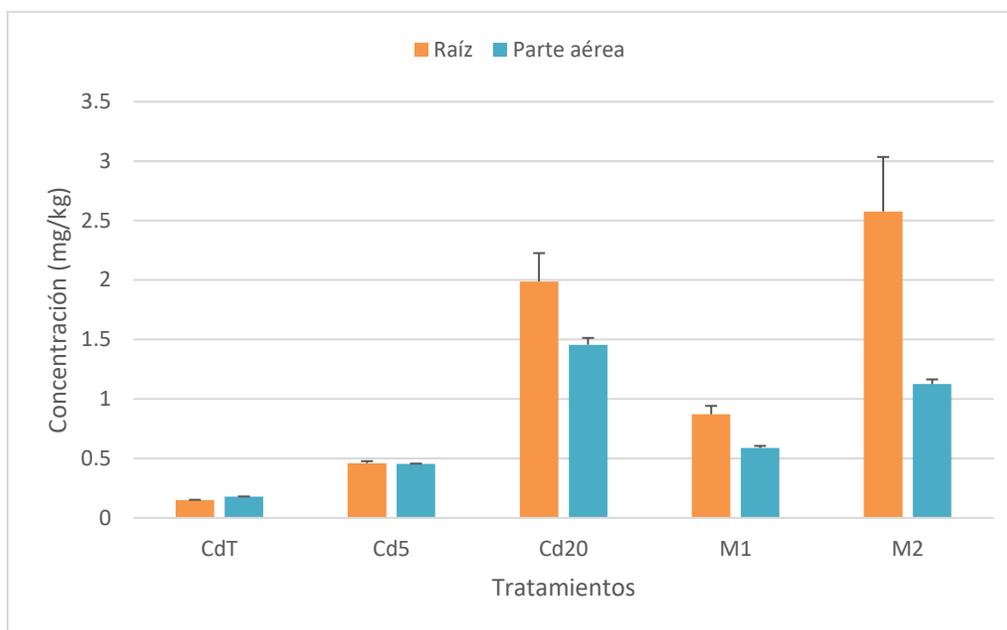


Figura 34. Concentración promedio de cadmio en *Raphanus sativus*. Donde T representa a testigos, Cd5 a tratamientos con 5 mg kg⁻¹, Cd20 a tratamientos con 20 mg kg⁻¹, M1 a la mezcla 1 y M2 a la mezcla 2. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=3)

El factor de translocación de *R. sativus* fue menor a 1, el cual disminuye en presencia de otros metales como se observa en el Cuadro 15. Ogoosi-Cuadros (2018) encontró que el factor de translocación de *Brassica campestris* en tratamientos con cadmio es menor a 1, esta es una especie que pertenece a la misma familia del rábano y que también posee una raíz primaria de almacenamiento.

Cuadro 15. Factor de Translocación de cadmio en *Raphanus sativus* y Potencial de Fitorremediación*.

TRATAMIENTO	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN
Cd5	0.98	Fitoestabilizador
Cd20	0.73	Fitoestabilizador
M1	0.67	Fitoestabilizador
M2	0.43	Fitoestabilizador

*De acuerdo con Audet y Charest (2007). Los datos que se muestran son la media (n=3)

Cromo

Los resultados para cromo muestran una mayor concentración del metal en la raíz de los tratamientos Cr5 y Cr15 (Figura 35), con una concentración de 1.58 mg kg^{-1} y 4.005 mg kg^{-1} correspondientemente; en la parte aérea su concentración fue 0.03 mg kg^{-1} y 1.35 mg kg^{-1} (Anexo 1).

Al comparar estos resultados con otros estudios en especies de la misma familia que el rábano y con raíz morfológicamente similar, se encontró que en 2017 Montero-Riuz evaluó a *Brassica napus* en la fitoextracción de cromo, obteniendo que el metal se acumula más en la raíz que en la parte aérea; en 2004 Han *et al.*, estudiaron la fitodisponibilidad y toxicidad de cromo III y VI en *Brassica juncea*, la cual presentó una mayor acumulación en la raíz. De acuerdo con Shanker *et al.*, (2004) esto podría deberse a la inmovilización del metal en las vacuolas de las células radicales para disminuir su toxicidad.

En contraste con lo anterior, los tratamientos con mezcla de metales tuvieron una mayor concentración de cromo en la parte aérea de *Raphanus sativus*. En la mezcla 1 la raíz acumuló 0.08 mg kg^{-1} , mientras que la parte aérea acumuló 0.61 mg kg^{-1} . En la mezcla 2 la concentración en la raíz fue 0.35 mg kg^{-1} y en la parte aérea 0.61 mg kg^{-1} (Anexo 1).

Los resultados no coinciden con los de otras investigaciones, como la de Marchiol (2004) donde *R. sativus* acumuló una mayor concentración de cromo en la raíz al desarrollarse en un medio contaminado con otros metales. Sin embargo, se sabe que en la acumulación de metales pesados cada tratamiento tiene su propio efecto en la absorción y translocación de iones metálicos dentro de los órganos de las plantas (Hoyos-Cerna y Guerrero-Padilla, 2013).

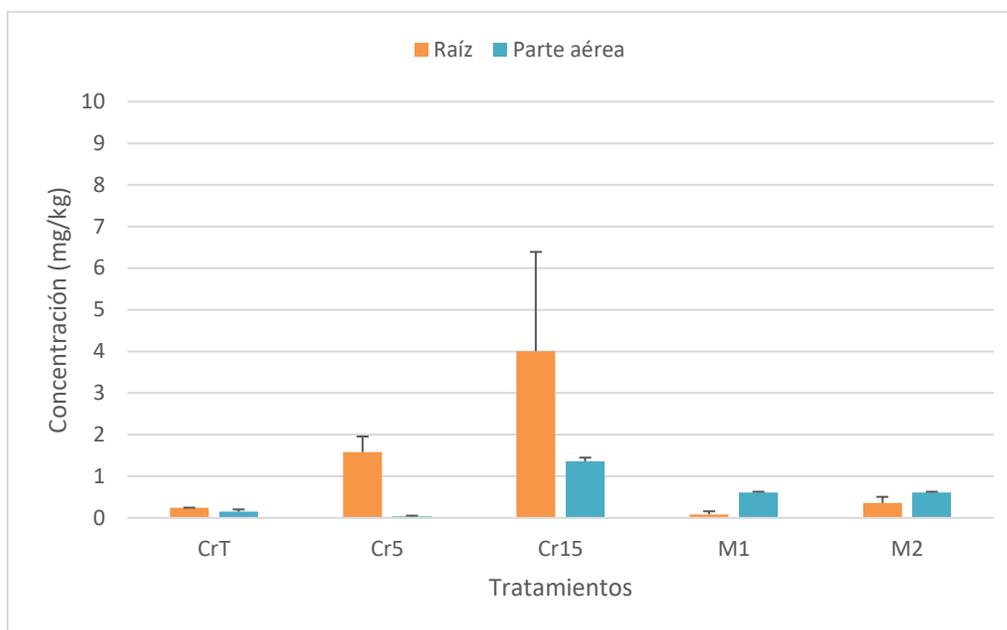


Figura 35. Concentración promedio de cromo en *Raphanus sativus*. Donde T representa a testigos, Cr5 a tratamientos con 5 mg kg⁻¹, Cr15 a tratamientos con 15 mg kg⁻¹, M1 a la mezcla 1 y M2 a la mezcla 2. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=3)

El factor de translocación en Cr5 y Cr15 fue menor a 1, mientras que en M1 y M2 fue mayor a este valor (Cuadro16). En las mezclas se observó que el factor de translocación disminuye al aumentar la concentración de los metales, lo que ratifica los resultados de Han *et al.*, (2004), pues señalan que el factor de translocación de cromo en *Brassica juncea* disminuyó al aumentar la concentración del metal en los tratamientos, y mencionan que esto puede ser un mecanismo de sobrevivencia para las plantas que crecen en suelos altamente contaminados.

Cuadro 16. Factor de Translocación de cromo en *Raphanus sativus* y Potencial de Fitorremediación*.

TRATAMIENTO	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN
Cr5	0.02	Fitoestabilizador
Cr15	0.33	Fitoestabilizador
M1	7.2	Hiperacumulador

*De acuerdo con Audet y Charest (2007). Los datos que se muestran son la media (n=3)

8.6 METALES PESADOS EN ÓRGANOS DE *Coriandrum sativum*

Plomo

La concentración de plomo en la parte aérea de *C. sativum* para Pb50, Pb150, mezcla 1 y mezcla 2 fue de 0.49, 0.55, 0.04 y 1.99 mg kg⁻¹ respectivamente. Mientras que en la raíz se obtuvo 15.36, 23.28, 6.51 y 27.59 mg kg⁻¹ para los mismos tratamientos (Anexo 2).

Estos valores indican una mayor concentración del metal en la raíz (Figura 36), además de un bajo factor de translocación (Cuadro 17). Lo que ratifica los resultados de Garrett y Trott (2019) respecto al potencial de fitorremediación del cilantro en suelos contaminados con plomo; así como los de Gaur *et al.*, (2017) que al analizar la cantidad de Pb en *Coriandrum sativum*, encontraron una mayor cantidad del metal en la raíz y por tanto una baja translocación, concluyendo que su potencial es de fitoestabilización.

En algunas plantas el Pb es capaz de acumularse principalmente en las raíces siendo mínima su presencia en otros órganos, esto se debe a la deposición del metal en las paredes celulares del tejido radicular (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

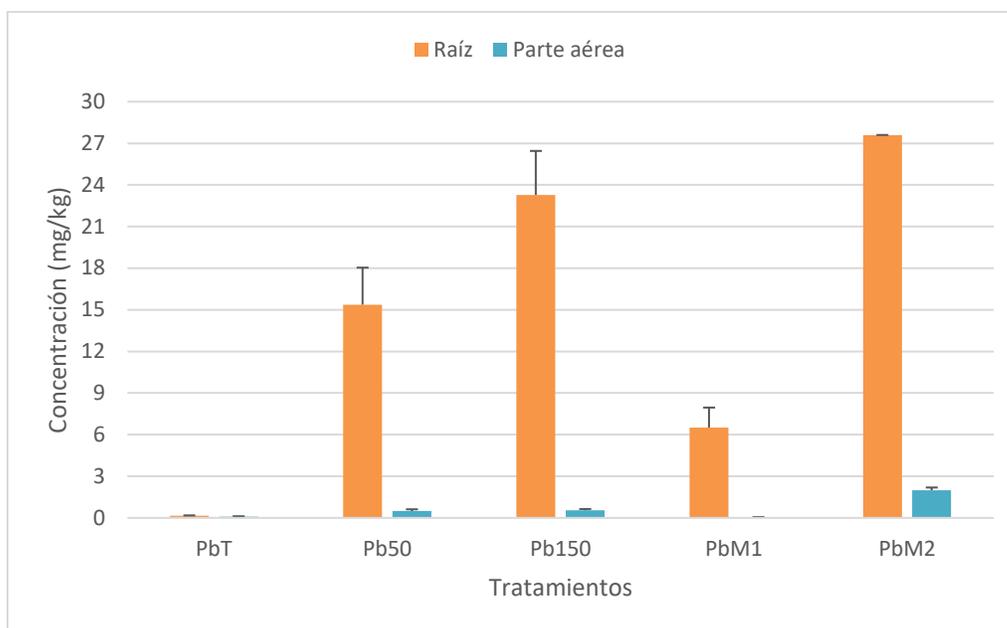


Figura 36. Concentración promedio de plomo en *Coriandrum sativum*. Donde T representa a testigos, Pb50 a tratamientos con 50 mg kg⁻¹, Pb150 a tratamientos con 150 mg kg⁻¹, M1 a la mezcla 1 y M2 a la mezcla 2. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=3)

Cuadro 17. Factor de Translocación de plomo en *Coriandrum sativum* y Potencial de Fitorremediación*.

TRATAMIENTO	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	POTENCIAL DE FITORREMIACIÓN
Pb50	0.03	Fitoestabilizador
Pb150	0.02	Fitoestabilizador
M1	0.006	Fitoestabilizador
M2	0.07	Fitoestabilizador

*De acuerdo con Audet y Charest (2007). Los datos que se muestran son la media (n=3)

Cadmio

La concentración de cadmio mostró valores más altos en la raíz que en la parte aérea de *C. sativum* (Figura 37). En la parte aérea la concentración de los tratamientos Cd5, Cd20, mezcla 1 y mezcla 2 fue 0.32, 0.41, 0.28 y 0.61 mg kg⁻¹ correspondientemente; bajo estos tratamientos la raíz tuvo una concentración de 2.48, 2.59, 1.92 y 2.51 mg kg⁻¹ (Anexo 2).

Hasta el momento no se han reportado resultados similares en otros estudios, ya que generalmente el cilantro acumula una mayor cantidad de cadmio en la parte aérea, tal como señala Cahuasqui (2011).

No obstante, en 2015 Alonso-Hidalgo diseñó un eficiente sistema para la rizofiltración de plomo utilizando a *C. sativum* como modelo, con el cual afirmó que la planta logra disminuir la concentración del metal, ya que poseen una raíz que realiza un excelente trabajo de absorción. Extrapolando estos resultados a otros contaminantes como el cadmio y al analizar el factor de translocación de las muestras (Cuadro 18), se determinó que el potencial de fitorremediación del cilantro en tratamientos con 5 mg kg⁻¹ y 20 mg kg⁻¹ de cadmio es de fitoestabilización.

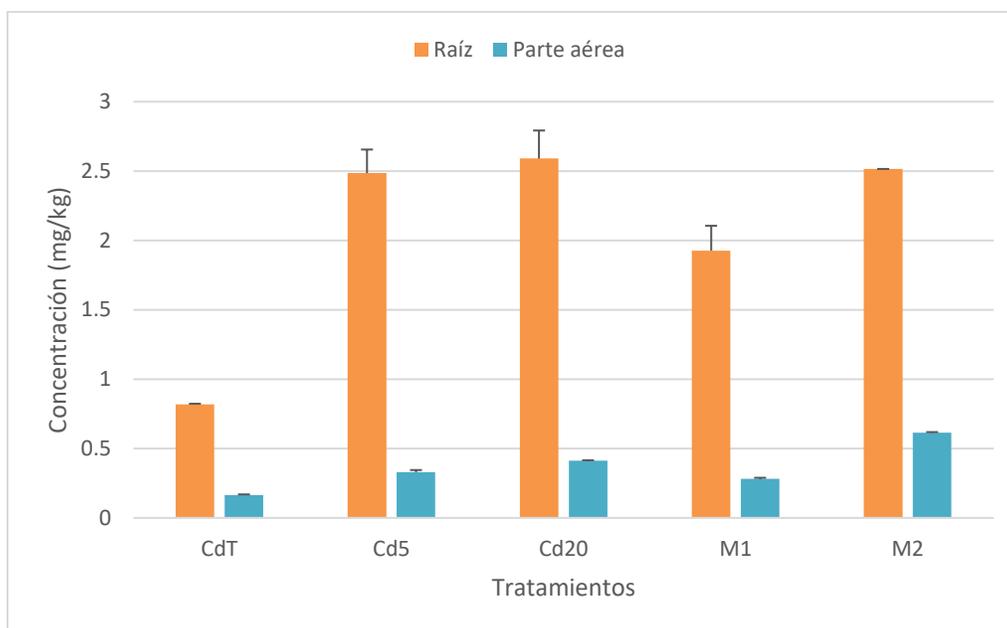


Figura 37. Concentración promedio de cadmio en *Coriandrum sativum*. Donde T representa a testigos, Cd5 a tratamientos con 5 mg kg⁻¹, Cd20 a tratamientos con 20 mg kg⁻¹, M1 a la mezcla 1 y M2 a la mezcla 2. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=3)

Cuadro 18. Factor de Translocación de cadmio en *Coriandrum sativum* y Potencial de Fitorremediación*.

TRATAMIENTO	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN
Cd5	0.13	Fitoestabilizador
Cd20	0.15	Fitoestabilizador
M1	0.14	Fitoestabilizador
M2	0.24	Fitoestabilizador

*De acuerdo con Audet y Charest (2007). Los datos que se muestran son la media (n=3)

Cromo

La concentración de cromo en la parte aérea de *C. sativum* para Cr5, Cr15, mezcla 1 y mezcla 2 fue 0.36, 2.21, 0.73 y 0.26 mg kg⁻¹ respectivamente; en la raíz la concentración para estos tratamientos fue 2.17, 3.99, 3.11 y 2.08 mg kg⁻¹ (Anexo 2).

Los datos muestran una mayor concentración en la raíz de cilantro, además de un factor de translocación menor a 1 en todos los tratamientos (Cuadro 19, Figura 38). Esto constata los resultados de Punetha *et al.*, (2019) quienes observaron que, en lugar de transferir el metal a la parte aérea, *C. sativum* acumula el cromo en la raíz.

Ghosh y Singh (2005) realizaron un estudio comparativo de la acumulación de cromo en las siguientes especies: *Ipomoea carnea*, *Datura innoxia*, *Phragmites karka*, *Cassia tora* y *Lantana camara*. Encontraron que después de 15 días de tratamientos, el metal se concentra más en las raíces que en las hojas de la mayoría de las plantas, excepto en *P. karka*. Sus resultados muestran que en general, el cromo tiende acumularse en la raíz, y a pesar de que las plantas de dicha investigación no pertenecen a la misma familia que *C. sativum*, se conoce que este metal suele ser inmovilizado dentro de las vacuolas para evitar que sustituya a otros elementos que son esenciales para el correcto funcionamiento del metabolismo de las células vegetales (Choppala, 2011 citado por Ortega-Bedoya, 2017).

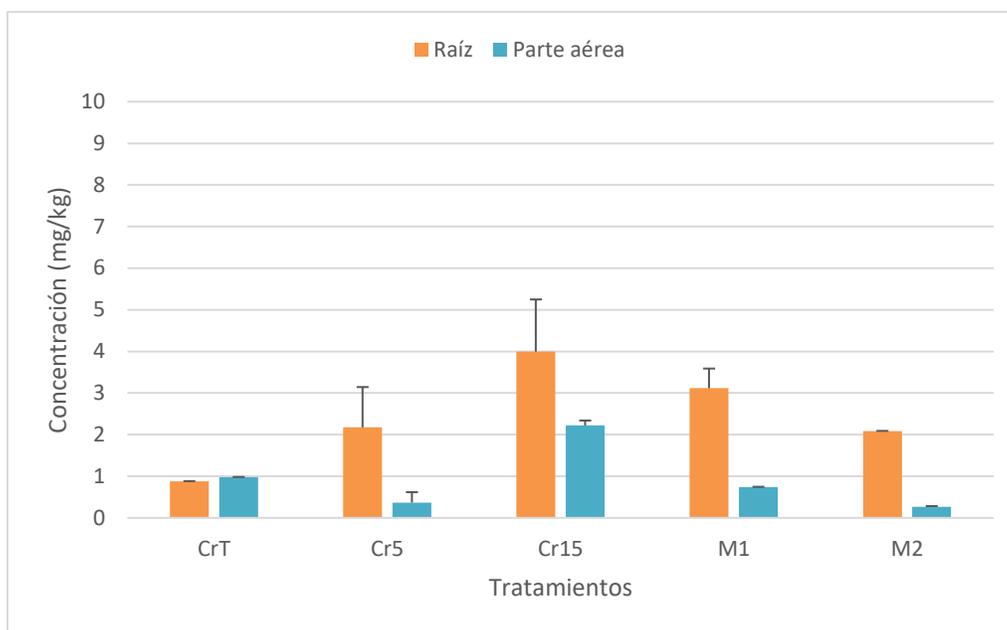


Figura 38. Concentración promedio de cromo en *Coriandrum sativum*. Donde T representa a testigos, Cr5 a tratamientos con 5 mg kg⁻¹, Cr15 a tratamientos con 15 mg kg⁻¹, M1 a la mezcla 1 y M2 a la mezcla 2. Los datos que se muestran son la media \pm EE (n=3)

Cuadro 19. Factor de Translocación de cromo en *Coriandrum sativum* y Potencial de Fitorremediación*.

TRATAMIENTO	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN
Cr5	0.16	Fitoestabilizador
Cr15	0.55	Fitoestabilizador
M1	0.23	Fitoestabilizador
M2	0.12	Fitoestabilizador

*De acuerdo con Audet y Charest (2007). Los datos que se muestran son la media (n=3)

IX. CONCLUSIONES

Raphanus sativus (rábano) y *Coriandrum sativum* (cilantro) son especies con potencial para la fitorremediación de suelos contaminados por plomo, cadmio y cromo. En el caso de en *R. sativus* la descontaminación es a través del proceso de fitoextracción, mientras que en *C. sativum* es por medio del proceso de fitoestabilización.

R. sativus es una hortaliza donde la parte cosechable es la raíz, la cual al ser un órgano de almacenamiento no transloca tan fácilmente los iones metálicos hacia la parte aérea, lo que resulta en una mayor acumulación de plomo, cadmio y cromo en la raíz.

En *C. sativum* la parte cosechable son los tallos y las hojas, por lo cual para considerar que es una especie fitoextractora, es necesario un factor de translocación mayor al que se obtuvo en este estudio. Por este motivo se concluye que es una especie fitoestabilizadora de plomo, cadmio y cromo.

De las dos especies, el rábano mostró ser más tolerante que el cilantro en la mayoría de los tratamientos.

La acumulación de plomo, cadmio y cromo en tratamientos con mezcla de metales no disminuyó de manera generalizada como se esperaba: en *R. sativus* sólo los tratamientos con cromo presentaron una menor acumulación de dicho metal en las mezclas 1 y 2, mientras que en *C. sativum* se obtuvo una menor acumulación de cadmio y cromo en los tratamientos con mezcla de metales.

X. REFERENCIAS

1. Alloway, B. J. (1995). Heavy metals in soils. pp. 354. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=CX1GwLBhkC4C&pg=PA354&dq=heavy+metals+in+plants+mcnichols&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiAuvLqwmHhVlgK0KHQajCpoQ6AEIKzAA#v=onepage&q=heavy%20metals%20in%20plants%20mcnichols&f=false>
2. Alonso-Hidalgo, V. (2015). Rizofiltración de plomo del agua de la piscina de relaves de la minera Orenas S.A del cantón Camilo Ponce Enríquez-Azuay, utilizando *Coriandrum Sativum* (culantro) en humedales artificiales (2014). (Tesis de licenciatura en Ingeniería Química). Universidad Técnica de Machala, Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud, Ecuador.
3. Alvarado, C. J.; Dasgupta-Schubert, N.; Ambriz, E.; Sánchez-Yañez, J. M. & Villegas, J. (2011). Hongos Micorrízicos Arbusculares y la fitorremediación de plomo. Rev. Int. Contam. Ambie. 27(4), 357-364.
4. Audet, P. y Charest, C. (2007). Heavy metal phytoremediation from a metaanalytical perspective. Environmental Pollution, 147, 7.
5. Cahuasqui-Toscano, S. G. (2011). Determinación de metales pesados (plomo, cadmio y níquel) en el cilantro (*Coriandrum sativum* L) en Aloag, cantón Mejía, provincia de Pichincha por espectrofotometría de absorción atómica de llama. (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador.
6. Carranza-Bautista, H. D. (2009). Bioacumulación de cadmio en plantas silvestres de la zona de Xochimilco con potencial para fitorremediación. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México.
7. Covarrubias, S. A. y Peña-Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. Rev. Int. Contam. Ambie. 33 (Especial Biotecnología e ingeniería ambiental), 7-21. DOI: 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01
8. Delgadillo-López, A.E.; González-Ramírez, C.A.; Prieto-García, F.; Villagómez-Ibarra, J.R. y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 14(2011), 597-612.
9. Díez-Lázaro, F. J. (2008). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela, España.
10. Rodríguez-Eugenio, N.; McLaughlin, M.; Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. FAO, Roma.

11. Ferreyroa, G. V. (2016). Retención, biodisponibilidad y remediación de Pb en suelos: efectos de la interacción suelo-planta (*Brassica napus*) y bioacumulación. (Tesis de doctorado en Ciencias Biológicas). Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
12. Garret, S. y Trott, T. (2019). The Phytoremediative Effects of *Coriandrum sativum* in Lead Contaminated Soil. Southern Adventist University, Hickman Science Center, Estados Unidos de América.
13. Gaur, N.; Kukreja, A.; Yadav, M.; Tiwar, A. (2017). Assessment of phytoremediation ability of Coriander sativum for soil and water co-contaminated with lead and arsenic: a small-scale study. *Biotech*, 7:196. DOI: 10.1007/s13205-017-0794-6
14. Gómez-Pérez, L. (2011). Evaluación del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo diferentes condiciones de fertilización orgánica e inorgánica. (Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Agrobiología). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.
15. Ghosh, M. y Singh, S. (2005). Comparative uptake and phytoextraction study of soil induced chromium by accumulator and high biomass weed species. *Applied Ecology and Environmental Research* 3(2): 67-79.
16. Han, F.; Maruthi Sridhar, B.; Monts, D.; Su, Y. (2004). Phytoavailability and toxicity of trivalent and hexavalent chromium to *Brassica juncea*. *New Phytologist*, 162: 489–499.
17. Hedayatzadeh, F.; Banaee, M.; Shayesteh, K. (2020). Bio-Accumulation of Lead and Cadmium by Radish (*Raphanus sativus*) and Cress (*Lepidium sativum*) under Hydroponic Growing Medium. *Pollution*, 6(3): 681-693. DOI: 10.22059/poll.2020.297147.742
18. Hernández-Dávila, J. (2003). Crecimiento y desarrollo del cilantro *Coriandrum sativum* L. por efecto del fotoperiodo y la temperatura y su control con fitoreguladores. (Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
19. Hoyos-Cerna, M. & Guerrero-Padilla, A. (2013). Bioacumulación de plomo y cadmio en *Brassica oleracea* Subsp. *Capitata* (L.) Metzg. y *Raphanus sativus* L. *SCIÉNDO*. 16(2), 70-82.
20. Huayllani-Enriquez, M. G. (2016). Presencia de metales pesados en la estructura vegetal de *Apeiba membranacea* Spruce ex Benth. (Peine de mono), *Ochroma pyramidale* (Cav, ex. Lam.) Urb. (Topa), *Ceiba pentandra* (L.) Gaerth. (Lupuna), *Erythrina ulei* Harms (Amasisa) instaladas en áreas intervenidas por la minería aurífera en el sector Manuani-Inambari-Tambopata-Madre de Dios. (Tesis para optar por el Título de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente). Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Perú.

21. Hydroenvironment. (2018). Guía para el cultivo de Rábano (*Raphanus sativus*).
http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=406
revisión 15-Ene-2018.
22. Hydroenvironment. (2018). Cilantro hidropónico y su cultivo.
http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=56
revisión 18-Ene-2018.
23. Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*. 3ª ed. Boca Ratón, Estados Unidos de Norteamérica: CRC Press LLC.
24. Kapourchal, So. A; Kapourchal, Sa. A.; Pazira, E.; Homae, M. (2009). Assessing radish (*Raphanus sativus* L.) potential for phytoremediation of lead-polluted soils resulting from air pollution. *Plant Soil Environ.* 55, (5): 202–206.
25. Mahmood, A. & Malik, R. N. (2014). Human health risk assessment of heavy metals via consumption of contaminated vegetables collected from different irrigation sources in Lahore, Pakistan. *Arabian Journal of Chemistry.* 7, 91-99.
26. Marchiol, L.; Assolari, S.; Sacco, P. & Zerbi, G. (2004). Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. Elsevier: *Environmental Pollution.* 132, 21-27. DOI:10.1016/j.envpol.2004.04.001
27. Mendoza-Correa, X. A. (2018). Las chinampas del humedal de Xochimilco: Sistemas de biorremediación para la sostenibilidad. (Tesis para obtener el grado de Maestra en Administración integral del ambiente). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México.
28. Missouri Botanical Garden. (2018) Tropicos.org.
<http://www.tropicos.org/Name/4100238> revisión 15-Ene-2018.
29. Missouri Botanical Garden. (2018) Tropicos.org.
<http://www.tropicos.org/Name/1700064> revisión 18-Ene-2018.
30. Montero-Ruiz, M. (2017). Biorremediación de suelos contaminados con Cr (VI) y lindano. (Tesis de fin de grado en Biología). Universidad del País Vasco, España.
31. Navarro-Aviñó, J. P.; Aguilar, Alonso I.; López-Moya, J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas.* 16(2), 10-25.
32. Nungaray-Arteaga, N. E. (2014). Fitorremediación del suelo de la mina La Blanca, Hidalgo, con plantas de la especie *Cosmos bipinnatus* y el género *Dhalia*. (Tesis de licenciatura en Biología). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México.

33. Ogosi-Cuadros, S. (2018). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando *Brassica campestris* L. en la Estación Experimental El Mantaro-Junín. (Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional del Centro de Perú, Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Perú.
34. Ortega-Bedoya, I. (2017). Evaluación de las interacciones físico-químicas y biodisponibilidad del cromo hexavalente en biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando - Medellín. (Tesis de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Colombia.
35. Panda, S. K.; Choudhury, S. (2005). Toxic metals in plants: Chromium stress in plants. *Braz. J. Plants Physiol.* 17(1), 95-102.
36. Peralta-Pérez, M.R.; Muñoz-Castellanos, L.N.; Nevárez Moorillón, G.V. & Ballinas-Casarrubias, M.L. (2010). Fitorremediación como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados. *Toctli. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Biomédica.* 1(3), 1-9.
37. Prieto-Méndez, J.; González-Ramírez, C. A.; Román-Gutiérrez, A. D.; Prieto-García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems.* 10(1), 29-44.
38. Punetha, D.; Tewari, G.; Pande, C.; Rana, L.; Tripathi, S. (2019). Effect of Manure on the Metal Efficiency of *Coriandrum sativum*. En Rathoure, A. (Ed.), *Zero Waste: Management practices for environmental sustainability.* 1st. Edition (pp. 277-300) Boca Raton, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9780429059247>.
39. Radojevic, M. & Bashkin, V. N. (2006). *Practical Environmental Analysis* 2nd. ed. Royal Society of Chemistry. Reino Unido, pp. 289-290.
40. Reyes, Y.C.; Vergara, I.; Torres, O.E.; Díaz-Lagos, M.; González, E.E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo,* 16(2), 66-77.
41. Shanker, A.; Djanaguiraman, M.; Sudhagar, R.; Chandrashekar, C.; Pathmanabhan, G. (2004). Differential antioxidative response of ascorbate glutathione pathway enzymes and metabolites to chromium speciation stress in green gram (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek. cv CO 4) roots. *Plant Science,* 166(4), 1035-1043.
42. Turan, M. & Esringü, A. (2007). Phytoremediation based on canola (*Brassica napus* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn. *Plant Soil Environ.* 53(1), 7–15.

43. Vázquez-Ramos, L. y Celis-Llamoga, J. (2020). Capacidad de absorción del plomo y cadmio en el cultivo de *Raphanus sativus*, Jacamarca-2019. (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Perú.
44. Volke-Sepúlveda, T.; Velasco-Trejo, J. A. & de la Rosa-Pérez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. 1ª. ed. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat).
45. Wilkins, D. A. (1978). The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytol.* 80, 623-633.
46. Yoon, J.; Cao, X.; Zhou, Q.; Ma, L. (2016). Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on contaminated Florida site. *Science of the Total Environment.* 368: 456-464.
47. Zapata-Cruz, A y Galván-Villanueva, Ma. de los A. (2004). Manual básico de Absorción Atómica para el manejo del equipo Spectraa 200 Marca Varian. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México.
48. Zumalave-Rey, B. (2018). Biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. En L. Brutti; M. Beltrán; I. García de Salamone (Eds.), *Biorremediación de los recursos naturales* (pp. 386-405). Buenos Aires: Ediciones INTA.

XI. ANEXOS

Anexo 1: Concentración promedio de metales pesados (mg kg⁻¹ en peso seco) en órganos de *Raphanus sativus* (rábano), Concentración total por tratamiento y Factor de translocación.

METAL	TRATAMIENTO	TEJIDO		CONCENTRACIÓN TOTAL	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN
		Parte Aérea	Raíz		
Plomo	T	0.28 ± 0.011	0.29 ± 0.005	0.57	0.96
	Pb50	0.33 ± 0.005	1.04 ± 0.201	1.37	0.31
	Pb150	0.3 ± 0.020	1.76 ± 0.034	2.06	0.16
	M1	0.106 ± 0.016	0.84 ± 0.270	0.94	0.12
	M2	0.43 ± 0.105	4.61 ± 1.085	5.04	0.09
	T	0.17 ± 0.002	0.14 ± 0.003	0.32	1.19
	Cd5	0.45 ± 0.001	0.45 ± 0.017	0.91	0.98
	Cd20	1.45 ± 0.057	1.98 ± 0.238	3.44	0.73
	M1	0.58 ± 0.017	0.87 ± 0.070	1.45	0.67
	M2	1.12 ± 0.040	2.57 ± 0.458	3.70	0.43
Cromo	T	0.15 ± 0.052	0.24 ± 0.005	0.39	0.62
	Cr5	0.03 ± 0.015	1.58 ± 0.375	1.61	0.02
	Cr15	1.35 ± 0.092	4.005 ± 2.384	5.36	0.33
	M1	0.61 ± 0.016	0.08 ± 0.074	0.69	7.2

M2	0.61 ± 0.016	0.35 ± 0.149	0.96	1.71
----	-----------------	-----------------	------	------

Donde T representa a testigos, Pb50 y Pb150 a tratamientos con plomo, Cd5 y cd20 a tratamientos con cadmio, Cr5 y Cr15 a tratamientos con cromo, M1 y M2 a las mezclas. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=3)

ANEXO 2: Concentración promedio de metales pesados (mg kg⁻¹ en peso seco) en órganos de *Coriandrum sativum* (cilantro), Concentración total por tratamiento y Factor de translocación.

METAL	TRATAMIENTO	TEJIDO		CONCENTRACIÓN TOTAL	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN
		Parte Aérea	Raíz		
	T	0.08 ± 0.033	0.15 ± 0.028	0.23	0.55
Plomo	Pb50	0.49 ± 0.123	15.36 ± 2.670	15.86	0.03
	Pb150	0.55 ± 0.090	23.28 ± 3.166	23.83	0.02
	M1	0.04 ± 0.015	6.51 ± 1.434	6.55	0.006
	M2	1.99 ± 0.2	27.59 ± 0.006	29.58	0.07
	T	0.16 ± 0.003	0.81 ± 0.004	0.98	0.2
Cadmio	Cd5	0.32 ± 0.015	2.48 ± 0.170	2.81	0.13
	Cd20	0.41 ± 0.004	2.59 ± 0.202	3.001	0.15
	M1	0.28 ± 0.008	1.92 ± 0.178	2.2	0.14
	M2	0.61 ± 0.004	2.51 ± 0.0006	3.12	0.24
Cromo	T	0.97 ± 0.005	0.87 ± 0.008	1.85	1.11

Cr5	0.36 ± 0.249	2.17 ± 0.969	2.54	0.16
Cr15	2.21 ± 0.119	3.99 ± 1.255	6.21	0.55
M1	0.73 ± 0.010	3.11 ± 0.472	3.85	0.23
M2	0.26 ± 0.02	2.08 ± 0.003	2.35	0.12

Donde T representa a testigos, Pb50 y Pb150 a tratamientos con plomo, Cd5 y cd20 a tratamientos con cadmio, Cr5 y Cr15 a tratamientos con cromo, M1 y M2 a las mezclas. Los datos que se muestran son la media ± EE (n=3)