ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS

ESTUDIO DE LABORATORIO DE LA FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO POR MEDIO DE LAS ESPECIES *SOLANUM NIGRUM* Y *OCIMUM BASILICUM*

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

KAREN VANESSA CÓRDOVA GAIBOR

karen.cordova@epn.edu.ec

DIRECTOR: ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR

ana.balarezo@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Karen Vanessa Córdova Gaibor declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

_____

KAREN VANESSA CÓRDOVA GAIBOR

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Karen Vanessa Córdova Gaibor, bajo mi supervisión.

_____

ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Karen Vanessa Córdova Gaibor

Ing. Ana Lucía Balarezo Aguilar Msc.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado con profundo agradecimiento a mis padres Nora y Hernán, y a mis familiares, por su incondicional apoyo, educación y amor. A mis hermanos Jon y Diego, por su constante motivación y por creer en mí en cada etapa de este recorrido, acompañándome a lo largo de estos años de dedicación y esfuerzo, y compartiendo juntos cada pequeño logro.

También extiendo mi gratitud a mis amigos y conocidos, especialmente a Silvia y Dayana, cuya disposición para ayudar, enseñar y celebrar cada paso adelante ha hecho mi vida más amena y ha fortalecido lazos de confianza y amistad duraderos.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mis profesores y mentores de la Escuela Politécnica Nacional, quienes me han provisto de valiosos conocimientos basados en su experiencia. Su dedicación y pasión por la enseñanza han sido una fuente constante de inspiración, y su genuino deseo de contribuir significativamente a mi desarrollo personal y profesional ha sido fundamental para mi formación en pro de la salud, el ambiente y la economía de nuestro país.

AGRADECIMIENTO

Quiero extender un sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido de manera significativa a la realización de este estudio. En primer lugar, a mi directora del trabajo de Integración Curricular, la Dra. Ana Balarezo, cuya experticia, paciencia y orientación han sido fundamentales en cada fase de la investigación.

Agradezco al personal del Laboratorio de Investigación Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA), especialmente al Ing. Jairo Jimpikit, por su mentoría y guía técnica. A la ingeniera Lorena Jaramillo de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial (FIQA), por facilitar la sal de cadmio para la presente investigación.

También agradezco a los ingenieros a cargo del Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM) y del Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX), especialmente a la ingeniera Evelyn Criollo, por facilitar la realización de los ensayos necesarios, que fueron fundamentales para el éxito de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO V
ÍNDICE DE TABLAS VII
ÍNDICE DE FIGURAS VIII
RESUMEN IX
ABSTRACT X
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO 1
1.1 Objetivo general 3
1.2 Objetivos específicos 3
1.3 Alcance 3
1.4 Marco teórico 4
Estado del arte sobre la fitorremediación 4
Metales pesados en el suelo 6
El cadmio en el medio natural 7
Efectos tóxicos del cadmio en las plantas 10
Efectos tóxicos del cadmio en la salud 11
Especies vegetales utilizadas en la fitorremediación 12
Mecanismos de la fitorremediación 15
Factores que influyen en la fitorremediación 17
Indicadores 18
2. METODOLOGÍA 19
2.1 Adquisición de suelo y plántulas experimentales 20
2.2 Caracterización del suelo agrícola 20
pH 20
Conductividad eléctrica 21
Humedad 21
Materia orgánica 21
Capacidad de intercambio catiónico 21
Nitratos y fosfatos 22
Densidad aparente 22

Porosidad 22
Clase textural 23
2.3 Acondicionamiento del sitio experimental 23
2.4 Diseño experimental 23
2.5 Preparación de las soluciones acuosas de cadmio 24
2.6 Aclimatación de las unidades experimentales 25
2.7 Exposición y monitoreo de las plantas 25
2.8 Cosecha y secado de las biomasas aérea y radicular 29
2.9 Determinación de las concentraciones de cadmio 29
2.10 Análisis estadístico de las concentraciones de cadmio 30
Análisis descriptivo 30
Análisis inferencial 31
2.11 Determinación de los indicadores de bioconcentración y traslocación ... 31
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 32
3.1 Caracterización química y física del suelo 32
3.2 Evidencia de toxicidad en el monitoreo de las especies vegetales 34
S. nigrum 34
O. basilicum 35
3.3 Contenido de cadmio en las biomasas de la planta y el suelo 36
Análisis descriptivo 36
Análisis inferencial 42
3.4 Factores de bioconcetración y de traslocación 43
3.5 Conclusiones 47
3.6 Recomendaciones 49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51
ANEXO I 54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Concentraciones de Cd en las provincias de la costa. 9
Tabla 1.2. Concentraciones de Cd en las provincias de la sierra. 9
Tabla 2.1. Parámetros químicos y físicos del suelo experimental. 20
Tabla 2.2. Diseño experimental. 24
Tabla 2.3. Clasificación Kelley para suelos contaminados con Cd. 24
Tabla 3.1. Caracterización del suelo experimental. 32
Tabla 3.2. Cadmio (mg /kg) bioacumulado en la especie *S. nigrum*. 36
Tabla 3.3. Cadmio (mg /kg) bioacumulado en la especie *O. basilicum*..... 39
Tabla 3.4. Análisis de Variabilidad ANOVA. 42
Tabla 3.5. Resultados del test de Dunn. 42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mecanismos de fitorremediación. 17
Figura 2.1. Sitio experimental. 23
Figura 2.2. Aclimatación de las plántulas experimentales. 25
Figura 2.3. Acondicionamiento de las plantas. 25
Figura 2.4. Recipientes usados para el riego. 26
Figura 2.5. Primera semana de exposaición a Cd^{2+} 26
Figura 2.6. Segunda semana de exposición a Cd^{2+}. 26
Figura 2.7. Tercera semana de exposición a Cd^{2+}. 27
Figura 2.8. Cuarta semana de exposición a Cd^{2+}. 27
Figura 2.9. Quinta semana de exposición a Cd^{2+}. 27
Figura 2.10. Sexta semana de exposición a Cd^{2+}. 27
Figura 2.11. Séptima semana de exposición a Cd^{2+}. 28
Figura 2.12. Octava semana de exposición a Cd^{2+}. 28
Figura 2.13. Novena semana de exposición a Cd^{2+}. 28
Figura 2.14. Décima semana de exposición a Cd^{2+}. 28
Figura 2.15. Cosecha de las biomasas aéreas y radiculares de cada planta. 29
Figura 2.16. Digestión de las muestras de biomasas aéreas, radiculares y el suelo. 30
Figura 2.17. Filtración de la solución para la cuantificación de Cd. 30
Figura 3.1. Distribución del Cd bioacumulado en los tejidos de la especie *S. nigrum*. 37
Figura 3.2. Distribución del Cd bioacumulado en los tejidos de la especie *O. basilicum*. 39
Figura 3.3. Factores de bioconcentración aérea (FBC) y radicular (FBR) de *S. nigrum*. 43
Figura 3.4. Factor de traslocación (FT) de *S. nigrum*. 44
Figura 3.5 Factores de bioconcentración aérea (FBC) y radicular (FBR) de *O. basilicum*. 45
Figura 3.6. Factor de traslocación (FT) de *O. basilicum.* 45

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular, evaluó la capacidad de bioacumulación y traslocación de cadmio (Cd), de las especies vegetales *Solanum nigrum* (hierba mora) y *Ocimum basilicum* (albahaca), exponiéndolas a suelos contaminados mediante riego.

Para la investigación, se establecieron 3 tratamientos basados en las concentraciones de Cd agregados al sustrato: T0 (0 mg Cd/kg), T1 (10 mg Cd/kg) y T2 (25 mg Cd/kg), regando 2 veces por semana, durante 10 semanas. Cada tratamiento incluyó tres réplicas y al finalizar el periodo de exposición, se cosecharon separando la parte aérea (tallos y hojas) de la raíz, y se tomó una muestra de suelo, resultando en un total de 54 muestras para la cuantificación de cadmio mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Los resultados destacan la eficacia de *S. nigrum* y *O. basilicum*, en la fitoextracción de Cd, mostrando una acumulación significativa del metal en la parte aérea, que aumenta con mayores concentraciones de Cd en el sustrato. *O. basilicum* registró un factor de bioconcentración (FBC) de 2,16 en T1, que disminuyó a 0,99 en T2, mientras que *S. nigrum* mostró valores de FBC de 1,44 y 1,17 para T1 y T2, respectivamente. Ambas especies limitaron la acumulación de Cd en sus raíces (FBR < 1). Además, *O. basilicum* fue más efectiva en bajas concentraciones con un alto factor de traslocación (FT) de 4,97 en T1 y 2,87 en T2, en comparación con *S. nigrum* que tuvo un FT más consistente de 3,28 en T1 y 3,33 en T2. La variabilidad fue alta a concentraciones elevadas (p-valor < 0,05).

PALABRAS CLAVE: Cadmio, fitoextracción, fitoacumulación, *Solanum nigrum*, *Ocimum basilicum*, Factor de bioacumulación, Factor de traslocación.

ABSTRACT

This Curricular Integration Work evaluated the bioaccumulation and translocation capacity of cadmium (Cd) of the plant species *Solanum nigrum* (nightshade) and *Ocimum basilicum* (basil), exposing them to contaminated soils through irrigation.

For the investigation, 3 treatments were established based on the concentrations of Cd added to the substrate: T0 (0 mg Cd/kg), T1 (10 mg Cd/kg) and T2 (25 mg Cd/kg), watering 2 times per week. for 10 weeks. Each treatment included three replicates and at the end of the exposure period, they were harvested, separating the aerial part (stems and leaves) from the root, and a soil sample was taken, resulting in a total of 54 samples for the quantification of cadmium by spectrophotometry atomic absorption.

The results highlight the effectiveness of *S. nigrum* and *O. basilicum* in the phytoextraction of cadmium (Cd), showing a significant accumulation of the metal in the aerial part, which increases with higher concentrations of Cd in the substrate. *O. basilicum* recorded a bioconcentration factor (BCF) of 2,16 at T1, which decreased to 0,99 at T2, while *S. nigrum* showed BCF values of 1,44 and 1.17 for T1 and T2, respectively. Both species limited Cd accumulation in their roots (FBR < 1). Furthermore, *O. basilicum* was more effective at low concentrations with a high translocation factor (TF) of 4,97 in T1 and 2,87 in T2, compared to *S. nigrum* which had a more consistent TF of 3,28 in T1 and 3,33 in T2. The variability was high at high concentrations (p-value < 0,05).

KEYWORDS: Cadmium, phytoextraction, phytoaccumulation, *Solanum nigrum*, *Ocimum basilicum*, Bioaccumulation factor, Translocation factor.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Actualmente, los suelos agrícolas presentan altos niveles de contaminación metálica debido a factores naturales y antropogénicos, impactando notablemente en la salud humana y en la biodiversidad. Uno de los contaminantes de mayor preocupación es el cadmio (Cd), un metal pesado no degradable que, una vez en el medio ambiente, permanece en circulación indefinidamente. Su alta capacidad bioacumulación, toxicidad y fácil movilidad, incluso a bajas concentraciones, lo convierten en uno de los metales pesados más peligrosos (Hernández et al., 2019).

El Cd está ampliamente distribuido en el suelo y representa una significativa amenaza para la salud pública ya que es fácilmente absorbido por la vegetación, afectando directamente a la soberanía alimentaria local y mundial. Como resultado de las actividades antropogénicas tales como: la quema de residuos, efluentes industriales, minería, entre otras, se estima que se liberan anualmente 30.000 ton de Cd al medio ambiente (Hernández et al., 2019). Por lo que, en diferentes lugares del mundo, incluido nuestro país, se han identificado niveles de Cd en agua, suelo y vegetación, que superan los límites permitidos, establecidos para los diversos usos (Zúñiga, 2020).

Para cultivos comerciales, es importante comprender la movilidad de los contaminantes metálicos, particularmente en las partes comestibles de la vegetación, ya que una alta tasa de traslocación a las biomasas aéreas de las plantas puede aumentar la exposición por ingesta de metales en todos los niveles de la cadena alimenticia (Alamo & Feng, 2017).

La precipitación y el pH del suelo inciden en la movilidad de la mayoría de los metales en el estrato edáfico, provocando su infiltración hacia depósitos subterráneos de agua dulce, lo que hace que el Cd sea prioritario en las listas de contaminantes del suelo que requieren remediación. La reducción de las concentraciones de metales pesados a niveles permisibles permitiría la reutilización del medio edáfico para fines agrícolas, forestales, hortícolas o lúdicos, evitando la transferencia del Cd a aguas subterráneas o zonas cercanas por acción del viento, escorrentía y erosión del suelo (Zúñiga, 2020).

Desde 1972, el Cd es conocido como un contaminante alimentario y un carcinógeno de tipo I según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). Este metal pesado tiene la capacidad de bioacumularse en el cuerpo humano, pudiendo permanecer de 10 a 30 años y almacenarse principalmente en el hígado y los riñones, lo que incrementa el riesgo de insuficiencia renal, desmineralización ósea y cáncer. De acuerdo con estudios, la exposición al Cd puede llevar a una variedad de enfermedades, incluyendo problemas

hepáticos, reumáticos, y respiratorios como el cáncer de pulmón y osteoporosis (Vesga, 2022).

En este contexto, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria ha determinado que la ingesta tolerable de Cd es de 2,5 µg/kg de peso corporal, a la semana, nivel que no debería causar efectos adversos severos. Los signos de toxicidad por Cd pueden incluir irritación estomacal y episodios de vómitos, mientras que, una ingesta de 350 µg/kg se consideran potencialmente letales (Ramírez et al., 2018).

En Ecuador, particularmente en las regiones costeras y de sierra, se han identificado concentraciones significativas de Cd en suelos agrícolas productivos, con niveles que superan el promedio de 0,5 mg/kg, en las primeras capas del suelo, especialmente en la costa, donde se cultivan productos como arroz, caña de azúcar, banano y cacao. El cacao ecuatoriano ha enfrentado problemas en su comercialización internacional debido a la presencia de Cd en la almendra, con restricciones de exportación por parte de la Organización Mundial del Cacao (ICCO), cuando las concentraciones superan los 0,6 mg/kg en los granos (Peña et al., 2021).

Una de las estrategias que permite la remoción de Cd del suelo es la fitorremediación, una técnica que implica la remoción, transferencia, estabilización, degradación y neutralización in situ de metales pesados. Particularmente la fitoacumulación, es un método ecológico, económico y sencillo, que implica en la acumulación de Cd en los diferentes tejidos de la planta, lo que resulta en la pérdida de este metal en el suelo. No obstante, solo un número relativamente pequeño de especies vegetales son reconocidas como hiperacumuladoras de Cd (Subašić et al., 2022), por lo que, permanentemente se investiga nuevas especies y métodos para mejorar esta estrategia.

La presente investigación se centra en la fitorremediación, específicamente del Cd en el suelo, mediante las especies vegetales *Solanum nigrum* (hierba mora) y *Ocimum basilicum* (albahaca), por su capacidad para acumular metales pesados, sin sufrir daños fisiológicos, como se menciona en los trabajos de investigación de Alamo & Feng (2017) y Ramírez et al., (2018).

De esta forma se pretende contribuir con soluciones basadas en la naturaleza desde la perspectiva de la ingeniería ambiental, como lo insta el informe de las Naciones Unidas de 2018. El objetivo principal es la recuperación de suelos contaminados para mitigar la presencia de metales pesados como el Cd en tierras agrícolas. Esta iniciativa busca prevenir futuras degradaciones del suelo y fomentar una gestión sostenible del mismo.

1.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de fitoacumulación de cadmio de las especies vegetales *S. nigrum* y *O. basilicum* de suelos contaminados, mediante el análisis de índices de bioacumulación aérea y radicular, y el factor de traslocación.

1.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el suelo experimental por parámetros químicos y físicos.
2. Determinar mediante revisión bibliográfica las concentraciones viables de cadmio, para las especies *S. nigrum* y *O. basilicum*.
3. Elaborar un diseño experimental a ejecutar a nivel de laboratorio, considerando grupos de tratamiento con controles y replicas.
4. Exponer las especies vegetales al cadmio a través de la contaminación artificial del suelo mediante riego, en un periodo de 70 días.
5. Determinar los índices de bioacumulación en las biomasas aéreas y radiculares, y los factores de traslocación, de las especies vegetales.

1.3 Alcance

La presente investigación contempla la revisión bibliográfica del estado del arte de la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, particularmente con Cd, por su amplia distribución global en residuos de las actividades antropogénicas de origen industrial.

El desarrollo del componente se limitó a una escala de laboratorio, donde se utilizó suelo libre de indicios contaminantes para cultivos controlados en invernadero. Para caracterizar el suelo, se realizaron análisis químicos y físicos. Los parámetros químicos evaluados incluyeron el pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, y la presencia de nitritos y fosfatos. En cuanto a los parámetros físicos, se consideraron la porosidad, la densidad bruta, la humedad, y la clase textural del suelo.

Cómo parte importante del marco metodológico, se elaboró un diseño experimental a ser llevado a cabo en la investigación en laboratorio, considerando la prepararán de soluciones acuosas de diferentes concentraciones de Cd que fueron agregadas a unidades experimentales que contenían las plántulas individuales, de las especies vegetales (*S. nigrum* y *O. basilicum*).

Durante un periodo de observación de 10 semanas, se regó 2 veces por semana con soluciones acuosas de Cd. Al finalizar el periodo de exposición, se cosecharon las plantas separando la parte aérea de la parte radicular. Posteriormente, se secó y se procesó una muestra de cada una de las unidades experimentales, mediante digestión ácida para la cuantificación de Cd, a través de espectrofotometría de absorción atómica.

Las concentraciones de cadmio obtenidas fueron analizadas estadísticamente de manera descriptiva, usando medidas de tendencia central y de dispersión. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis inferencial que incluyó el Análisis de Varianza ANOVA, para determinar si existían diferencias significativas en los niveles de Cd entre los diferentes tratamientos aplicados a las especies vegetales. Este análisis fue seguido por un test de Dunn, para identificar posibles diferencias entre los grupos de control y los experimentales. Este último permitió evaluar las diferencias específicas entre los tratamientos administrados y su impacto en cada parte de la planta: suelo, raíz y parte aérea. Los productos analizados incluyeron el factor de bioconcentración de la parte aérea y radicular de las plantas, así como el factor de traslocación en cada especie vegetal.

1.4 Marco teórico

Estado del arte sobre la fitorremediación

Históricamente las plantas han sido reconocidas como la base de la alimentación y la medicina para los seres humanos. No obstante, su alta diversidad alrededor del mundo no se limita a estos servicios antrópicos, sino que la mayoría cumple una amplia gama de funciones medioambientales, entre ellas la fitorremediación, que es una antigua práctica que no se puede atribuir a un individuo o grupo específico, sin embargo, ha sido definida de diferentes formas en las últimas décadas, pudiendo resumirse en una tecnología ambiental que promete hacer inofensivos los contaminantes presentes en las capas superiores del suelo (Raskin et al., 1997).

El contenido de diferentes metales pesados, material radiactivo, u otros componentes tóxicos en el agua y el suelo, representan un relevante problema ambiental que pone en riesgo la salud humana. Algunas tecnologías para la remediación de suelos con altos contenidos de metales pesados implican la excavación o incineración, para posteriormente ser enterrado. Estás tecnologías representan un elevado requerimiento de recursos tecnológicos, humanos y económicos que asciende a los miles de millones de dólares. En este contexto, el empleo de tratamientos biológicos para remediar suelos en los últimos años emerge como un concepto clave de las soluciones basadas en la naturaleza para afrontar los desafíos ambientales, además del atractivo interés social y científico por su

eficiencia y rentabilidad. Pero ¿qué tan eficiente ha resultado ser el uso de la fitorremediación en el suelo?

Una revisión sistemática de artículos publicados en revistas científicas internacionales revela que las plantas que tienen una capacidad destacada para la fitoacumulación o fitoextracción son: *Sedum alfredii, Prosopis laevigata, Arabis paniculate, Viola baoshanensis, Silene sendtneri, Populus nigra, Arabis gemmifera y Vettiveria zizanioides*. Mientras que, las especies identificadas con una alta capacidad para fitoextracción y fitovolatilización son: *Arabidopsis halleri, Beta vulgaris, Helianthus tuberosus, y Solanum nigrum.* No obstante, existen plantas con menor adsorción de Cd tanto en las raíces como brotes y hojas que las especies vegetales mencionadas, pero con una alta capacidad de fitorremediación (Subašić et al., 2022).

Hay varias especies clasificadas como hiperacumuladoras de Cd con altos factores de bioconcentración y translocación. Pueden presentar una acumulación de Cd en los brotes superior a los 2.000 mg Cd/kg, entre estas especies se tiene: *A. gramminifera, C. odorata, C. aculeata, N. opaca y S. sendtneri*. Dado que las plantas hiperacumuladoras no muestran síntomas tóxicos, como la disminución de la biomasa de los brotes, las plantas con un alto factor de translocación (relación entre la concentración de metales en parte a aérea y radicular), son adecuadas para la fitominería (reextracción de metales de la biomasa vegetal) (Subašić et al., 2022).

De acuerdo con Zúñiga (2020), con la investigación de fitorremediación de suelo agrícola contaminado con Cd con la especie *Eichhornia crassipes*, en la cuenca del río Guayas, identificó que, esta especie es capaz de remover hasta un 23,63% de Cd en 62 días de ensayo, no obstante, en la adición de concentraciones menores a 2 mg Cd/kg, el metal presentó un incremento del 15,5% en el suelo.

En un estudio de fitorremediación en un suelo salino contaminado con cadmio mediante agua de riego, Gallego, (2017), encontró que la cebada y la alfalfa redujeron su producción de biomasa y experimentaron problemas fisiológicos al ser expuestas a diferentes concentraciones de Cd. A pesar de esto, estas especies desarrollaron mecanismos para acumular el metal en sus tejidos. Además, se observó que las variaciones en las concentraciones de Cd en el agua no alteraron significativamente la composición elemental del suelo. Dado el aumento de las concentraciones de Cd asimilable y total en el suelo con el incremento de su contenido en el agua de riego, la autora sugiere la necesidad de realizar estudios adicionales sobre como los nutrientes, como el calcio o el hierro influyen en la

relación con el Cd, especialmente porque el comportamiento de estos nutrientes varió entre las diferentes especies al incrementarse la concentración de cadmio.

En Ecuador, ante la presencia de Cd en las almendras de cacao, el Departamento de Suelos de la Estación Experimental Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ha investigado el potencial de fitorremediación de especies arvenses adaptadas a las condiciones de las plantaciones de cacao (bajo sombra), en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, El Oro y Los Ríos, realizando los estudios en condiciones de invernadero (Peña et al., 2021).

El contenido de Cd en las plantas arvenses de reproducción sexual, fueron estadísticamente diferentes entre ellas (p-valor<0,05). Las especies que acumularon mayor cantidad de Cd en la raíz fueron: *C. bonariensis, E. colonum, S. nigrum, E. indica y R. cochinchinensis*. Por el contrario*, P. pellucida, L. filiformis, D. sanguinalis, C. cepha y A. conyzoides*, acumularon menos Cd en las raíces. Mientras que, en los tejidos aéreos de *P. pellucida y C. cepha,* se cuantificó la mayor cantidad del metal. En consecuencia, obtuvieron un alto valor del factor de translocación (FT). Además, se evidenció *que P. pellucida, C. cephalotes y A. conyzoides*, actuaron como fitoextractoras (FT>1), mientras que, el resto de las especies funcionaron como fitoestabilizadoras del cadmio (FT<1).

La fitorremediación es más efectiva cuando los niveles de contaminación son bajos a medios, ya que, en suelos altamente contaminados, incluso las plantas hiperacumuladas pueden tener un crecimiento gravemente afectado, lo que minimiza la tasa de éxito de la fitoextracción (Subašić et al., 2022).

Metales pesados en el suelo

Los metales pesados se caracterizan por tener densidades mayores a 5 g/cm^3, un peso molecular por encima de 44,95 g y números atómicos superiores a 20. Se excluyen de esta categoría los elementos de los grupos de los metales alcalinos, alcalinotérreos, lantánidos y actínidos en la tabla periódica (Gallego, 2017). De acuerdo con Vesga (2022), Los elementos cuya densidad supera en al menos 5 veces la del agua se clasifican como metales pesados. Dentro de este grupo, los que más preocupan por sus efectos en la salud incluyen el As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn y Zn.

Las fuentes de estos elementos en la corteza terrestre pueden ser de origen natural o antropogénico. Naturalmente, estos metales se generan a través de fenómenos como erupciones volcánicas y desgaste de las rocas. Mientras que, las fuentes antropogénicas

incluyen actividades industriales tales como la minería, la metalurgia y el uso de agroquímicos como fertilizantes y pesticidas, en las prácticas agrícolas.

Así mismo, la generación de agua residual proveniente de desechos de minas, parques industriales, municipios o filtración de vertederos, que contienen trazas de metales pesados es comúnmente reingresado a las cuencas hidrográficas y su cause eventualmente se incorpora a los sistemas de abastecimiento de agua, lagos, ríos y otros sistemas acuáticos, que son usados para la irrigación de cultivos, contaminando el suelo (Zúñiga, 2020).

Una vez que los metales pesados son liberados al suelo, pueden seguir cuatro rutas diferentes: permanecer en solución en la fase líquida o móvil y ocupar sitios de intercambio no específicos, adherirse a componentes inorgánicos del suelo, unirse a la materia orgánica y ser parte de ella, o precipitarse en formas sólidas puras o compuestas. Por otro lado, pueden ser absorbidos por la vegetación y entrar en la cadena alimenticia, volatilizarse hacia la atmósfera, o infiltrarse hacia las aguas subterráneas (Gallego, 2017).

En este contexto, la calidad del medio ambiente se ha deteriorado debido al aumento de metales pesados en la atmósfera, el agua y el suelo. Por ello, recientemente ha crecido el interés en estudiar los impactos tóxicos de estos metales en el desarrollo y la fisiología de los cultivos.

El cadmio en el medio natural

En la tabla periódica, el cadmio es un metal del grupo $\mathrm{II}-\mathrm{B}$, se caracteriza por ser de color plateado y comúnmente se encuentra asociado con minerales como el zinc, el plomo y el cobre. En el suelo se puede encontrar en su forma iónica (Cd^{2+}) o como sulfato de cadmio ($CdSO_4$) y cloruro de cadmio ($CdCl_2$) (Vesga, 2022). Fue descubierto en 1817 por Karl Hermann y Friedrich Stromeyer, y es reconocido como un agente altamente tóxico. El número atómico del cadmio es 48, su peso atómico es 112,4 g, su punto de fusión y ebullición es de 321 °C y 765 °C, respectivamente (Subašić et al., 2022).

El cadmio está presente de naturalmente en la atmosfera, las rocas, los sedimentos y los suelos, procedente de eventos naturales como la erosión geológica, y de forma antropogénica debido a los procesos industriales en los que es usado como en la aleación de zinc y cobre para incrementar su resistencia, disminuir el desgaste y/o su potencial de fundición de los materiales, además, es la materia prima para la generación de tintes, pinturas, plásticos y cerámicas. Históricamente, también ha sido empleado en baterías, galvanoplastia y estabilizadores (Zúñiga, 2020).

La creciente producción de gases nocivos, pesticidas y fertilizantes fosfatados contribuye significativamente a la presencia de cadmio en los suelos agrícolas. En países donde se utilizan ampliamente los fertilizantes fosfatados, se ha observado un incremento del contenido de este metal en el suelo. Además, los lodos, resultantes de depuración de aguas y el uso de estiércol de cerdo en suelos agrícolas contribuye a la tendencia creciente del cadmio en el suelo (Subašić et al., 2022). De acuerdo con Vesga (2022), las principales fuentes de cadmio en terrenos agrícolas son: el uso de fertilizantes fosfatados (54%), la deposición aérea (41%) y el uso de abonos a base de estiércol (5%).

El cadmio es un metal que no tiene función biológica identificada, que puede ser bioacumulado por las plantas ricas en macronutrientes y resulta altamente tóxico para estas y los animales. Se concentra en las primeras capas del suelo, entre los primeros 40 cm de profundidad y es persistente en el medio ambiente por periodos de 75 a 380 años en zonas templadas (Zúñiga, 2020).

Se estima que el contenido de cadmio en la litosfera es de 0,2 mg/kg, mientras que, en suelos superficiales y alimentos de origen vegetal varía entre 0,53 y 0,66 mg/kg. Según Subašić et al. (2022), en suelos no contaminados, las concentraciones de cadmio oscilan entre 0,01 y 1 mg/kg, con una media mundial de 0,36 mg/kg, aunque en otros estudios se considera niveles de 0,07 y 1,1 mg/kg, con una media de 0,5 mg/kg (Zúñiga, 2020).

El 99% del cadmio en el suelo se encuentra en la fase sólida asociada a minerales y materia orgánica, mientras que el 1% está en la fase líquida que conecta el suelo y las plantas. En esta última, el cadmio está presente mayoritariamente como Cd^{2+}, que es absorbido por las plantas través de las membranas celulares de las raíces (Marchive et al., 2021). El cadmio tiene una alta movilidad en el medio ambiente, en consecuencia, puede liberarse rápidamente hacia el agua subterránea, contaminado la cadena alimentaria y bioacumulándose en los organismos vivos (Gallego, 2017)

En el caso particular de Ecuador, los suelos agrícolas son altamente productivos, en la región costa con cultivos de arroz, banano, caña de azúcar, cacao, entre otros, que son demandados alrededor del mundo, por lo que requieren de alta calidad. No obstante, los suelos de la sierra y costa muestran concentraciones significativas de cadmio, principalmente en la superficie.

De los estudios realizados a diferentes suelos de las provincias del Ecuador, se ha encontrado que todas, tanto en la sierra como en la costa, superan, el promedio de 0,5 mg Cd/kg a los 5 cm de profundidad, siendo las más afectadas la provincia del del Oro (2,53 mg Cd/kg), Manabí (2,37 mg Cd/kg), Guayas (1,65 mg Cd/kg), Santa Elena (1,50 mg Cd/kg)

y Azuay (1,37 mg Cd/kg). Las concentraciones promedio de cadmio en el suelo de las provincias de la costa y de la sierra se presentan en las Tablas 1.1 y 1.2, respectivamente (Zúñiga, 2020).

Tabla 1.1. Concentraciones de Cd en las provincias de la costa.

Región	Provincia	cadmio (mg/kg)	
		0 - 5 cm de profundidad	11- 15 cm de profundidad
Litoral	Esmeraldas	0,88	0,32
	Santo Domingo	0,54	0,39
	Manabí	2,37	2,00
	Los Ríos	0,78	0,69
	Guayas	1,65	1,61
	El Oro	2,53	2,60
	Santa Elena	1,50	1,50

Fuente: Zúñiga (2020).

Tabla 1.2. Concentraciones de Cd en las provincias de la sierra.

Región	Provincia	cadmio (mg/kg)	
		0 - 5 cm de profundidad	11- 15 cm de profundidad
Sierra	Cotopaxi	0,55	0,28
	Bolívar	0,55	0,36
	Azuay	1,37	0,99

Fuente: Zúñiga (2020).

El contenido de cadmio en las biomasas alimenticias varía según la clase de suelo, las condiciones de cultivo y variedad la vegetación (Zúñiga, 2020). En Ecuador, la problemática del cadmio en el suelo se ha evidenciado por la presencia de este en la almendra de cacao, lo cual coarta la comercialización del mismo (Peña et al., 2021). En este contexto, se debe considerar que la Organización Mundial del Cacao (ICCO), restringe las exportaciones cuando la concentración de Cd^{2+} en granos han superado los 0,6 mg/kg (Ramírez et al., 2018).

Además, la Normativa de Calidad Ambiental para el Suelo y los Criterios de Remediación de Suelos Contaminados, fijan un límite máximo permitido de 0,5 mg de Cd por kg de suelo. Conforme a esta norma, ninguna de las provincias costeras o andinas cumple con los estándares de calidad del suelo en los primeros 5 cm de profundidad.

Por otro lado, para remediar estos suelos, se debe considerar el uso que se le dará, estableciendo en la misma norma un valor máximo permisible de 2 mg Cd/kg para suelo

agrícola, 10 mg Cd/kg tanto para suelo industrial, como comercial y 4 mg Cd/kg para uso residencial.

Efectos tóxicos del cadmio en las plantas

El cadmio se puede encontrar en las hojas, tallos, raíces, frutos e incluso las flores de las plantas, no obstante, se concentra principalmente en las raíces seguido por las hojas debido a la traslocación del contaminante. Por otro lado, el nivel de cadmio tóxico varía entre especies de plantas según sus eco tipos cultívales (Zúñiga, 2020).

El sistema radicular de algunas plantas puede extraer cadmio del suelo y los efectos tóxicos generados pueden ser de 2 a 20 veces superiores a los evidenciados por otros metales pesados. Una vez que ingresa el cadmio a las células vegetales, la producción de radicales libres puede conducir a la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) que inician la apoptosis. Las plantas contrarrestan los efectos tóxicos del cadmio mediante mecanismos desde el punto de entrada en la rizosfera donde compite con varios iones metálicos pudiendo provocar la deficiencia de hierro en la planta, posteriormente el metal es trasportado en forma de complejos organometálicos.

La raíz al ser el primer punto de contacto con el cadmio a menudo se daña debido a la oxidación de proteínas/tioles de la membrana, la inhibición de las bombas proteicas o la alteración de la fluidez de la membrana. Una vez que el cadmio llega a las hojas, es secuestrado en vacuolas para reducir su toxicidad sobre la fotosíntesis y los procesos fisiológicos de la planta, o es desintoxicado por compuestos quelantes o proteínas de membrana ricas en cisteínas. En otros casos las plantas pueden prevenir la adsorción de cadmio excretando exudados de raíces incluyendo ácidos carboxílicos (cítrico, málico) y la histidina (Hernández et al., 2019).

La severidad con la que se ven afectadas las plantas depende de la resistencia de esta al cadmio, sin embargo, los síntomas principales son la disminución de la elongación de la raíz, el tallo y la masa seca. Dependiendo de la sensibilidad de la especie puede presentar efectos tóxicos que incluyen la reducción de: la producción de biomasa, la asimilación de carbono, la actividad fotosintética, la traslocación de minerales y el desarrollo de tejidos reproductivos.

Incluso en dosis bajas, el cadmio puede causar diversos efectos negativos en los brotes, como clorosis foliar, lesiones necróticas y desecación. Además, este metal pesado puede destruir las estructuras de los cloroplastos e inhibir el alargamiento de las raíces. Esta inhibición está relacionada con la disminución de la actividad mitótica en los meristemas

radiculares. También provoca alteraciones en el intercambio gaseoso y marchitez, afectando significativamente la incorporación de macro y micronutrientes en las plantas (Subašić et al., 2022).

De igual forma, el cadmio puede provocar estrés hídrico en las plantas, modificando sus procesos celulares y la expresión genética. Esto puede ocurrir a través de la sustitución de metales esenciales o la alteración en la estructura de biomoléculas y proteínas que regulan el estrés. Además, interrumpe las enzimas del ciclo de Calvin al tener la capacidad de desplazar iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), lo que resulta en una disminución en los niveles de clorofila y carotenoides (Gallego, 2017).

Efectos tóxicos del cadmio en la salud

Los metales pesados se dividen en dos categorías en relación con la biota: esenciales y no esenciales. Los esenciales cumplen importantes roles reguladores de procesos biológicos como la transferencia de electrones entre proteínas y como cofactores en numerosas enzimas, entre ellos están el Cu, Zn, Mn, Fe y Ni; en contraste, los metales no esenciales son el Cd, Mg y Pb, que carecen de funciones biológicas conocidas y su presencia en los organismos vivos, incluso en pequeñas cantidades puede causar disfunciones significativas y resultando altamente tóxicos. La no biodegradabilidad y alta biodisponibilidad de estos metales aumenta su riesgo (Gallego, 2017).

Desde 1972, el cadmio es reconocido como un contaminante alimentario, y se ha clasificado como un agente carcinógeno de tipo I por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) (Vesga, 2022). El cadmio puede bioacumularse en el cuerpo humano de 10 a 30 años, almacenándose principalmente en el hígado y los riñones (Subašić et al., 2022; Vesga, 2022).

La toxicidad del cadmio puede manifestarse a través de síntomas como irritación gástrica, vómitos, disentería, en casos extremos la muerte. Sin embargo, para presentar toxicidad severa, la exposición debe ser prolongada y a altas concentraciones. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, considera que una ingesta semanal tolerable de cadmio de 2,5 µg/kg de peso corporal, no tiene efectos negativos severos. En este sentido, la ingesta de hasta 100 µg/kg produce síntomas gastrointestinales y a partir de los 350 µg/kg puede ser potencialmente mortal. En este marco, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un nivel máximo de tolerancia de 7 µg/kg de peso corporal (Ramírez et al., 2018; Vesga, 2022).

Al nacer, el cadmio no está presente en el cuerpo humano, pero se acumula con la edad prioritariamente en los riñones y el hígado. Las vías de ingreso de cadmio son por la ingesta de alimentos, la inhalación de partículas en suspensión superiores a 10 µg y la absorción cutánea (Paredes & Sifuentes, 2024). Para la población en general, los alimentos contaminados constituyen la principal fuente de exposición, y para los trabajadores de industrias relacionadas con el uso de cadmio y los fumadores una exposición moderada de cadmio podría representar un riesgo importante en la salud (Subašić et al., 2022).

Los contenidos de cadmio en el suelo incrementan año a año debido a la sobre fertilización de los suelos agrícolas, degradando la capacidad del suelo para ofrecer servicios ecosistémicos, incluyendo la producción de alimentos sanos (Vesga, 2022). La ingesta de alimentos contaminados es una fuerte problemática de salud pública, por tanto, el actual desafío es desarrollar nuevas técnicas fisicoquímicas o biológicas para la recuperación de suelos afectados por cadmio (Paredes & Sifuentes, 2024).

Especies vegetales utilizadas en la fitorremediación

La fitorremediación es un concepto empleado para reducir, remover, transferir, estabilizar o destruir contaminantes en el entorno. El método se basa en la extracción y concentración de elementos específicos del medio ambiente en las partes de las plantas, que actúan como “bombas solares” utilizando la energía del sol para realizar estos procesos (Raskin et al., 1997).

La fitorremediación comparada con otros métodos de remoción del suelo como los físicos, químicos y eléctricos, presentan varios beneficios. Es una metodología respetuosa con el medio ambiente, no genera contaminación secundaria y puede aplicarse a gran escala. Además, mejora la calidad del suelo para la futura colonización de plantas, resultando ser una técnica asequible y rentable para la remediación de suelos contaminados (Yao et al., 2023).

Las plantas que tienen una gran capacidad para captar y retener contaminantes en su tejido se denominan hiperacumuladoras y pueden acumular cantidades de metales pesados que exceden más de 100 veces los niveles normales. Estas plantas generalmente se encuentran en suelos con altas concentraciones de metales, ya que en suelos no contaminados tienden a ser menos competitivas (Gallego, 2017). Las plantas hiperacumuladoras de cadmio pueden acumular en sus brotes más de 100 mg/kg de peso seco, lo que refleja su elevada capacidad de traslocación y coeficiente de acumulación. Esta característica les permite tolerar la presencia de metales en el suelo (Ramírez et al., 2018; Subašić et al., 2022).

Las plantas ideales para la fitoextracción deben exhibir características tales como: un rápido crecimiento y producción abundante de biomasa, un sistema radicular extenso y denso; habilidad para hiperacumular metales pesados y tolerar sus efectos tóxicos, así como la capacidad de translocar metales desde las raíces hasta la parte aérea. Además, deberían tener una amplia distribución, resistencia a patógenos y plagas, adaptabilidad a las condiciones climáticas locales, una vida útil prolongada, y requerimientos bajos de mantenimiento y cosecha fácil. También es crucial que no atraigan a herbívoros para prevenir la transferencia de metales a la cadena alimentaria (Gallego, 2017; Peña et al., 2021).

El tejido vegetal cosechado, rico en contaminantes acumulados, puede ser procesado de manera fácil y segura mediante métodos como secado, incineración o compostaje. El volumen de desechos tóxicos producidos es generalmente menor que el generado por otras tecnologías de remediación más invasivas, y los costos asociados son mucho menores, además algunos metales pueden recuperarse de las cenizas, reduciendo la generación de residuos peligrosos (Raskin et al., 1997).

Solanum nigrum L. (hierba mora)

La especie *S. nigrum*, conocida comúnmente como hierba mora o tomatillo del diablo, es una planta de la familia *Solanaceae*. Es considerada como mala hierba o especie herbácea, puede ser perenne y se distribuye de forma silvestre en todo el mundo. Aunque es originaria de Sudamérica, tiene la capacidad de desarrollarse en todo el continente americano y otros lugares del mundo.

Esta planta, de distribución subcosmopolita, es típica de regiones templadas y cálidas y se encuentra hasta altitudes de 3.000 metros sobre el nivel del mar. Prefiere suelos ricos en nitrógeno, con un alto contenido de humus y un pH neutro, razón por la cual crece de manera espontánea como maleza. Alcanza una altura de entre 30 y 80 cm y posee hojas abundantes, ovaladas y rómbicas, con pecíolos que miden entre 12 y 50 mm de largo. Sus flores son de color blanco, y sus bayas son globulares y de aproximadamente 1 cm de diámetro, adquieren un tono morado oscuro al madurar (López & Albán, 2023).

La fitoextracción utilizando plantas como la hierba mora representa una estrategia significativa para la recuperación de suelos contaminados por cadmio. Esta especie es conocida por su habilidad hiperacumuladora, pudiendo crecer y soportar suelos con concentraciones elevadas de este metal. Recientemente, ha ganado atención como una opción viable para la fitoextracción de cadmio en plantaciones de cacao, debido a su rápido

crecimiento, mínimas necesidades ambientales y su robusta capacidad de adaptación (Ramírez et al., 2018).

Las plantas arvenses como *S. nigrum*, también conocidas como metalofítas, se caracterizan por su rápida propagación y crecimiento. Estas plantas suelen tener raíces profundas y muchas de ellas muestran una preferencia por un metal específico. No obstante, la cantidad de metal que logran extraer está determinada tanto por la concentración del metal en la biomasa seca como por la cantidad total de biomasa que produce la planta (Peña et al., 2021).

En estudios donde se aplicó concentraciones de cadmio de 25 mg/kg a estas especies, se encontró concentraciones del metal en tallos y en las hojas de 103,8 y 124,6 mg/kg, respectivamente, valores significativamente superiores a los del suelo contaminado (Ramírez et al., 2018).

Ocimum basilicum (albahaca)

O. basilicum L., también conocida como *basil* en inglés, *basilik* en alemán y albahaca en español, es una planta herbácea de la familia de *Lamiaceae*, originaria de la India y África; su uso en estas regiones remota a más de 5.000 años. Actualmente, es ampliamente cultivada y utilizada en todas las extensiones del mundo. Identificándose más de 160 variedades de albahaca, cada una caracterizada por su distintivo sabor, olor, color, textura y características de floración propias. Esta planta es propia de climas secos y semidesérticos, presenta una apariencia frondosa con tallos verticales y ramificados (Cárdenas et al., 2023).

La albahaca es empleada en la cocina debido a sus aceites esenciales que le otorgan un característico aroma. Además de sus características culinarias, O*. basilicum* ha tenido múltiples aplicaciones en la medicina natural. Se emplea en el tratamiento de afecciones gastrointestinales como disentería y parasitismo, así como en problemas respiratorios incluyendo bronquitis y tos. También se usa para aliviar el dolor de oídos y el reumatismo. De manera tópica, se aplica en baños y cataplasmas para tratar problemas de la piel. A esta planta se le atribuyen propiedades antisépticas, antiinflamatorias, antiespasmódicas y analgésicas (Sánchez et al., 2000).

Los compuestos activos de la albahaca son reconocidos por sus propiedades nematicidas, insecticidas, fungicidas y antimicrobianas, por lo que es una planta con alta demanda. Además, su aroma se usa en fregancias, champús, lociones, licores y aperitivos. Por esto,

es producida en Hungría, Francia y Egipto, y exportada principalmente a la Unión Europea, Canadá y Estados Unidos (Sánchez et al., 2000).

La albahaca, que puede alcanzar una altura de entre 50 y 130 cm, presenta una elevada tasa de germinación y se propaga comúnmente a través de sus semillas. Esta planta tiene raíces delgadas y ramificadas. Sus hojas varían en forma, desde ovaladas hasta alargadas, y las flores se disponen en espirales en la parte superior del tallo. Las semillas, de color negro y forma ovalada, pueden mantener su capacidad germinativa entre 4 y 5 años. El ciclo de crecimiento de la albahaca dura entre 170 y 180 días, dependiendo de las condiciones climáticas, y permite entre 2 y 3 cosechas durante la temporada de crecimiento (Farías et al., 2022).

O. basilicum presenta una gran variabilidad en su tolerancia a distintos tipos de estrés. Aunque, no es principalmente conocida por tener una capacidad de fitorremediación, se ha observado que puede acumular en sus tejidos pequeñas cantidades de metales pesados como el cadmio. La traslocación de nano partículas a las partes aéreas de las plantas ha sido documentada en medios hidropónicos, no obstante, no se encuentra registro de estudios en el suelo (Alamo & Feng, 2017).

Mecanismos de la fitorremediación

En la fitorremediación se utiliza plantas de rápido crecimiento que absorben naturalmente pequeñas cantidades de elementos (micronutrientes) a través de raíces y los redistribuye en sus tallos, hojas, flores y frutos (Alamo & Feng, 2017). Dependiendo del tipo y concentración de contaminantes, las condiciones de campo, el nivel de limpieza requerido y la especie de planta, se emplea diferentes mecanismos de eliminación de metales pesados del suelo (Peña et al., 2021). La fitorremediación se puede clasificar en 4 tipos principales: fitoestabilización, fitodegradación, fitovolatilización, y fitoextracción (Subašić et al., 2022).

La fitoestabilización implica el uso de plantas que desarrollan un denso sistema de raíces capaz de secuestrar y estabilizar metales pesados. Este proceso se logra mediante mecanismos como la precipitación química, la formación de complejos insolubles, y la adsorción física. Como resultado, los metales se fijan en las raíces o en la materia orgánica del suelo, lo que reduce su biodisponibilidad y movilidad. Este método limita la migración vertical de los metales hacia los mantos freáticos y, aunque no elimina los metales del suelo, sí reduce significativamente su impacto ambiental (Núñez et al., 2004).

En la fitotransformación o fitodegradación, las plantas y los microrganismos asociados a sus raíces degradan y transforman contaminantes orgánicos, como hidrocarburos, plaguicidas, compuestos clorados, explosivos y surfactantes. Este proceso se lleva a cabo mediante reacciones enzimáticas que convierten los contaminantes en sustancias menos tóxicas. Las plantas pueden asimilar estos contaminantes transformados, secuestrándolos en sus vacuolas o fijándolos a estructuras celulares insolubles, como la lignina (Núñez et al., 2004; Subašić et al., 2022).

La fitovolatilización es un mecanismo mediante el cual las plantas absorben contaminantes del suelo, los metabolizan y los transportan desde sus raíces hasta sus brotes. Posteriormente, estos contaminantes se liberan a la atmósfera en formas volátiles menos tóxicas a través de la transpiración, como describen (Núñez et al., 2004). Este proceso no elimina completamente los contaminantes; más bien, los transfiere del suelo a la atmósfera. Una vez en la atmósfera, estos contaminantes pueden ser nuevamente depositados en el suelo o en aguas superficiales, lo que implica que la contaminación no se erradica, sino que se desplaza de un medio a otro (Peña et al., 2021).

En la fitoextracción o fitoacumulación es un método de remediación ambiental en el que los contaminantes se acumulan en las raíces, tallos y hojas de las plantas según su capacidad de acumulación. Estas plantas, una vez que han acumulado suficiente cantidad de contaminante, pueden ser cosechadas y procesadas de manera segura. En particular, las plantas hiperacumuladoras son capaces de absorber y translocar los contaminantes hacia su biomasa aérea, facilitando así la recuperación de metales mediante técnicas de biominería o fitominería (Peña et al., 2021). Aunque este método se utiliza primordialmente para extraer metales pesados, también se puede aplicar a la extracción de ciertos contaminantes orgánicos y elementos o isótopos radioactivos (Núñez et al., 2004). En situaciones donde las plantas disponibles no son óptimas para la fitoextracción, se pueden añadir al suelo agentes quelantes como EDTA, ácido cítrico o propileno, entre otros, para aumentar la solubilidad y disponibilidad de los contaminantes y, por tanto, mejorar la eficacia del proceso de fitoextracción (Subašić et al., 2022).

De esta forma se evidencia que la fitorremediación es un proceso complejo que depende del contaminante, la especie vegetal y las condiciones orgánicas, inorgánicas y biológicas del suelo. Cabe recalcar que los principales mecanismos de fitorremediación de los metales pesados son la fitoestabilización y fitoacumulación. En la Figura 1.1, se muestran los mecanismos de fitorremediación de las plantas.

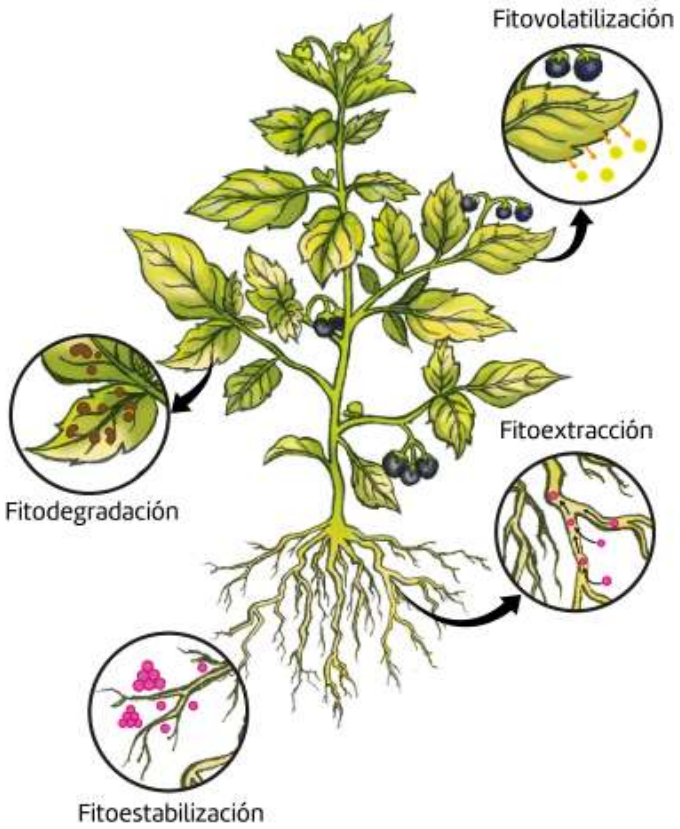

Figura 1.1. Mecanismos de fitorremediación.

Fuente: Peña et al., (2021).

Factores que influyen en la fitorremediación

La absorción y redistribución del cadmio entre raíces y brotes es un proceso altamente regulado, que contempla mecanismos como el transporte de metales en la membrana plasmática de las células radiculares, carga y descarga a través xilema y floema y el secuestro y desintoxicación en hojas y brotes (Hernández et al., 2019).

El pH del suelo es un factor crítico que afecta la absorción de cadmio por las plantas. En condiciones ácidas (pH menor a 6), la capacidad de absorción de cadmio se incrementa debido a su mayor solubilidad, lo que mejora su biodisponibilidad. Por otro lado, en suelos salinos con pH neutro, el cadmio tiende a precipitar formando carbonatos y fosfatos insolubles. Así, los suelos ácidos promueven el intercambio de iones Cd^{2+}, mientras que en suelos alcalinos el cadmio precipita, lo que reduce su movilidad y disponibilidad para las plantas (Marchive et al., 2021).

La materia orgánica presente en el suelo incide en la solubilidad y movilidad del cadmio, debido a que tiene una alta afinidad para unirse a este metal, formando complejos estables que disminuyen su biodisponibilidad.

Los suelos con alta capacidad de intercambio catiónico influenciada por el material parental o sus procesos edafogénicos retienen la mayor cantidad de cadmio al sustituir los cationes estructurales de magnesio por cadmio, afectando la solubilidad y movilidad de este metal en el suelo. No obstante, factores como el anegamiento y la compactación del suelo reducen el potencial redox (Subašić et al., 2022).

El contenido de cationes y aniones en el suelo también afecta la sorción de Cd^{2+}. Además, cationes divalentes como Zn^{2+}, Cd^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, y Fe^{2+} compiten con el cadmio para ser transportados en las membranas de las células radiculares, lo cual afecta la absorción de Cd^{2+} en la raíz, y los aniones como Cl^{-} y NO^{-3} pueden formar complejos inorgánicos solubles con el Cd^{2+}, restringiendo su sorción, por otro lado, aniones como $H_2PO^{4^-}$ y HSO^{4^-}podrían mejorar la sorción debido a la precipitación superficial (Marchive et al., 2021).

Así mismo, la presencia de bacterias, levaduras y hongos puede afectar la movilidad y absorción de cadmio por las plantas. Estos organismos tienen la capacidad de metabolizar el cadmio reduciendo su biodisponibilidad o en algunos casos facilitan la liberación del cadmio retenido, aumentando su movilidad en el suelo (Canchignia et al., 2021).

Es importante señalar que los factores que incrementan la movilidad del cadmio en el suelo también promueven su absorción por las plantas y su posterior integración en la cadena alimentaria. En contraste, aquellos factores que promueven la retención del cadmio en el suelo reducen su disponibilidad para las plantas. La resistencia de las plantas a los metales pesados depende de sus mecanismos de defensa, siendo la capa epidérmica de las raíces, en particular la punta y los pelos radiculares, los esenciales en la absorción de iones de Cd^{2+} del suelo (Marchive et al., 2021).

Indicadores

Factor de bioconcentración de la parte aérea de la planta

El factor de bioconcentración (FBC) es un indicador que calcula la concentración de metales en la biomasa aérea de una planta. Este parámetro evalúa la proporción entre la concentración de metal presente en la parte aérea de la planta y la concentración de metal en el suelo (Gallego Moreno, 2017).

$$FBC = \frac{Concentración\ del\ metal\ en\ planta\ secada}{Concentración\ del\ metral\ en\ el\ suelo}$$

El FBC depende de varios factores como la textura del suelo, el pH, la temperatura, y la disponibilidad de nutrientes. Si el FBC ≤ 1, la especie puede ser clasificada como fitoestabilizadora, mientras que, el FBC ≥ 1, la planta puede ser considerada potencialmente hiperacumuladora (Vesga, 2022).

Factor de bioconcentración en la raíz

El factor de bioconcentración en la raíz (FBR), es un indicador que cuantifica el contenido de cadmio bioacumulado en la biomasa radicular de la planta, en relación con el contenido del metal en el suelo.

$$FBR = \frac{Concentración\ del\ metal\ en\ la\ raíz}{Concentración\ del\ metal\ \ en\ suelo}$$

Al igual que el FBC, si el FBR ≤ *1*, la planta se considera exclusora, mientras que, si el FBR ≥ 1, la planta es potencialmente hiperacumuladora (Vesga, 2022).

Factor de traslocación

El factor de traslocación (FT) es un indicador que evalúa la capacidad de una especie vegetal para transponer los metales pesados desde las raíces hasta las partes aéreas de la planta (tallos y hojas).

$$FT = \frac{Concentración\ del\ metal\ en\ la\ parte\ aérea}{Concentración\ del\ metal\ en\ las\ raíces}$$

Si el FT ≥ 1, la especie vegetal tiene el potencial de translocar el metal a sus tallos y hojas, en consecuencia, el mecanismo de la fitorremediación de la planta es la fitoextracción, mientras que, si el FT ≤ 1, la especie tiene la capacidad de retener los metales en su sistema radicular, lo cual indica que podría ser empleada para fitoestabilización (Vesga, 2022).

2. METODOLOGÍA

A partir de la información bibliográfica analizada sobre los procesos de fitorremediación de cadmio mediante plantas arvenses, destacando *S. nigrum* (hierba mora) y ciertas plantas culinarias, como *O. basilicum* (albahaca), se presenta la metodología desarrollada a lo largo de la investigación.

2.1 Adquisición de suelo y plántulas experimentales

Las plántulas de las especies vegetales *S. nigrum* y *O. basilicum*, el suelo y las macetas, se adquirieron en una florícola situada en la parroquia de Nayón, cantón Quito. Las plántulas tenían 1 semana de edad, el suelo fue el compost resultante de la biodegradación aerobia de desechos de origen animal y vegetal, rico en microorganismos que actúan como biofertilizante orgánico que permite la absorción de nutrientes por parte de las plantas, y las macetas tenían el fondo perforado para permitir la liberación del exceso de agua. Los detalles técnicos del suelo agrícola se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros químicos y físicos del suelo experimental.

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	5,64
Conductividad eléctrica	µS/cm	551
Potasio	%p/p	1,63
Carácter	-	Alcalino
Color	-	Pardo oscuro
Olor	-	Característico
Insolubles	%	25,19
Nitrógeno total	%	1,44
Fosforo (P_2O_5)	% p/p	2,04
Calcio (CaO)	% p/p	2,28
Magnesio (MgO)	% p/p	1,19
Zinc	mg/Kg	282
Manganeso	mg/Kg	547
Hierro	mg/Kg	3.383,5
Carbón orgánico	%p/p	23
Densidad	g/ml	0,4
Relación C/N	-	18,93
Hongos fitopatógenos	-	Ausencia
Nematodos fitopatógenos	-	Ausencia

Fuente: Biofertil, (2024).

2.2 Caracterización del suelo agrícola

Para la caracterización química y física del suelo agrícola, se consideraron los siguientes parámetros y métodos:

pH

Para la determinación del pH en el suelo, se colocó una muestra de suelo en un vaso de precipitación hasta la marca de 40 ml. Luego, se agregó 50 ml de agua destilada previamente medida en una probeta. La solución acuosa se agitó con una varilla de vidrio durante 30 minutos en intervalos de 5 minutos. Después, se dejó sedimentar durante 15 minutos y se midió el pH con un pH-metro.

Conductividad eléctrica

Para determinar la conductividad eléctrica del suelo, se siguió un proceso similar al del pH, pero se utilizó agua desionizada para obtener la solución acuosa y se dejó sedimentar 5 minutos. Posteriormente, se filtró la muestra a través de un papel cuantitativo. Finalmente, se midió la conductividad eléctrica en la muestra filtrada con un conductímetro y se expresó en unidades de microsiemens por centímetro (µS/cm).

Humedad

La humedad gravimétrica se determinó secando una muestra de 30 g de suelo en una estufa a 105°C durante 24 horas en un crisol previamente pesado y etiquetado. Después del secado, se trasladó la muestra a un desecador para su enfriamiento hasta temperatura ambiente durante 30 minutos. Posteriormente, se pesó el crisol con la muestra y por diferencia entre el peso del crisol con la muestra seca y el peso del crisol vacío, se obtuvo el peso de la humedad o agua presente en el suelo. Finalmente, el porcentaje de humedad se determinó mediante la relación entre el peso del agua y el peso del suelo húmedo multiplicado por 100.

Materia orgánica

Para determinar el porcentaje de la materia orgánica presente en el suelo, se limpiaron 2 crisoles con el fin de garantizar la eliminación de interferencias en el análisis, y se colocaron 30 g de suelo a cada uno. Uno de los crisoles se colocó en la mufla a 550°C durante 2 horas para quemar la materia orgánica y el otro se colocó en la estufa a 105°C durante 24 horas para eliminar la humedad. Después de 2 horas, el crisol de la mufla se llevó a la estufa y luego de 24 horas ambos crisoles se trasladaron al desecador para su enfriamiento hasta temperatura ambiente y para evitar la absorción de humedad, luego de 1 hora se pesaron. Finalmente, para obtener el porcentaje de materia orgánica, se tomó la diferencia entre el peso del suelo seco y el suelo calcinado, y se dividió para el peso inicial de la muestra, y a este valor se multiplicó por 100.

Capacidad de intercambio catiónico

Para obtener el valor de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se preparó la muestra de suelo secándola en una estufa a 105°C durante 24 horas y se estabilizó en un desecador por 1 hora. Luego, se pesó 5 g del suelo seco previamente tamizado con un tamiz N° 10, se dispuso en un vaso de precipitación y se añadió 25 ml de acetato de amonio 1N a pH 7. La solución se agitó en una plancha de agitación durante 30 minutos. Posteriormente, se filtró la solución, el restante de la muestra en el vaso se lavó con 5 ml acetato de amonio y

se filtró, luego se lavó el exceso de amonio con 50 ml de alcohol al 96% y se volvió a filtrar. En otro recipiente, se lavó la torta filtrada con 50 ml de NaCl filtrando al vacío. La muestra filtrada se transfirió a un matraz Erlenmeyer y se agregó 10 ml formaldehído al 37%, seguidamente se agregó 2 gotas de fenolftaleína, y se tituló con NaOH 0,1 N hasta obtener un tono rosa tenue, registrando el volumen usado en la titulación. Adicionalmente se preparó un blanco con 50 ml de NaCl al 10%, y formol al 37% y se titiló siguiente el proceso anterior. Finalmente se calculó el valor de CIC en miliequivalentes de NaOH/100g (meq/100g) con la siguiente formula:

$$CIC = \frac{\left(V_{NaOH\ gastado\ muestra} - V_{NaOH\ gastado\ blanco}\right) \times N}{peso\ suelo\ \times (1 - conenido\ de\ humedad)}$$

Nitratos y fosfatos

Para determinar el contenido de nitratos y fosfatos en el suelo, se preparó una solución de suelo y agua destilada en una proporción de 1:4, para esto, se mezcló 20 g de suelo y 80 ml de agua destilada en un vaso de precipitación y se agitó con una varilla de vidrio durante 2 minutos. Posteriormente, se dejó sedimentar por 30 minutos y se filtró la solución a través de un papel cuantitativo. En 3 celdas para espectrofotómetro se agregaron 10 ml de la solución filtrada, la primera celda se usó como blanco, y en las otras se agregaron los reactivos de Hach de nitratos y fosfatos. Finalmente se determinó las concentraciones de estos compuestos en miligramos por litro (mg/L) mediante el espectrofotómetro.

Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente del suelo, se secó una muestra en la estufa a 105°C por 30 minutos. Se tomó una parte del suelo seco y se colocó en una probeta previamente pesada, luego, se volvió a pesar la probeta con la muestra de suelo. Seguidamente, se añadió 90 ml de agua destilada. Considerando que la densidad del agua es de 1 g/cm^3, se calculó la densidad del suelo dividiendo la masa de la muestra de suelo para el volumen de fluido registrado en la probeta.

Porosidad

Para determinar la porosidad, se realizó un proceso similar al seguido para la determinación de la densidad del suelo. Primero, se agregó agua a la muestra de suelo contenida en una probeta hasta alcanzar la saturación completa. Posteriormente, se pesó la probeta con el suelo saturado. Tras dejar reposar la muestra, se pesó nuevamente para obtener el peso de la muestra suspendida en agua. Para calcular la porosidad, se tomó la diferencia entre los volúmenes de la muestra en estado seco y saturado y se dividió por la

diferencia entre el peso de la muestra saturada y el peso de la muestra suspendida en agua.

Clase textural

Para determinar la textura del suelo, se utilizó suelo seco. De conformidad con la norma ASTM D6913 se empleó tamices en serie desde la malla N°10 a la 200. En primer lugar, se pesó una muestra de suelo seco y se colocó en la parte superior de la serie de tamices que se sometieron a agitación durante 30 minutos en un agitador vertical. Posteriormente, se pesó la fracción de suelo retenido en cada tamiz y mediante una curva granulométrica se determinó la textura predominante del suelo.

2.3 Acondicionamiento del sitio experimental

La fase experimental se llevó a cabo en un invernadero de 4x4x2 m^3, ubicado en la terraza del edificio 10 del campus politécnico a una altitud de 2.809 msnm. Al interior del invernadero la temperatura en el día variaba entre los 22 y 36 °C. Previo a la siembra de las plántulas experimentales, se realizó trabajos de limpieza y acondicionamiento del sitio donde se dispondrían las macetas. La Figura 2.1, muestra el invernadero desde una vista superior.

Figura 2.1. Sitio experimental.

2.4 Diseño experimental

La investigación incluyó el uso de 2 especies fitoremediadoras *S nigrum* y *O. basilicum*, en 3 tratamientos: grupo de control o blanco (T0), el tratamiento 1 (T1) y el tratamiento 2 (T2), con concentraciones de cadmio en el suelo de 0, 10 y 20 mg/kg, respectivamente. Se

consideró 3 réplicas por cada tratamiento. En la Tabla 2.2, se muestra el diseño experimental ejecutado y el etiquetado usados para cada tratamiento y repetición, por cada especie vegetal.

Tabla 2.2. Diseño experimental.

Repeticiones	Tratamientos		
	T0 (0 mg/kg)	T1(10 mg/kg)	T2 (25 mg/kg)
1	T0-1	T1-1	T2-1
2	T0-2	T1-2	T2-2
3	T0-3	T1-3	T2-3

Las concentraciones de cadmio a exponer a las plántulas fueron seleccionadas de acuerdo con la clasificación Kelley que se presenta en la Tabla 2.3. En esta se contempla el grado de contaminación con metales pesados y establece 5 categorías: suelo no contaminado (SNC), contaminación ligera (SCL), contaminación (SC), contaminación alta (SCA) y contaminación inusualmente alta (SCIA) (Vesga, 2022).

Tabla 2.3. Clasificación Kelley para suelos contaminados con Cd.

Categoría	Grado de contaminación	Cd (mg/kg)
SNC	Suelo no contaminado	0 a 1
SCL	Suelo con contaminación ligera	1 a 3
SC	Suelo contaminado	3 a 10
SCA	Suelo con contaminación alta	10 a 50
SCIA	Suelos con contaminación inusualmente alta	>50

Fuente: Vesga (2022).

Para el efecto de la presente investigación, se simuló un escenario de contaminación por cadmio clasificado como SC y SCA, con una dosis de 10 mg Cd/kg (T1) y de 25 mg Cd/kg (T2), respectivamente, en cada riego.

2.5 Preparación de las soluciones acuosas de cadmio

Se prepararon soluciones acuosas de cadmio a partir de la sal soluble de acetato de cadmio al 98%, utilizando como disolvente agua de lluvia colectada en un lugar de insignificante tráfico vehicular para evitar la contaminación.

Considerando la masa molecular del acetato de cadmio ($C_4H_6O_4Cd.2H_2O$) de 266,52 g/mol, la masa molecular del Cd de 112,41 g/mol, y el peso del suelo de cultivo utilizado en cada maceta de 1,5 kg, se determinó que para obtener una concentración de 10 mg Cd/kg de suelo en cada riego, para el tratamiento 1 (T1) se requiere 1,05 g de acetato de cadmio por cada 6 litros de agua de lluvia, mientras que, para el tratamiento 2 (T2), se requiere de 2,61 g de la sal por cada 6 litros de agua de lluvia.

2.6 Aclimatación de las unidades experimentales

La Figura 2.2, muestra la aclimatación de las plántulas trasplantadas en las macetas experimentales. En cada maceta se colocó 1,5 kg de suelo agrícola y una plántula, dando un total de 18 unidades experimentales.

Figura 2.2. Aclimatación de las plántulas experimentales.

Con fines de verificar a salud de las especies vegetales, durante 3 semanas las plantas fueron regadas únicamente con agua de lluvia libre de cadmio. En ese periodo se agregó aceite orgánico de Neem a las plantas como se muestra en la Figura 2.3, para evitar el ingreso de plagas como gusanos, arañas u hormigas que puedan dañar las plantas.

Figura 2.3. Acondicionamiento de las plantas.

2.7 Exposición y monitoreo de las plantas

Se simuló la contaminación del suelo con cadmio mediante riego. Inicialmente, cada maceta fue identificada y etiquetada de manera aleatoria, correspondiente a uno de los tres tratamientos para cada especie vegetal. El riego con la solución contaminante comenzó 3

semanas después de trasplantar las plántulas, una vez que las plantas se estabilizaron en el nuevo suelo.

Se realizó el riego con la solución de cadmio 2 veces por semana, aplicando 200 ml en cada maceta. En contraste, para el tratamiento control (T0), se utilizó únicamente agua de lluvia. Para el riego se emplearon botellas plásticas debidamente etiquetadas y marcadas para este fin, como se muestra en la Figura 2.4.

Figura 2.4. Recipientes usados para el riego.

Cada planta fue monitoreada 2 veces por semana, por 10 semanas. Durante la exposición, se registró su crecimiento y cambios fisiológicos. A continuación, se muestra el proceso de crecimiento semanal de las plantas en el periodo de experimentación:

Figura 2.5. Primera semana de exposaición a Cd^{2+}.

Figura 2.6. Segunda semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.7. Tercera semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.8. Cuarta semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.9. Quinta semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.10. Sexta semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.11. Séptima semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.12. Octava semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.13. Novena semana de exposición a Cd^{2+}.

Figura 2.14. Décima semana de exposición a Cd^{2+}.

2.8 Cosecha y secado de las biomasas aérea y radicular

Luego de 10 semanas de exposición a Cd^{2+}, las plantas se encontraban es su estado de maduración. Estas fueron cosechadas individualmente, separando la parte aérea (hojas y tallo), de la parte radicular, en contenedores de aluminio de 15x7,8x5 cm^3, respectivamente etiquetados según su especie, tratamiento, repetición y tejido vegetal.

También se tomó una muestra de suelo de cada maceta por cuarteo. Posteriormente, todas las muestras se sometieron a secado en la estufa a 100±5°C, durante 2 horas. La Figura 2.15 muestra la cosecha de las biomasas aéreas y radiculares de las unidades experimentales.

Figura 2.15. Cosecha de las biomasas aéreas y radiculares de cada planta.

2.9 Determinación de las concentraciones de cadmio

Una vez finalizado el secado de las biomasas, se trituró cada una en un mortero. Posteriormente, se pesó 0,5 gramos de biomasas y de suelo en una balanza analítica y se colocó en recipientes plásticos etiquetados adecuadamente. Para realizar la digestión del cadmio en las biomasas y el suelo, se agregó 7 ml de HNO_3 concentrado de grado analítico en cada recipiente con la muestra y se digestaron en microondas durante 1 hora a 90 °C.

En el transcurso de la digestión, se controló cada 10 minutos que los recipientes mantuvieran el nivel de ácido sobre la muestra, caso contrario se agregó 1 ml adicional. Cabe recalcar que previamente se realizó pruebas de digestión para verificar la efectividad. Todo el proceso se realizó dentro de una sorbona para evitar gases liberados por el ácido en el ambiente de trabajo, como se muestra en la Figura 2.16.

Figura 2.16. Digestión de las muestras de biomasas aéreas, radiculares y el suelo.

Una vez digestada la muestra, se aforó a 100 ml con agua destilada y se filtró a través de un papel cualitativo. Finalmente, se tomó 10 ml de la solución y se agregó en tubos de vidrio etiquetados adecuadamente como se muestra en la Figura 2.17

Figura 2.17. Filtración de la solución para la cuantificación de Cd.

La cuantificación de las concentraciones de cadmio se realizó en el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX), por espectrofotometría de absorción atómica.

2.10 Análisis estadístico de las concentraciones de cadmio

Análisis descriptivo

En el análisis descriptivo de la investigación, se evaluaron las concentraciones de cadmio en 52 muestras, agrupadas según especie, tratamiento y parte de la planta. Para cada grupo, se calcularon estadísticos descriptivos como el mínimo, máximo, mediana, media y desviación estándar. Este método proporcionó un análisis detallado de la respuesta del cadmio en diferentes tejidos la planta, bajo las condiciones experimentales de los tratamientos aplicados. Además, se analizó cómo las variaciones en la dosificación del

cadmio afectaban su acumulación en distintas partes de la planta, permitiendo observar la influencia específica de los niveles de cadmio en cada una de sus partes.

Con el objetivo de facilitar la interpretación de estos datos, se generaron diagramas de cajas, que fueron útiles para visualizar la distribución de los datos, identificar valores atípicos y comparar las medias y variabilidades entre los diferentes grupos. Esto proporcionó la base para comprender las tendencias generales y preparar el terreno para realizar un análisis inferencial, destinados a explorar las relaciones causales y las interacciones complejas entre las variables estudiadas.

Análisis inferencial

Para analizar las concentraciones de cadmio en la parte aérea y radicular de las plantas bajo tres diferentes tratamientos, se empleó un Análisis de Varianza ANOVA, con el objetivo de comparar las medias de las concentraciones de cadmio entre los diferentes tratamientos. Este método estadístico fue útil para determinar si las diferencias observadas entre las medias son aleatorias o si representaron diferencias estadísticamente significativas entre las poblaciones estudiadas. Posteriormente, se realizó el test de Dunn para evaluar diferencias específicas entre los tratamientos administrados y su impacto, en cada una de las partes de la planta: suelo, raíz y parte aérea.

Se compararon las medias de las concentraciones de cadmio en grupos diferentes, analizando tanto la variabilidad dentro de los grupos como entre ellos. Las hipótesis formuladas para este análisis fueron:

- H_0: no existen diferencias significativas entre las medias de los grupos.
- H_a: al menos una de las medias de los grupos es significativamente diferente.

La implementación del análisis se realizó utilizando el paquete estadístico RStudio. Se estableció un nivel de significancia de 0,05, lo que implica que, si el p-valor obtenido es menor a este umbral, se rechaza la hipótesis nula (H_0). Esto indicaría la presencia de al menos una diferencia significativa en las medias de las concentraciones de cadmio entre los grupos estudiados.

2.11 Determinación de los indicadores de bioconcentración y traslocación

A partir de los resultados de las concentraciones de cadmio, se calcularon los indicadores o factores de bioconcentración, tanto en las raíces como en la parte aérea de la planta.

Estos indicadores reflejan la cantidad de metal acumulado en los diferentes órganos de la planta en relación con la concentración de cadmio en el suelo.

Además, para identificar el mecanismo de fitorremediación de cada especie estudiada, se determinó el factor de traslocación, mediante la relación entre la concentración promedio de cadmio en la parte aérea, y en el suelo de cada tratamiento y para cada especie vegetal. Esto determina la capacidad de la planta para trasladar el metal a sus hojas.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Caracterización química y física del suelo

Los resultados del análisis físico y químico de la caracterización del suelo experimental se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caracterización del suelo experimental.

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	7,50
Conductividad eléctrica	µS/cm	448
Humedad	%	54
Materia orgánica	%	46
Capacidad de intercambio catiónico	Meq/100g	100
Nitratos	mg/kg	6,8
Fosfatos	mg/kg	222,4
Porosidad	%	66
Densidad aparente	g/cm^3	1,5
Textura	-	Limoso

En la Tabla 2.1, se puede observar que existe un alto contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg), y micronutrientes (Fe, Mn y Zn). Estos elementos son esenciales para el desarrollo óptimo de las plantas y su disponibilidad está fuertemente ligada al pH del suelo, estando mayormente biodisponibles en suelos con pH neutro (6,50 a 7,50) (Sierra et al., 2020), como se evidencia en el suelo experimental.

Además, los nutrientes juegan un papel importante en la biodisponibilidad del cadmio para las plantas, no solo inciden en la absorción del metal, sino también en la movilidad al interior de cada especie vegetal. Elementos como el Mn y el Se, figuran una importante defensa frente a la toxicidad del cadmio, mientras que, los macro y micronutrientes podrían contribuir en la extracción de cadmio por las plantas (Marchive et al., 2021). El suelo experimental al contar con un alto porcentaje de nutrientes en su composición podría favorecer la absorción y traslocación del metal por las plantas.

La capacidad de intercambio catiónico registrada en la Tabla 3.1, (100 meq/100 g), sugiere que el cadmio puede ser fijado en los agregados orgánicos del suelo y en sitios de intercambio catiónico de los limos y arcillas, previniendo su absorción por las plantas. Esta característica se refleja en un factor que permite a las plantas disponer de una mayor cantidad de nutrientes para su crecimiento vegetativo (Marchive et al., 2021).

La presencia de un alto porcentaje de materia orgánica (46%) en el suelo, podría ayudar en la retención del cadmio, debido a que los ácidos húmicos actúan como agentes quelantes, reduciendo la disponibilidad de metales pesados para las plantas (Vesga, 2022).

En cuanto a las características físicas, la textura limosa del suelo indica una alta capacidad de absorción y retención de agua, crucial para mantener la estructura del suelo y favorecer las reacciones químicas necesarias para el crecimiento de las plantas. Además, la alta humedad (54%) y densidad aparente (1,5 g/cm^3) contribuyen al desarrollo radicular y al crecimiento saludable de las plantas (Bravo et al., 2014).

En comparación con los valores establecidos por la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados del Anexo 2 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), el pH del suelo experimental (7,50) está dentro del rango aceptable (6-8 unidades), la conductividad eléctrica supera el criterio de 200 µS/cm, mientras que, el límite máximo permisible de cadmio es de 0,5 mg/kg.

Con este marco, se concluye que el suelo de los tratamientos experimentales presenta condiciones desfavorables para la asimilación del cadmio por parte de las plantas, debido al alto contenido de materia orgánica, el pH fuera del rango en que el cadmio está disponible (entre 4 y 5), y una alta capacidad de intercambio catiónico. Estos factores sugieren que el cadmio es retenido en mayor medida por el suelo. No obstante, las características físicas del suelo y el alto contenido de macro y micronutrientes pueden favorecer la absorción y traslocación del metal a las partes aéreas de las plantas.

Esto demuestra que la disponibilidad de cadmio para la planta no es un evento aislado, sino que interactúa sinérgicamente con las propiedades elementales del suelo. Por lo tanto, el suelo debe ser constantemente monitoreado, ya que su deterioro agrava la problemática de ingesta de cadmio y otros metales pesados, constituyendo una preocupación importante para la salud y el ambiente.

Aunque para la experimentación se usó un suelo en buenas condiciones, se debe considerar que, con el tiempo, el cadmio puede introducirse en los suelos de cultivo a través

del riego o por contaminación antrópica directa. Este metal puede alterar la calidad y dinámica natural del suelo, favoreciendo su absorción por las raíces de diversas especies vegetales e ingresando así en la cadena alimentaria, afectando la salud de quienes consumen estos alimentos.

3.2 Evidencia de toxicidad en el monitoreo de las especies vegetales

S. nigrum

Durante la simulación de contaminación con cadmio mediante riego a la especie vegetal *S. nigrum* (hierba mora), por 10 semanas, se observó que el crecimiento de las plantas de un mismo tratamiento y entre tratamientos fue muy variable. Las plantas del tratamiento de control (T0: 0 mg Cd/kg) crecieron entre 10 y 12 cm semanalmente. Mientras que, las plantas del tratamiento 1 (T1: 10 mg Cd/kg) y tratamiento 2 (T2: 25 mg Cd/kg) mostraron tasas de crecimiento reducidas de 8-10 cm y 4-7 cm respectivamente. Cabe destacar que el crecimiento se midió de forma vertical, sin embargo, los tallos presentaron un ángulo de inclinación respecto a la superficie del suelo, y alcanzaron una altura de 90 cm.

Aunque estas plantas son conocidas por su rápida adaptación y crecimiento, se identificó que una de las repeticiones del tratamiento 2 (T2-2) no mostró signos de crecimiento hasta la semana 6, manteniéndose entre los 6 y 8 cm, y en la semana 7 murió, por lo que fue descartada de los análisis de contenido de cadmio, tanto en la raíz como en el tallo, y únicamente se realizó tal análisis en el suelo. A pesar de estas variaciones, en ninguno de los tratamientos se identificó clorosis foliar, lo que se atribuye a la alta resistencia de esta especie a los metales pesados.

Posterior a la sexta semana, las plantas del T1 mostraron un aspecto más vigoroso y frondoso que las plantas del T0 y el T2, estás últimas empezaron a mostrar leves signos de agotamiento y tasa de crecimiento menor en esta misma semana, lo que puede estar asociado tanto a las variaciones biológicas de la planta como a los efectos del metal en concentraciones de 25 mg Cd/kg. Esto concuerda con Ramírez et al., (2018), quienes observaron que la presencia de entre 10 y 25 mg Cd/kg en el suelo, no afectó significativamente el crecimiento de las plantas de *S. nigrum*. Además, identificaron que esta especie expuesta a cadmio incrementó su biomasa (p-valor $< 0,05$), conforme aumentaba la concentración del metal en el suelo.

O. basilicum

Durante la simulación de contaminación con cadmio mediante riego a la especie *O. basilicum* (albahaca) por 10 semanas, se observó que las plantas del Tratamiento 0 crecieron entre 6 y 8 cm cada semana hasta la semana 7. No obstante, una planta específica del mismo tratamiento (T0-2) presentó necrosis en el ápice durante la segunda semana y perdió parte de su tallo en la tercera semana. Posteriormente, creció con normalidad con un promedio de crecimiento semanal de 4 cm. Las plantas de este tratamiento alcanzaron un tamaño aproximado de 60 cm.

Las plantas del tratamiento 1 mostraron un crecimiento semanal de 5 a 7 cm, con un tamaño máximo de 54 cm, mientras que, las plantas del tratamiento 2 presentaron un comportamiento similar a las del tratamiento 1, con un crecimiento de 4 a 6 cm a la semana, llegando a un tamaño máximo de 51 cm.

De forma general, se observó que las plantas de *O. basilicum* tuvieron un comportamiento variable por tratamiento y entre tratamientos, las plantas del tratamiento 2 obtuvieron pocos centímetros menos que las plantas del tratamiento 1. Además, no se evidenció diferencias significativas en su desarrollo morfológico hasta la sexta semana. En la semana 7, las plantas del tratamiento 2 empezaron a mostrar clorosis foliar en la parte inferior, y las plantas del tratamiento 1 presentaron clorosis en toda la planta desde la misma semana.

Entre la semana 9 y 10, todas las plantas experimentales empezaron a mostrar síntomas de clorosis en todas sus partes, por lo que este evento no se puede atribuir únicamente a los efectos del cadmio, sino que también puede estar relacionado con la insuficiencia de hierro u otros nutrientes que estimulan la producción de clorofila, generando un tono amarillento en las partes de las plantas (Rivera et al., 2009).

Cabe recalcar que las plantas presentaron un comportamiento variable, en determinadas semanas presentaban decaimiento, mientras que en otras semanas estaban frondosas. Esto se atribuye a la fuerte presencia de sol en algunas semanas del experimento, lo que generó estrés hídrico y la variabilidad en el crecimiento de las plantas. Adicionalmente, se identificó que durante la fase experimental algunas de las hojas cayeron dentro y fuera de la maceta, por lo que se pudo haber perdido parte del contenido de cadmio de las hojas.

Los hallazgos se corroboran con los de Alamo & Feng, (2017), quienes observaron que la exposición de *O. bailicum* al cadmio, tanto en formas queladas (QD) como iónicas, tuvo un impacto negativo inicial sobre el crecimiento de las plantas, pero no se hallaron diferencias significativas en la longitud de las raíces entre tratamientos y el grupo de control después

de 3 y 6 semanas. Este contraste sugiere que mientras el cadmio puede influir en la morfología aérea y la coloración de las hojas en O*. basilicum*, su efecto en la longitud de las raíces puede ser menos pronunciado, o al menos, no inmediatamente aparente.

3.3 Contenido de cadmio en las biomasas de la planta y el suelo

Análisis descriptivo

S. nigrum

La Tabla 3.2 presenta las variables estadísticas de tendencia central y de dispersión en función del tratamiento y parte de la planta (aérea y radicular) de la especie *S. nigrum*. La Figura 3.1 muestra de forma comparativa la distribución de los datos en diagramas de cajas, y en el Anexo 1 se muestran las concentraciones de cadmio de cada unidad experimental de esta especie identificadas con el código del tratamiento precedido de "HM: hierva mora".

Tabla 3.2. Cadmio (mg /kg) bioacumulado en la especie *S. nigrum*.

Tratamiento	Parte de la planta	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Varianza
Control (T0)	Suelo	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00
	Raíz	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00
	Aérea	3,33	2,00	4,00	1,15	1,33
Tratamiento 1 (T1)	Suelo	148,67	42,00	216,00	93,43	8.729,33
	Raíz	65,33	32,00	94,00	31,26	977,33
	Aérea	214,00	180,00	234,00	29,60	876,00
Tratamiento 2 (T2)	Suelo	345,33	150,00	702,00	309,35	95.697,33
	Raíz	121,00	98,00	144,00	32,53	1.058,00
	Aérea	403,00	86,00	720,00	448,31	200.978,00

A partir de los resultados obtenidos, se identifica que las plantas del T0, utilizadas como control presentaron concentraciones de hasta 4 mg Cd/kg y un promedio de 3,33 mg Cd/kg, con una ligera variabilidad (desviación estándar: 1,15 mg Cd/kg) en la parte aérea de la planta, y en la raíz y el suelo mostraron concentraciones constantes de 2 mg Cd/kg. Considerando que la investigación se realizó en un invernadero en el que se mantenía la puerta abierta para evitar el exceso de evapotranspiración de las plantas que pudieran ocasionar estrés hídrico por razones ajenas al efecto del cadmio, y que en el sitio experimental se encontraban otros proyectos de fitorremediación de cadmio en el suelo, se puede atribuir la presencia del metal en las plantas de control, a la contaminación cruzada por el levantamiento de partículas de suelo. No obstante, las concentraciones en las

plantas de control son prácticamente nulas, con respecto a las presentadas en los otros tratamientos, como se observa en la Figura 3.1. Por lo que, otra de las razones de la presencia de cadmio en los controles, se puede atribuir a la contaminación del material analítico en el proceso de cuantificación del metal.

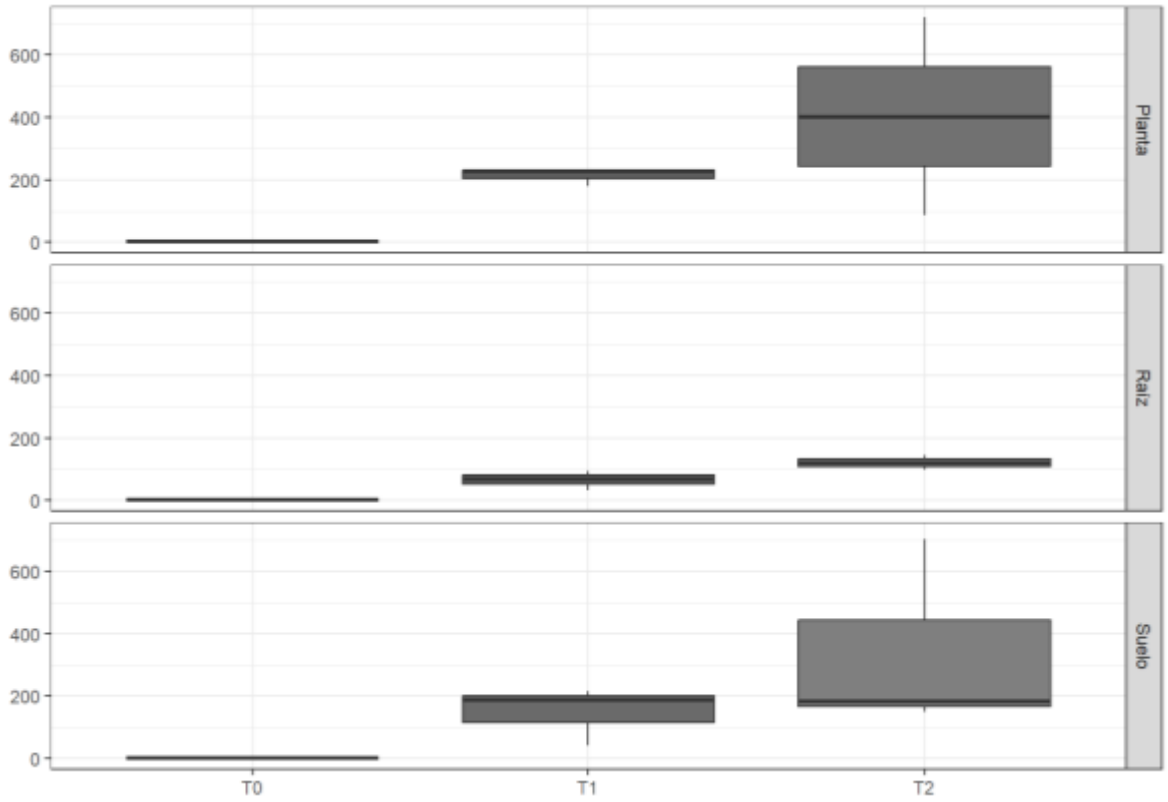

Figura 3.1. Distribución del Cd bioacumulado en los tejidos de la especie *S. nigrum*.

En el T1, se observa el aumento significativo de las concentraciones de cadmio en todas las partes de la planta respecto a T0, particularmente en el suelo con una concentración promedio de 148,67 mg Cd/kg con una alta desviación estándar (93,43 mg Cd/kg), y en la raíz con una concentración media de 65,33 mg Cd/kg con una variabilidad de 31,26 mg Cd /kg, lo que muestra una acumulación de cadmio menos variable que el suelo. En cambio, la concentración media en la parte aérea fue 214 mg Cd/kg, con una desviación estándar de 29,60 mg Cd/kg, lo que indica que la planta acumula cadmio de forma consistente en comparación con las raíces y el suelo.

En el T2, se identificaron concentraciones notablemente más altas de cadmio en todas las partes de la planta en comparación con T0. En este tratamiento, la concentración promedio de cadmio en la planta fue de 403 mg Cd/kg, aunque con una alta desviación estándar de 309,35 mg Cd/kg, lo que indica una absorción significativa pero también una alta variabilidad. En las raíces, la concentración media fue de 121 mg Cd/kg con una desviación

estándar de 32,53 mg Cd /kg, y en el suelo, el promedio fue de 345,33 mg Cd/kg con una desviación estándar igualmente alta de 309,35 mg Cd /kg.

Se observó una dispersión mayor en los niveles de cadmio en el suelo, tanto para el T1 como para el T2, con tendencia hacia la derecha e izquierda de la curva respectivamente, como se muestra en el diagrama de cajas en la parte inferior de la Figura 3.1. La variabilidad en la absorción de cadmio en el T2 se atribuye a la muerte de una de las plantas de este tratamiento en la séptima semana, resultando en una acumulación de cadmio de 702 mg Cd/kg únicamente en el suelo.

Además, se identificó una gran variabilidad entre réplicas, con acumulaciones mínimas y máximas de 86 y 720 mg Cd/kg en la parte aérea, y 98 y 144 mg Cd/kg en las raíces de las plantas del T2. Estas diferencias podrían deberse a la variabilidad biológica de las plantas de una misma especie.

En la investigación, se evidenció que *S. nigrum* tiene una notable capacidad para bioacumular cadmio, especialmente en su parte aérea. En el tratamiento con 25 mg Cd/kg (T2), se alcanzaron concentraciones de hasta 720 mg Cd/kg, mientras que con 10 mg Cd/kg (T1), las concentraciones fueron de hasta 234 mg Cd/kg. Este comportamiento respalda la clasificación de *S. nigrum* como hiperacumuladora de cadmio, lo que concuerda con la investigación de Wei et al. (2005) citado por Vesga, (2022), quienes encontraron concentraciones de 103,8 mg Cd/kg en tallos y 124,6 mg Cd/kg en hojas, superiores a las del suelo, lo que demuestra la eficiencia de esta planta en la acumulación de cadmio a partir de soluciones con alta concentración de este metal (25mg Cd/kg). Esto sugiere la planta tiene la capacidad de acumular más cadmio mientras la concentración en el suelo es mayor, aunque con una mayor variabilidad en las concentraciones absorbidas.

Comparativamente, las concentraciones de cadmio en la parte aérea de *S. nigrum* fueron superiores a los resultados obtenidos por Ramírez et al., (2018), quienes aplicaron 10 mg Cd/kg durante 9 semanas. Las diferencias observadas pueden atribuirse a las fases de desarrollo de las plantas al momento de la medición. Según Wei et al. (2006), citado por Vesga, (2022), la acumulación de cadmio en *S. nigrum* es más alta entre el estado de floración y la madurez de la planta, cuando puede absorber hasta 85% del total, que es el estado en el que se cosechó las plantas de experimentación, mientras que, las utilizadas por el autor, se encontraban en estado vegetativo en la cosecha. Sin embargo, todos estos estudios revelaron que *S. nigrum* acumula una cantidad de cadmio considerable y ayuda a controlar la contaminación en suelos contaminados con este metal.

O. basilicum

La Tabla 3.3 presenta las medidas de tendencia central y de dispersión obtenidas en función del tratamiento y parte de la planta de la especie *O. basilicum*. En la Figura 3.2 se representa de forma comparativa la distribución de los datos en diagramas de cajas, y en el ANEXO I, se muestran las concentraciones de cadmio en cada unidad experimental para esta especie, identificadas con el código del tratamiento precedido de "A: albahaca".

Tabla 3.3. Cadmio (mg /kg) bioacumulado en la especie *O. basilicum*.

Tratamiento	Parte de la planta	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Varianza
Control (T0)	Suelo	4,00	4,00	4,00	0,00	0,00
	Raíz	3,33	2,00	6,00	2,31	5,33
	Aérea	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00
Tratamiento 1 (T1)	Suelo	92,00	42,00	172,00	70,00	4.900,00
	Raíz	40,00	28,00	48,00	10,58	112,00
	Aérea	198,67	114,00	298,00	92,87	8.625,33
Tratamiento 2 (T2)	Suelo	354,67	84,00	680,00	301,74	91.045,33
	Raíz	122,67	82,00	184,00	54,05	2.921,33
	Aérea	352,00	190,00	602,00	219,65	48.244,00

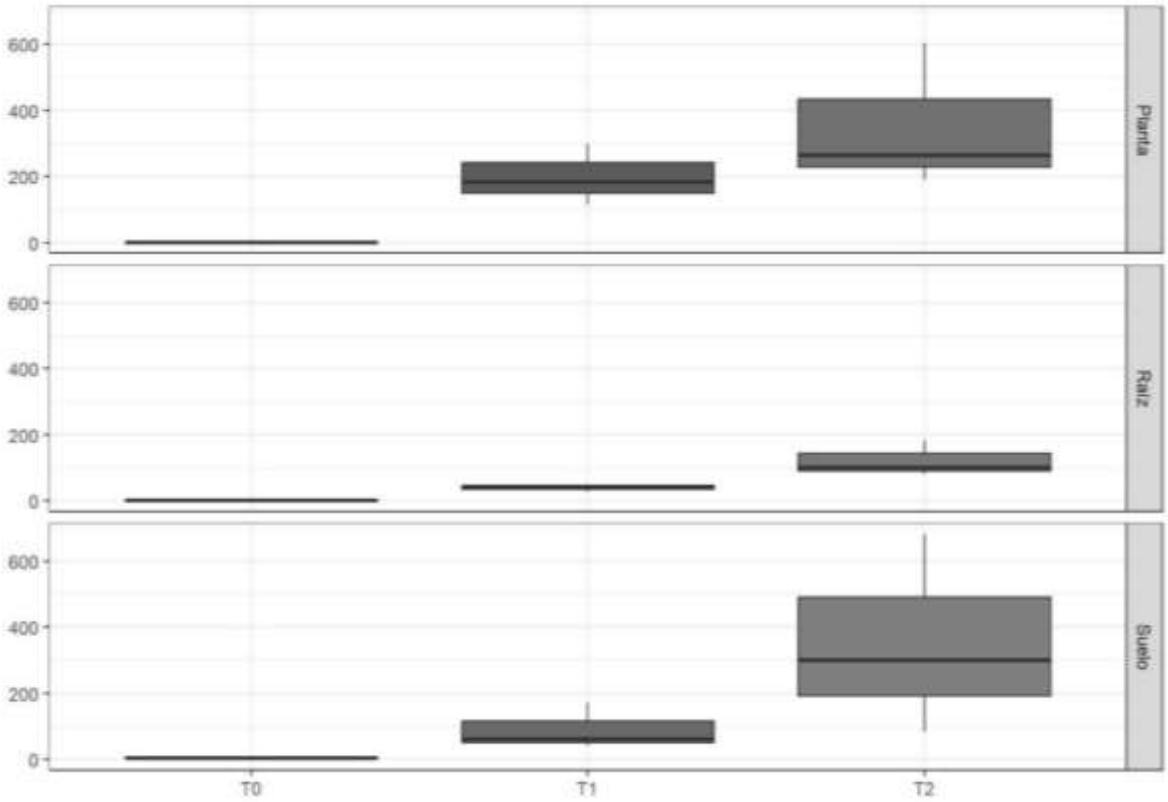

Figura 3.2. Distribución del Cd bioacumulado en los tejidos de la especie *O. basilicum*.

En función de la distribución de concentraciones obtenidas, se identifica que en el T0 existe la presencia de cadmio en un valor constante de 4 y 2 mg Cd/kg en el suelo y planta (parte aérea) respectivamente, mientras que en las raíces en el control muestran una ligera variación en la concentración de cadmio, con una media de 3,33 mg Cd/kg y un rango de 2 a 6 mg Cd/kg, lo que podría sugerir una acumulación natural o variabilidad inherente en la absorción del metal por las raíces, esto indica que las plantas se encontraban en un ambiente controlado sin contaminación progresiva adicional, además de la atribuida por la presencia de otros proyectos referentes la suelo en el lugar experimental, que pudo haber resultado en un principio en contaminación cruzada, no obstante, estos valores son relativamente bajos en comparación con los otros tratamientos.

En el T1, se observa un incremento significativo en la concentración de cadmio en todas las partes de la planta. El suelo registra una media de 92 mg Cd/kg, con un rango bastante amplio desde 42 a 172 mg Cd/kg, indicando una variabilidad considerable (desviación estándar: 70 mg Cd/kg), posiblemente debido a la heterogeneidad en la aplicación del riego o en la respuesta del suelo. Las raíces y la parte aérea también muestran aumentos notables en las concentraciones, siendo 40 y 198,67 mg Cd/kg respectivamente. La parte aérea en particular exhibe una variabilidad alta, con concentraciones que van desde los 114 a 298 mg Cd/kg y una distribución más amplia con una desviación estándar de 92,87 mg Cd/kg. La menor variabilidad muestra la raíz, representada por una desviación estándar de 10,58 mg Cd/kg.

El T2 refleja un aumento aún más drástico en la concentración de cadmio, con el suelo alcanzando una media de 354,67 mg Cd/kg y un rango extremadamente amplio de 84 a 680 mg Cd/kg. Esta alta variabilidad sugiere fuertes fluctuaciones en la absorción o retención de cadmio por el suelo a niveles altos de contaminación. Similarmente, las raíces y la parte aérea muestran concentraciones elevadas de 122,67 y 352 mg Cd/kg, respectivamente, con variabilidades significativas que indican una respuesta diferencial a la contaminación elevada (desviación estándar de 54 y 219,65 mg Cd/kg, para la raíz y la parte aérea, respectivamente).

Los niveles de cadmio bioacumulado por las partes de las plantas de la especie O*. basilicum*, reflejan que podría almacenar cadmio principalmente en la parte aérea de la planta, sin embargo, en altas concentraciones, el cadmio podría ser en mayor medida retenido en el suelo y esto podría estar asociado a la heterogeneidad del riego, es decir, si la aplicación es directamente en la parte central de la raíz. No obstante, los resultados indican que *O. basilicim*, tiene una alta capacidad para acumular cadmio en sus tejidos aéreos, especialmente en concentraciones más altas del metal en la solución acuosa de

riego, superando los 600 mg Cd/kg en la parte aérea, pero con una variabilidad extremadamente amplia. Esto demuestra que, en niveles más altos de acumulación, se podría tener implicaciones serias en términos de la seguridad para el consumo humano al ser una especie de origen alimenticio.

Esto concuerda con lo que afirma Lykas et al., (2022), que las plantas de albahaca pueden acumular niveles significativos de cadmio principalmente en sus brotes y hojas de hasta 285 mg Cd/kg, a través del riego con agua contaminada o la deposición foliar de metales pesados durante 8 semanas, posteriormente, las concentraciones empiezan a decrecer por pérdida de masa foliar debido a la caída de las hojas.

Adicionalmente, se identificó que las menores concentraciones de cadmio se encontraban en las raíces, lo que es contradictorio a lo encontrado por Alamo & Feng, (2017), quienes afirman que la albahaca tiene capacidad para incorporar pequeñas cantidades de cadmio después de regar soluciones con Cd-QD y Cd-iónico a 25 y 50 mg/kg, por 3 y 6 semanas, ya que la mayor concentración de cadmio (independientemente de la fuente de cadmio) se encontró en las raíces, seguidas de los brotes y finalmente en las hojas, para todos los tratamientos.

La diferencia de la absorción de cadmio en las diferentes partes de la planta de *O. baillicum* también puede estar asociada a la variabilidad biológica de una misma especie, las condiciones de tratamiento, el contaminante, la variabilidad de respuesta del sustrato, la intensa transpiración o, a que las hojas jóvenes de la albahaca tienden a acumular menos cadmio que las maduras, que es el estado en el que se cosechó las plantas experimentales, al estar expuestas a la contaminación por un mayor periodo, como afirma Lykas et al, (2022).

De esta manera, se puede inferir que *O. basilicum*, puede ser usada para la fitorremediación en suelos contaminados con metales pesados, confirmado por Guevara et al., (2018), quienes concluyeron que *O. basilicum* puede emplearse como planta hiperacumuladora de Cu y Mn en la descontaminación de suelos con estos metales pesados, logrando resultados en un período más corto en comparación con otras plantas utilizadas para el mismo fin. Sin embargo, se recomienda no usar la albahaca contaminada para consumo alimenticio debido a los potenciales riesgos para la salud. Además, se sugiere realizar análisis de metales pesados en el suelo donde se cultiva esta planta para su aprovechamiento, debido a su potencial para la absorción de metales del suelo.

En general, tanto *S. nigrum* como *O. basilicum* tienen la capacidad de remover cantidades considerables de cadmio del suelo, translocándolo y acumulándolo principalmente en la

parte aérea. Esta capacidad incrementa a medida que la concentración de cadmio en el suelo aumenta. No obstante, las medidas de tendencia central y dispersión reflejan una alta variabilidad entre grupos, especialmente a altas concentraciones de cadmio.

Análisis inferencial

Para analizar si existen diferencias significativas en los niveles de cadmio entre los diferentes tratamientos aplicados a las especies vegetales *S. nigrum* y *O. basilicum*, se llevó a cabo un Análisis de Varianza ANOVA (Tabla 3.4), seguido de un test de Dunn (Tabla 3.5) para evaluar diferencias específicas entre los tratamientos administrados y su impacto en cada una de las partes de la planta: suelo, raíz y parte aérea.

Tabla 3.4. Análisis de Variabilidad ANOVA.

Parte	S. nigrum	O. basilicum
Suelo	0,16	0,12
Raíz	0,01	0,01
Parte aérea	0,18	0,06

Tabla 3.5. Resultados del test de Dunn.

Tratamiento	*S. nigrum*			*O. basilicum*		
Parte	**T0-T1**	**T0-T2**	**T1-T2**	**T0-T1**	**T0-T2**	**T1-T2**
Suelo	0,02	0,00	0,60	0,31	0,03	0,24
Raíz	0,13	0,06	0,60	0,34	0,07	0,39
Parte aérea	0,02	0,04	0,91	0,01	0,00	0,63

Según los resultados del Análisis de Varianza ANOVA presentados en la Tabla 3.4, los p-valores mostraron diferencias significativas en las concentraciones de cadmio en las raíces para ambas especies ($p < 0,05$), indicando que los tratamientos tuvieron un impacto estadísticamente diferente en la acumulación de cadmio en esta parte de la planta. Para el suelo y la parte aérea, los p-valores fueron mayores (0,16 y 0,18 para *S. nigrum*, y 0.12 y 0,06 para *O. basilicum*, respectivamente), lo que permite concluir que no hay diferencias significativas en estas partes debido a los tratamientos, excepto en la parte aérea de *O. basilicum,* donde el p-valor es cercano al umbral de 0,05.

De acuerdo con los resultados del test de Dunn presentados en la Tabla 3.5, existe diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de cadmio de la parte aérea de ambas especies, (p-valor < 0,05), indicando gran variabilidad en la acumulación de cadmio entre el tratamiento de control y los tratamientos con concentraciones de cadmio. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos T1 y T2 (p-valor > 0,05), lo que destaca la capacidad de *O. basilicum* para acumular cadmio en respuesta a un aumento en la concentración del metal en el ambiente.

En cuanto a las raíces, ninguna de las comparaciones entre tratamientos para ambas especies alcanzó significancia estadística (p-valor < 0,05) según el test de Dunn, lo que sugiere que, a pesar de que el Análisis de Varianza ANOVA mostró diferencias globales de los tratamientos, las diferencias entre los individuos de cada tratamiento no fueron significativas.

Ramírez et al. (2018) mencionan que la acumulación de cadmio en los tejidos de *S. nigrum*, aumenta significativamente (p < 0,05) con la concentración de cadmio aplicada, lo cual se alinea con los resultados obtenidos, ya que, los tratamientos 1 y 2 mostraron un aumento en la acumulación de cadmio en comparación con el control en la parte aérea, no obstante, este efecto no escaló significativamente entre T1 y T2, lo que podría sugerir un límite en la capacidad de bioacumulación de cadmio a ciertas concentraciones en estas plantas.

3.4 Factores de bioconcetración y de traslocación

S. nigrum

Las Figura 3.3 y 3.4, muestran los factores de bioconcentración de la parte aérea (FBC) y en la raíz (FBR), y el factor de traslocación de la especie *S. nigrum*, respectivamente.

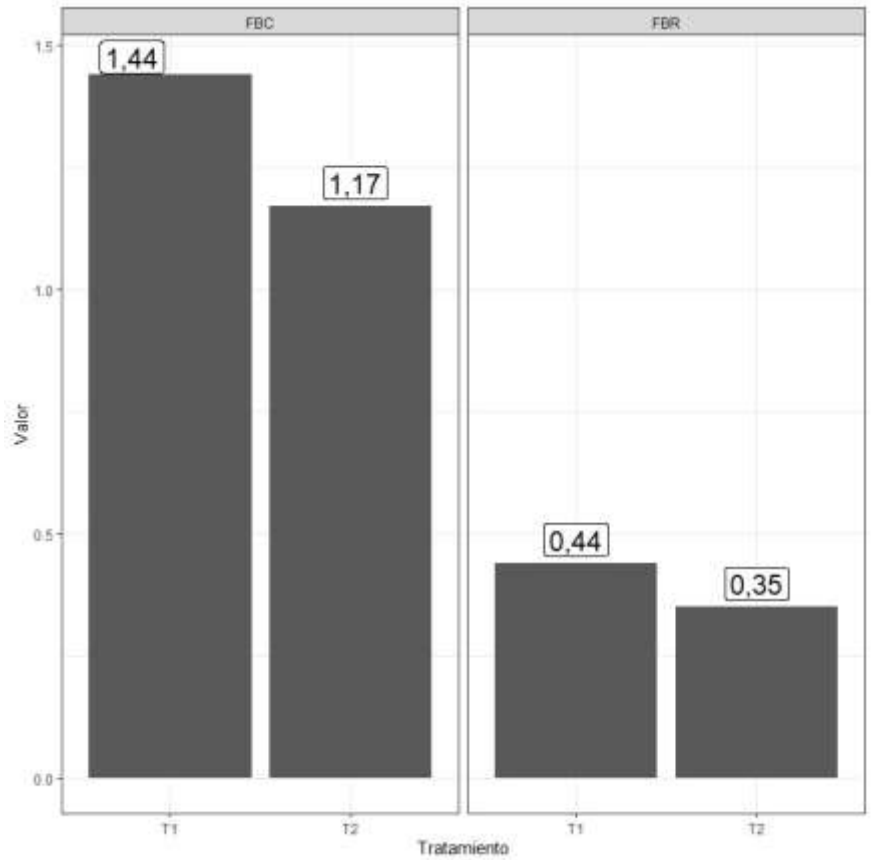

Figura 3.3. Factores de bioconcentración aérea (FBC) y radicular (FBR) de *S. nigrum*.

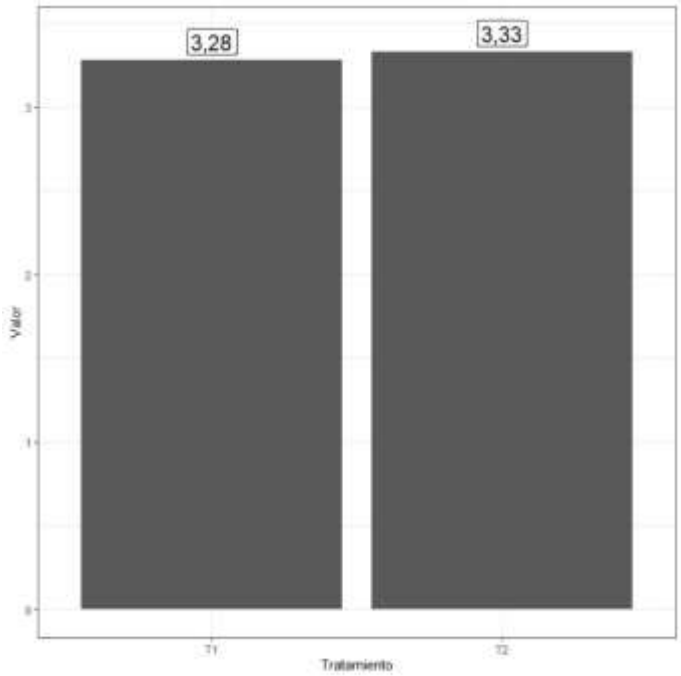

Figura 3.4. Factor de traslocación (FT) de *S. nigrum*.

Los FBC y FBR para la especie *S. nigrum*, en ambos tratamientos son mayores a 1 (1,44 en el T1 y 1,17 en el T2), lo que significa que la especie es hiperacumuladora de cadmio. Esto indica que la planta tiene una capacidad notable para acumular cadmio en su parte aérea en comparación con la concentración en el suelo. No obstante, los valores del FBR para ambos tratamientos son menores que 1 (0,44 y 0,35, para T1 y T2, respectivamente), sugiriendo que *S. nigrum* tiende a excluir el cadmio de sus raíces. Además, los valores del FT son significativamente mayores que 1 (3,28 para T1 y 3,33 para T2), lo que demuestra una alta eficiencia de la planta en la traslocación del cadmio desde las raíces hacia la parte aérea, facilitando su uso en estrategias de fitoacumulación.

Posiblemente, el comportamiento hiperacumulador que expresó la *S. nigrum*, podría estar relacionado con la presencia de macro y micronutrientes en el suelo. Se ha demostrado que, independientemente del mecanismo adaptativo utilizado por la planta para tolerar el exceso de cadmio en el suelo, este metal entra en la planta a través del simplasto mediante los transportadores de elementos esenciales como Fe^{2+}, Zn^{2+} y Ca^{2+}, los cuales facilitan el transporte de metales pesados desde las raíces hacia toda la planta. Por lo tanto, el contenido de Zn y Fe en el suelo, descrito en la Tabla 2.1, (282 mg Zn/kg y 2,28% CaO), probablemente facilitó la entrada de cadmio en la planta, permitiendo que *S. nigrum* acumulara una mayor cantidad de este metal en sus hojas. Esto se debe a que el Zn tiende a formar enlaces muy estables con el cadmio, facilitando su ingreso conjunto a la planta (Vesga, 2022)

O. basilicum

Las Figura 3.5 y 3.6 muestran los factores de bioconcentración de la parte aérea (FBC) y en la raíz (FBR), y el factor de traslocación de la especie *O. basilicum*, respectivamente.

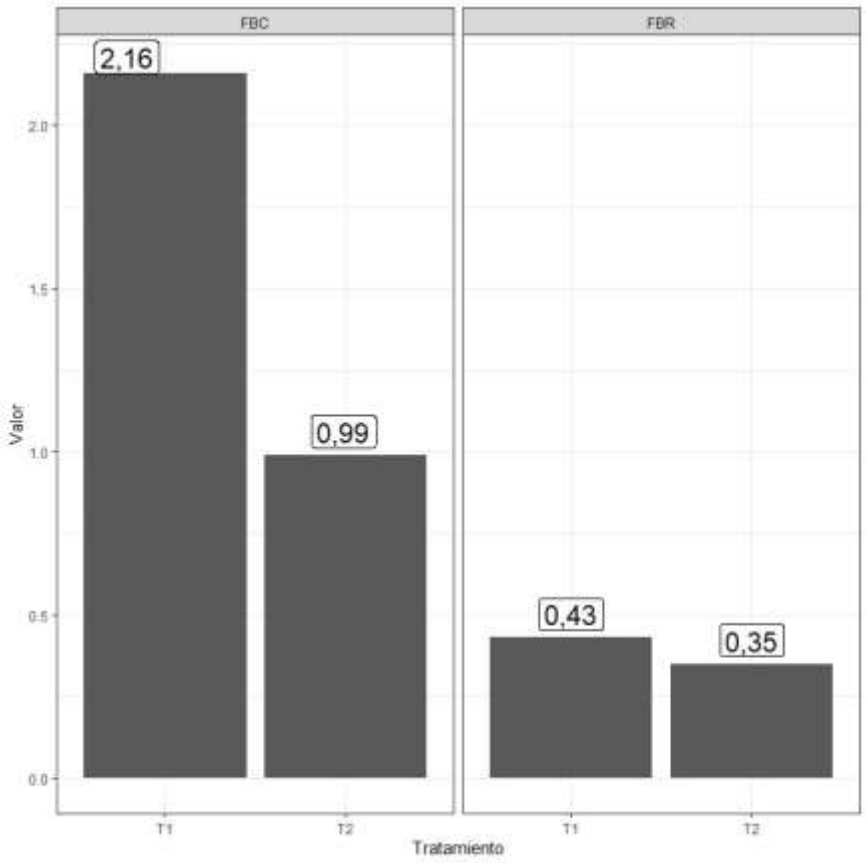

Figura 3.5 Factores de bioconcentración aérea (FBC) y radicular (FBR) de *O. basilicum*.

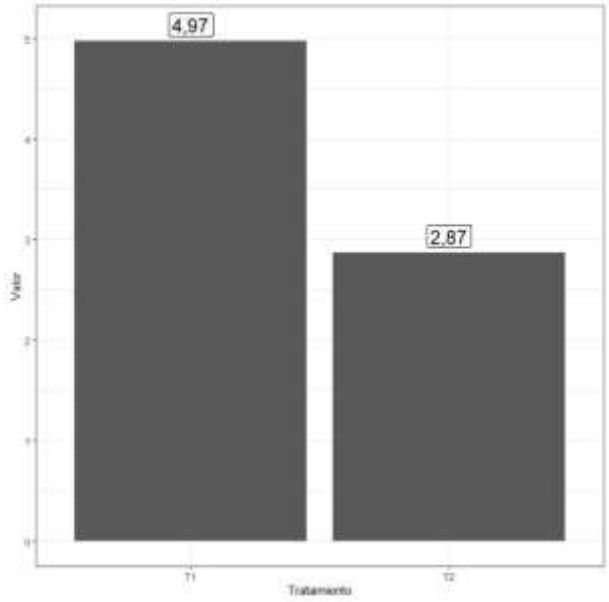

Figura 3.6. Factor de traslocación (FT) de *O. basilicum.*

En el caso de *O. basilicum*, los resultados varían notablemente entre los tratamientos. En el T1, el FBC es extremadamente alto (2,16), clasificándola como hiperacumuladora, y señalando una efectividad sobresaliente en acumular cadmio en la parte aérea, mientras que, el FBC del T2 es justo por debajo de 1 (0,99), lo que pone a la planta en el límite entre ser considerada hiperacumuladora y no serlo en concentraciones superiores a 25 mg Cd/kg. No obstante, los valores del FBR para ambos tratamientos son menores que 1 (0,43 y 0,35 para T1 y T2, respectivamente), lo que indica una tendencia a limitar la acumulación de cadmio en las raíces. Por otro lado, los valores del FT para ambos tratamientos son excepcionalmente altos (4,97 para T1 y 2,87 para T2), sugiriendo una capacidad extraordinaria para translocar cadmio a las partes aéreas, similar a *S. nigrum*.

Este hallazgo se corrobora con los de Alamo & Feng, (2017), quienes concluyeron que los altos factores de bioconcentración y translocación sugieren que consumir “albahaca” de suelos contaminados con cadmio en bajas concentraciones aumenta la exposición a este metal. Por tanto, la evaluación del movimiento del metal hacia las plantas comestibles es importante, especialmente si se van a consumir las hojas, flores o frutos.

Aunque, *S. nigrum* y *O. basilicum* muestran características prometedoras para la remediación de suelos contaminados con cadmio, su eficacia puede variar significativamente dependiendo de las condiciones específicas del tratamiento. Sin embargo, *O. basilicum* destaca, especialmente en concentraciones bajas con un FT excepcionalmente alto de 4,97, demostrando su capacidad notoria para trasladar cadmio hacia la parte aérea, un atributo valioso para la fitoextracción efectiva. Mientras que, para concentraciones más altas de cadmio en el suelo, una respuesta más consistente la demostró *S. nigrum*.

Por otro lado, si se contrasta los valores de los factores de bioconcetración y de traslocación de cadmio de *O. basilicum*, con los del *Helianthus annuus* (girasol) que tiene un promedio de 1,69 y 0,62, respectivamente, cuando las concentraciones en el suelo fluctúan entre los 10 y 25 mg Cd/kg, se puede evidenciar que *O. basilicum* es una planta que podría tener mayor éxito en los procesos de remediación de suelos contaminados con cadmio, ya que el girasol presenta un comportamiento de fitoestabilización o no fitoextracción (Munive et al., 2019).

3.5 Conclusiones

- El suelo agrícola utilizado en la investigación de fitorremediación presenta condiciones aparentemente desfavorables para la asimilación del cadmio por las plantas, debido al alto contenido de materia orgánica (46%), pH fuera del rango en que el cadmio está disponible (entre 4 y 5) y una alta capacidad de intercambio catiónico (100 meq/100 g), factores que contribuyen a la retención del metal en el suelo, reduciendo su disponibilidad para las plantas. No obstante, las características físicas del suelo y la abundancia de nutrientes pudieron facilitar la traslocación del cadmio hacia las partes aéreas de las plantas.

- En la investigación de fitorremediación, se evaluaron las especies *S. nigrum* (Hierba mora) y *O. basilicum* (Albahaca), se establecieron 3 tratamientos basados en las concentraciones de cadmio agregados al sustrato: T0 (0 mg Cd/kg), T1 (10 mg Cd/kg) y T2 (25 mg Cd/kg). Cada tratamiento incluyó tres réplicas y en cada una, se cuantificó cadmio en la parte aérea, raíz y suelo, resultando en un total de 54 muestras. Los resultados de las concentraciones de cadmio indicaron que tanto *S. nigrum* como *O. basilicum* son capaces de acumular cantidades significativas de cadmio, principalmente en la parte aérea. Esta capacidad se incrementa con el aumento de la concentración de cadmio en el sustrato, no obstante, las medidas de tendencia central y dispersión reflejan una alta variabilidad entre grupos, especialmente a altas concentraciones de cadmio.

- Durante la simulación de contaminación con cadmio en *S. nigrum* por 10 semanas, se observaron diferencias significativas en el crecimiento y la respuesta fisiológica entre los tratamientos. Las plantas de control mostraron un crecimiento semanal de 10 y 12 cm. Mientras que, las sometidas al tratamiento 1 crecieron entre 8 y 10 cm y las del tratamiento 2 solo entre 4 y 7 cm. A pesar de la reducción en el crecimiento, no se observó clorosis foliar en ningún tratamiento, lo que indica una alta resistencia de la especie al cadmio. Además, las plantas del T1 exhibieron un aumento de vigor a partir de la sexta semana, mientras que, las plantas del T2 mostraron leves signos de agotamiento.

- Durante la simulación de contaminación con cadmio en *O. basilicum* por 10 semanas, se observó que las plantas de control crecieron entre 6 y 8 cm semanalmente. Sin embargo, una planta del control exhibió necrosis y perdió parte del tallo. Las plantas en el T1 y T2 crecieron a tasas de 5 y 7 cm y de 4 y 6 cm por semana, respectivamente. A partir de la semana 7, las plantas en T2 comenzaron a mostrar clorosis foliar y las

semanas 9 y 10, todas las plantas experimentaron clorosis, por lo que no se puede asociar este efecto únicamente al cadmio, lo que sugiere insuficiencia de nutrientes y estrés hídrico como factores coadyuvantes.

- El análisis para la especie *S. nigrum* revela una significativa bioacumulación de cadmio, especialmente en la parte aérea, con concentraciones que alcanzaron hasta los 720 mg Cd/kg en T2, y los 234 mg Cd/kg en T1. Las plantas de control (T0) mostraron concentraciones mínimas respecto a los otros tratamientos, lo que puede atribuirse a contaminación cruzada en el sitio experimental o la contaminación analítica en el proceso de cuantificación de cadmio.

- La especie *O. basilicum* mostró una variable capacidad de acumulación de cadmio según el tratamiento. En el T0, las concentraciones de cadmio son mínimas y constantes, por lo que se atribuye a la contaminación cruzada o analítica, mientras que, en el T1 y T2 se registraron incrementos significativos en suelo, raíz y parte aérea. Las concentraciones más altas se observan en la parte aérea, especialmente en T2, donde se alcanzan hasta 602 mg Cd/kg y en T1 con 298 mg Cd/kg, indicando una alta capacidad de acumulación.

- El Análisis de Varianza ANOVA para *S. nigrum* revela diferencias significativas en la acumulación de cadmio en las raíces entre los tratamientos, con p-valores menores 0,05, mientras que, en el suelo y la parte aérea, las diferencias no fueron significantemente diferentes. El test de Dunn confirma diferencias significativas entre el tratamiento de control (T0) y los tratamientos con cadmio (T1 y T2) en la parte aérea. Esto sugiere que *S. nigrum* responde de manera notable a la contaminación con cadmio en sus raíces y parte aérea, aunque su capacidad de acumulación no varía significativamente entre las concentraciones de 10 mg Cd/kg y 25 mg Cd/kg.

- El Análisis de Varianza ANOVA para *O. basilicum* muestra diferencias significativas en la acumulación de cadmio tanto en las raíces como en la parte aérea, con con p-valores menores 0,05, en ambos casos. El test de Dunn también señala diferencias significativas entre el control (T0) y los tratamientos (T1 y T2) en la parte aérea, lo que enfatiza la alta capacidad de *O. basilicum* para acumular cadmio a concentraciones elevadas. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre T1 y T2, lo que sugiere que la capacidad de acumulación de cadmio en *O. basilicum* se maximiza en niveles altos de contaminación, aunque con alta variabilidad en la respuesta entre los tratamientos.

- La investigación demostró que *S. nigrum* es efectiva en la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio, destacándose como una especie hiperacumuladora, al exhibir altos valores en los factores de bioconcentración (FBC) y traslocación (FT), que indican su potencial para acumular cadmio, principalmente en la parte aérea. Los valores del factor de bioacumulación radicular (FBR) fueron menores que 1, esto sugiere que la planta tiende a excluir el cadmio de sus raíces. Estos resultados resaltan el potencial de *S. nigrum* para ser utilizada en estrategias de fitoextracción de cadmio.

- La especie *O. basilicum* demostró su notable capacidad hiperacumuladora de cadmio, especialmente en concentraciones menores 25 mg Cd/kg, con un factor de bioconcentración (FBC) extremadamente alto y un factor de traslocación (FT) sobresaliente (mayores a 1) en el T1. Aunque en el T2 el FBC disminuye, la capacidad de traslocación del cadmio hacia la parte aérea sigue siendo alta. Los valores bajos del factor de bioacumulación radicular (FBR) (menor a 1), indican que la planta excluye la acumulación de cadmio en las raíces, lo cual sugiere una excelente capacidad de fitoextracción, particularmente efectiva en bajas concentraciones de cadmio en el suelo.

- Tanto *S. nigrum* como *O. basilicum* demuestran potencial para la remediación de suelos contaminados con cadmio, mostrando eficiencia en la hiperacumulación y en la translocación del metal a la parte aérea. Sin embargo, *O. basilicum* se destaca en condiciones de baja contaminación debido a su FT excepcionalmente alto (4,97), haciéndola particularmente efectivo para la fitoextracción en dichas condiciones. Por otro lado, *S. nigrum* mantiene una respuesta consistente en la acumulación de cadmio, tanto en concentraciones bajas como altas en el suelo, con una tendencia predominante a acumular el metal en la parte aérea de la planta, lo que la convierte en una opción robusta para suelos con mayor nivel de contaminación.

3.6 Recomendaciones

- Para mejorar la eficiencia en la fitoacumulación de cadmio utilizando *S. nigrum*, se exhorta investigar métodos que optimicen el crecimiento de la planta en condiciones de alta contaminación (mayores a 25 mg Cd/kg). Aunque *S. nigrum* tiene la capacidad de acumular grandes cantidades de cadmio, el agotamiento observado en la aplicación de concentraciones altas y en periodos prolongados, indica la necesidad alargar su ciclo de vida en estas condiciones con el fin de evitar que el contaminante regrese al suelo rápidamente. Estas estrategias podrían incluir el ajuste de nutrientes, el control de factores de estrés ambiental, el uso de técnicas como la micorrización o la aplicación de bioestimulantes (Alvarado et al., 2011).

- Para maximizar la capacidad de fitoextracción de *O. basilicum* en suelos con baja a moderada concentración de cadmio, se recomienda explorar prácticas agronómicas específicas que potencien esta habilidad. Para esto es esencial investigar el impacto del estrés hídrico, la influencia de los nutrientes en la acumulación de cadmio y en el crecimiento de la planta, con el fin de disminuir la variabilidad de la respuesta de la especie. La investigación se debe realizar con un riguroso monitoreo de la especie, ya que la ingesta de las hojas de la "albahaca" con el metal, incrementa su exposición y podría generar efectos adversos en la salud.

- Llevar a cabo investigaciones adicionales para entender mejor la interacción entre el contenido de nutrientes en el suelo y la capacidad de acumulación de cadmio de *S. nigrum* y *O. basilicum*, mediante un diseño experimental que refleje el incremento progresivo de las concentraciones de cadmio y su interacción con los nutrientes del suelo (zinc y hierro), ya que estos pueden competir con el cadmio por los mecanismos de absorción en las raíces. Además, es aconsejable usar más de 3 réplicas por tratamiento para reducir la incertidumbre y obtener datos más consistentes y confiables.

- Dado que las especies vegetales han demostrado ser un hiperacumuladoras eficientes con altos factores de bioconcentración en la parte aérea y un elevado factor de traslocación, es crucial considerar su aplicación en sitios contaminados con cadmio, junto a otras especies hiperacumuladoras, para evaluar su competitividad y la variabilidad en la acumulación de cadmio en diferentes concentraciones.

- Después de finalizar el proceso de extracción de cadmio mediante fitoextracción, es recomendable aprovechar la biomasa residual para la creación de productos sostenibles como textiles, papel, o ladrillos ecológicos. Esta práctica no solo ayuda a evitar problemas de contaminación, sino que también fomenta un modelo de economía circular, al reutilizar los residuos del proceso de fitorremediación. Además, es esencial realizar análisis de recuperación de metales para evaluar la eficacia del proceso de extracción y determinar la viabilidad de reciclar los metales extraídos (Sánchez et al., 2019).

- Es imperativo comparar la eficacia de *S. nigrum* y *O. basilicum* con otras especies de plantas en términos de factores de bioconcentración y traslocación. Este análisis ayudará a identificar alternativas o estrategias complementarias eficaces para la remediación de suelos contaminados con cadmio, optimizando los enfoques de fitorremediación y ampliando el repertorio de especies útiles para estos fines.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alamo, L., & Feng, Y. (2017). Translocation of cadmium in Ocimum basilicum at low concentration of CdSSe nanoparticles. Applied Materials Today, 9, 314–318. https://doi.org/10.1016/J.APMT.2017.08.014

Alvarado, C., Dasguipta, N., Ambriz, E., Sánchez Juan, & Villegas, J. (2011). Hongos micorrícicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 27.

Biofertil. (2024). Ficha técnica biofértil.

Bravo, I., Arboleda, C., & Martín, F. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. SciELO. http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v63n2/v63n2a09.pdf

Canchignia, F., Auhing, J., Cedeño, Á., Carrillo, M., & Bravo, D. (2021). Mitigación de cadmio por micrrorganismos. Caja de Herramientas Para La Prevención y Mitigación de La Contaminación de Cadmio En La Cadena de Cacao-Ecuador, 1, 1–32.

Cárdenas, A., Lizarazo, C. R. G., Castillo, O., & Quiroz, J. D. C. (2023). Una revisión bibliográfica de los compuestos no volátiles, y sus propiedades funcionales, de Ocinum Basilicum L., Albahaca. Revista Boliviana de Química, 40(1), 1–7.

Farías, C., Cisternas, C., Morales, G., Muñoz, L., & Valenzuela, R. (2022). Albahaca: Composición química y sus beneficios en salud. Revista Chilena de Nutrición, 49(4), 502–512.

Gallego, C. (2017). Fitorremediación en un suelo salino afectado por contaminación con cadmio en el agua de riego. http://dspace.umh.es/handle/11000/4290

Guevara, D., Cruz, N., Rivera, C., & Fuentes, A. (2018). Fitorremediación de suelos contaminados con Mn y Cu a partir de Ocimum basilicum. Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias , 76–89.

Hernández, Y., Rodríguez, P., Peña, M., Meriño, Y., & Cartaya, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 40.

López, O. D., & Albán, E. N. (2023). Evaluación de la actividad antifúngica de un extracto alcohólico de hierba mora (Solanum nigrum) frente a oídio (Oidium sp.) y fusarium

(Fusarium sp.) [Univesidad Técnica de Ambato]. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/37879

Lykas, C., Zografou, M., & Kazi, M. (2022). Cadmium, Nickel, Chromium, and Lead Accumulation in Roots, Shoots, and Leaves of Basil Plants (Ocinum Basilicum L.). Seventh Sense Research Group, 9(2).

Marchive, L., López, M., Chávez, E., & Atkinston, R. (2021). Guía 3: Factores que influyen en la biodisponibilidad de cadmio en suelo y su acumulación por la planta. Caja de Herramientas Para La Prevención y Mitigación de La Contaminación de Cadmio En La Cadena de Cacao-Ecuador, 1a, 1–24.

Munive, R., Gamarra, G., Munive, Y., Puertas, F., Valdivieso, L., & Cabello, R. (2019). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. 40.

Núñez, A., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias, 69–83. https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/fitorremediacion-fundamentos-y-aplicaciones

Paredes, M. N., & Sifuentes, M. G. (2024). Fitorremediación de plomo y cadmio presentes en suelos contaminados por relaves mineros mediante Allium fistulosum L. (Cebolla China). Universidad Nacional de Trujillo. Fondo Editorial. https://hdl.handle.net/20.500.14414/20989

Peña, K., Carrillo, M., Durango, W., Orozco, P., & Peña, A. (2021). GUÍA 13 MITIGACIÓN DE CADMIO POR FITORREMEDIACIÓN. Ministerio de Agricultura y Ganadería. https://balcon.

Ramírez, R., Giraldo, D., & Barrera, D. (2018). Fitoextracción de cadmio con hierba mora (Solanum nigrum L.) en suelos cultivados con cacao (Theobroma cacao L.). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. https://www.redalyc.org/journal/1699/169959152006/html/

Raskin, I., Smith, R. D., & Salt, D. E. (1997). Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. Current Opinion in Biotechnology, 8(2), 221–226. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80106-1

Rivera, P., Castro, B., & Garza, F. (2009). Clorosis férrica en cítricos y fertilización foliar. SciELO, 27. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000100002

Sánchez, E., Leal, I. M., Fuentes, L., & Rodríguez, C. A. (2000). Estudio farmacognóstico de ocimum basilicum l. (albahaca blanca). Revista Cubana de Farmacia, 34(3), 187–195.

Sánchez, R., Pita, D., Gonzales, K., & Hormaza, J. (2019). Análisis de mezclas de residuos sólidos orgánicos empleadas en la fabricación de ladrillos ecológicos no estructurales. Revista de Ciencias Ambientales. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962019000100023

Sierra, A., Sanchez, T., Simonne, E., & Treadwell, D. (2020). Principios y prácticas para el manejo de nutrientes en la producción de hortalizas. IFAS Extension University of Florida. https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS356

Subašić, M., Šamec, D., Selović, A., & Karalija, E. (2022). Phytoremediation of Cadmium Polluted Soils: Current Status and Approaches for Enhancing. Soil Systems 2022, , 6(1), 3. https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS6010003

Vesga, J. (2022). El uso de Cannabis sativa como especie fitorremediadora de cadmio: una alternativa para revivir el suelo. Caso de estudio finca La Chuqua, Guasca - Cundinamarca. https://hdl.handle.net/20.500.12495/9430

Yao, S., Zhou, B., Duan, M., Cao, T., Wen, Z., Chen, X., Wang, H., Wang, M., Cheng, W., Zhu, H., Yang, Q., & Li, Y. (2023). Combination of Biochar and Trichoderma harzianum Can Improve the Phytoremediation Efficiency of Brassica juncea and the Rhizosphere Micro-Ecology in Cadmium and Arsenic Contaminated Soil. Plants, 12(16), 2939. https://doi.org/10.3390/PLANTS12162939/S1

Zúñiga, P. (2020). Fitorremediación de suelo agrícola contaminado con cadmio con la especie Eichhornia crassipes (Mart.) Solms, en la cuenca baja del río Guayas. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil. http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48750

ANEXO I

ANEXO I. RESULTADOS DE ANÁLISIS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE CHISPA.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

Solicitante : Karen Córdova

No. Referencia : RM – 10942

Fecha : 19/07/2024

Muestras recibidas : 51 muestras de digestión ácida de suelos plantas y raíces

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300. A continuación, los resultados obtenidos:

Muestras	Cadmio (mg/L)	Muestras	Cadmio (mg/L)
A-T0-1R	0,03	A-T1-1R	0,22
A-T0-2R	0,01	A-T1-2R	0,24
A-T0-3R	0,01	A-T1-3R	0,14
A-T0-1P	0,01	A-T1-1P	1,49
A-T0-2P	0,01	A-T1-2P	0,92
A-T0-3P	0,01	A-T1-3P	0,57
SHM-T0-1	0,01	SHM-T1-1	0,21
SHM-T0-2	0,01	SHM-T1-2	1,08
SHM-T0-3	0,01	SHM-T1-3	0,94
A-T0-1	0,02	A-T1-1	0,86
A-T0-2	0,02	A-T1-2	0,21
A-T0-3	0,02	A-T1-3	0,31
HM-T0-1R	0,01	HM-T1-1R	0,35
HM-T0-2R	0,01	HM-T1-2R	0,47
HM-T0-3R	0,01	HM-T1-3R	0,16
HM-T0-1P	0,02	HM-T1-1P	1,17
HM-T0-2P	0,01	HM-T1-2P	1,14
HM-T0-3P	0,02	HM-T1-3P	0,90

Pasaje Andalucía 134 E12A y Mena Caamaño – Teléfono (593-2) 2976300 ext. 5806 – Casilla 17-01-2759
Quito-Ecuador

Muestras	Cadmio (mg/L)	Muestras	Cadmio (mg/L)
A-T2-1R	0,92	A-T2-1	0,42
A-T2-2R	0,51	A-T2-2	1,50
A-T2-3R	0,41	A-T2-3	3,40
A-T2-1P	3,01	HM-T2-1R	0,49
A-T2-2P	0,95	HM-T2-3R	0,72
A-T2-3P	1,32	HM-T2-1P	3,60
SHM-T2-1	0,92	HM-T2-3P	0,43
SHM-T2-2	3,51		
SHM-T2-3	0,75		

Límite de detección: Cadmio (Cd)= 0,01 mg/L

ALICIA DEL CARMEN GUEVARA CAIQUETAN

Ing. Alicia Guevara C. PhD.
Jefe de Departamento (s)

EVELYN PAMELA CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorio