

EVALUACIÓN DE ARVENSES COMO FITORREMEDIADORAS DE SUELOS CACAOTEROS CONTAMINADOS CON CADMIO

Evaluation of herbaceous plants as phytoremediators of cocoa soils contaminated with cadmium

Manuel Danilo CARRILLO ZENTENO^{1,2}, Merley Patricia OROSCO MALDONADO³,
Ana Karen PEÑA JORDAN³, Luz María MARTÍNEZ BUÑAY³,
Karina Elizabeth PEÑA SALAZAR¹ y Yelitza GARCÍA-ORELLANA^{1,4*}

¹ Estación Experimental Tropical Pichilingue. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Mocache, Los Ríos, Ecuador. Código postal: 170518.

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo, km 1 ½ vía Quevedo-Santo Domingo de los Tsáchilas, Quevedo, Los Ríos, Ecuador. Código postal: 120301.

³ Universidad UTE. Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias. Carrera de Ingeniería Ambiental y Manejo de Riesgos Naturales, km 4½ de la Vía Chone y Av. Italia, Santo Domingo, Ecuador. Código postal: 17.24.231.

⁴ Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”. Decanato de Agronomía. Barquisimeto, Venezuela. Código postal: 3001.

*Autora para correspondencia: yelitzagarcia@ucla.edu.ve

(Recibido: octubre 2023; aceptado: marzo 2024)

Palabras clave: mitigación, fitoextracción, extracción, fitorremediación, metales pesados.

RESUMEN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los rubros más importantes del Ecuador, pero la presencia de metales pesados en los suelos genera inquietud, siendo el cadmio (Cd) uno de los contaminantes más preocupantes y su presencia en la almendra se ha convertido en una limitante para su exportación. El objetivo de este trabajo fue conocer la capacidad de plantas arvenses para extraer Cd, por ello se evaluaron nueve especies en un suelo arenoso-franco con 2.4 % de MO y pH de 6.2, contaminado con 3 mg/kg de Cd. Las variables evaluadas fueron materia seca, pH del suelo y rizósfera; concentración y contenido de Cd; y factor de traslocación. Las especies arvenses que presentaron gran adaptabilidad y que absorbieron cantidades importantes de Cd fueron *Pseudelephantopus spiralis*, *Oplismenus burmannii*, *Geophila macropoda* e *Ipomoea grandifolia*, mientras que *Commelina difusa*, *Pseudelephantopus spiralis*, *Cissus verticillata* y *Epipremnum aureum*; todas funcionaron como estabilizadoras del metal, lo que indica que pueden ser consideradas como plantas hiperacumuladoras de Cd facilitando su remoción del suelo de manera segura.

Key words: Mitigation, phytoextraction, extraction, heavy metals, phytoremediation.

ABSTRACT

The cultivation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) is one of the most important crops in Ecuador. However, the presence of heavy metals in the soil is of concern, with cadmium (Cd) being one of the most worrisome contaminants, and its presence in the kernel has become a limiting factor for export. This work aimed to determine the

capacity of arboreal plants to extract Cd. Therefore, nine species were evaluated in sandy-frank soil with 2.4 % MO and a pH of 6.2, contaminated with 3 mg/kg of Cd. The variables evaluated were dry matter, soil and rhizosphere pH, Cd concentration and content, and translocation factor. The weed species that showed high adaptability and absorbed significant amounts of Cd were *Pseudelephantopus spiralis*, *Oplismenus burmannii*, *Geophila macropoda*, and *Ipomoea grandifolia*. In contrast, *Commelina diffusa*, *Pseudelephantopus spiralis*, *Cissus verticillata*, *Epipomoea verticillata*, and *Epipremnum aureum* functioned as metal stabilizers, indicating that they can be considered as hyperaccumulators of Cd, facilitating its safe removal from the soil.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en la actualidad ha cobrado gran importancia en las exportaciones no petroleras del Ecuador debido a su significativo aporte al Producto Interno Bruto (García-Briones et al. 2021, Porras et al. 2022), además es el principal productor de la Denominación de Origen Cacao Arriba (Quinta y Aguilar 2018). Sin embargo, las exportaciones están siendo afectadas por las restricciones emitidas por la Unión Europea (UE) que estableció, a partir del 1 de enero de 2019, un umbral de 0.10 y 0.80 mg Cd/kg materia seca, dependiendo del porcentaje de cacao crudo en chocolate (EU 2014).

Estas restricciones son consecuencia de la preocupación de los consumidores de chocolate de todo el mundo, por los posibles efectos perjudiciales para la salud humana causadas por las altas concentraciones de cadmio (Cd) en los granos de cacao (Maddela et al. 2020, Chacay et al. 2022, Wilches-Ortiz et al. 2022). En América Latina los niveles de metales pesados en cacao en grano, especialmente Cd y plomo (Pb), son más elevados en comparación con los de África Occidental (Abt y Robin 2020).

El Cd se encuentra en los suelos de manera natural (Wen et al. 2020, Baraza et al. 2021, McLaughlin et al. 2021) y las plantas lo absorben fácilmente transportándolo a las partes comestibles, principal fuente de ingestión para los seres humanos (Reis et al. 2019, Haider et al. 2021, Zhou et al. 2023), por lo que se pueden acumular en el organismo y generar una serie de alteraciones (Fatima et al. 2019, Genchi et al. 2020, Niture et al. 2021).

Actualmente existe gran interés en desarrollar y aplicar técnicas rentables, amigables y respetuosas con el ambiente para tratar los suelos contaminados con Cd (Huaraca-Fernández et al. 2020, Qin et al. 2021).

Existen tres tipos de técnicas: a) de tipo biológico (biorremediación, fitorremediación, etc.), en donde las actividades metabólicas de ciertos organismos

permiten la degradación, transformación o remoción de los contaminantes a productos metabólicos ino-cuos (Hamid et al. 2019, Shen et al. 2022); b) físicos y químicos (electrorremediación, uso de enmiendas, lavado, solidificación/estabilización, etc.), que se basan en utilizar las propiedades físicas o químicas de los contaminantes para destruir, separar o contener el elemento contaminante (Baez et al. 2020, Aparicio et al. 2022); y c) térmicos (incineración, vitrificación, desadsorción térmica, etc.), que consisten en utilizar el calor para volatilizar, quemar o inmovilizar los contaminantes del suelo (Zhao et al. 2019, Loyde de la Cruz et al. 2022).

La mayoría de las técnicas que permiten reducir la contaminación por metales pesados son costosas y muchas veces no son amigables con el ambiente, pero la fitorremediación ha sido identificada como un método de remediación eficiente, rentable y respetuoso con el ambiente (Awa y Hadibarata 2020).

Existen diversas especies utilizadas para la fitoestabilización y la fitoextracción de Cd del suelo, entre las más estudiadas se encuentran *Solanum nigrum* L. (Al-Huqail 2023) y *Bidens pilosa* L. (Manori et al. 2021, Zhang et al. 2021).

Debido a la problemática descrita, se planteó como objetivo evaluar las características y cualidades fito-extractoras de nueve especies de plantas arvenses de reproducción asexual adaptadas al sistema de cultivo de cacao, colectadas en distintas zonas de Ecuador.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas (DMSA) de la Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP), del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Ubicado en el km 5 vía Quevedo - El Empalme, Cantón Mocache, Provincia de Los Ríos, Ecuador.

Obtención del material vegetal

Se seleccionaron nueve especies arvenses de reproducción asexual (**Cuadro I**), se colectaron en plantaciones cacaoteras (bajo sombra), procedentes de las provincias de Esmeraldas, Manabí, Los Ríos y El Oro.

CUADRO I. TAXONOMÍA DE PLANTAS ARVENSES EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN.

Orden	Familia	Especies
Commelinales	Commelinaceae	<i>Commelina difusa</i>
Asterales	Asteraceae	<i>Pseudelephantopus spiralis</i>
Vitales	Vitaceae	<i>Cissus verticillata</i>
Alismatales	Araceae	<i>Epipremnum aureum</i>
Poales	Poaceae	<i>Oplismenus burmannii</i>
Poales	Poaceae	<i>Paspalum conjugatum</i>
Gentianales	Rubiaceae	<i>Geophila macropoda</i>
Solanales	Convolvulaceae	<i>Ipomoea purpurea</i>
Solanales	Convolvulaceae	<i>Ipomoea grandifolia</i>

Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA), donde se trabajó con nueve tratamientos y tres repeticiones, obteniendo 27 unidades experimentales.

Para la preparación del ensayo se colectó un suelo arenoso de la provincia de Los Ríos, cuyas características se presentan en los **cuadros II** y **III**, secado a temperatura ambiente en invernadero y tamizado en malla de 2 mm. Posteriormente, el suelo se colocó en fundas plásticas con capacidad de 1 kg de suelo. Adicionalmente, a cada funda se agregaron 3 mg/L de Cd preparado a partir de una solución de CdCl₂ (1000 mg/L), y se mantuvieron a capacidad de campo durante treinta días, para lo cual se regaron

diariamente con agua ultra pura (procesada en un equipo AquaMax Ultra 370 Series).

Pasados 30 días, denominados como periodo de incubación, se homogeneizó el suelo y se dejó secar al ambiente sobre bolsas de papel, posteriormente se molió con la ayuda de una botella de vidrio y se pasó por un tamiz de 2 mm. Para los tratamientos se utilizaron macetas de plástico de 0.5 kg de capacidad, donde se colocaron 0.4 kg de suelo, humedeciendo hasta capacidad de campo (12 %).

El material vegetal se multiplicó en macetas de plástico, utilizando varetas de cada especie arvense colectada. Cuando las plántulas enraizaron, se retiraron de los recipientes para ser lavadas con agua desionizada; con la finalidad de conocer el peso inicial se utilizó una balanza de precisión.

Para finalizar, se realizó el trasplante a los envases plásticos que contenían el suelo contaminado, el cual fue fertilizado con fosfato monobásico de potasio (KH₂PO₄), en seis aplicaciones de 5 mL, a partir de los 25 días después del trasplante, para asegurar la obtención de materia seca y aportar nutrientes a las plantas. Durante todo el periodo experimental las plantas fueron regadas con agua desionizada bajo condiciones controladas en invernadero.

Variables evaluadas

Materia seca

Después de 75 días del trasplante se extrajeron las plantas de las macetas, retirando todas las partículas del suelo adheridas a las raíces y se lavaron con distintas soluciones, según se observa en la **figura 1**.

Luego del lavado, las plantas de cada tratamiento se colocaron en fundas de papel, previamente identificadas y fueron puestas en una estufa Memmert con circulación forzada de aire, regulada a 70 °C durante

CUADRO II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO EN EL QUE SE DESARROLLARON LAS PLANTAS ARVENSES.

Clase textural	pH	Materia orgánica dag/kg	Arena	Limo	Arcilla
			(%)		
Arenoso-Franco	6.2	2.9	84	12	4

CUADRO III. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO EN EL QUE SE DESARROLLARON LAS PLANTAS ARVENSES.

N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B
mg/kg		meq/100mL			mg/kg					
7	78	0.19	9	1.7	26	2.5	6.4	1.27	3.4	0.38

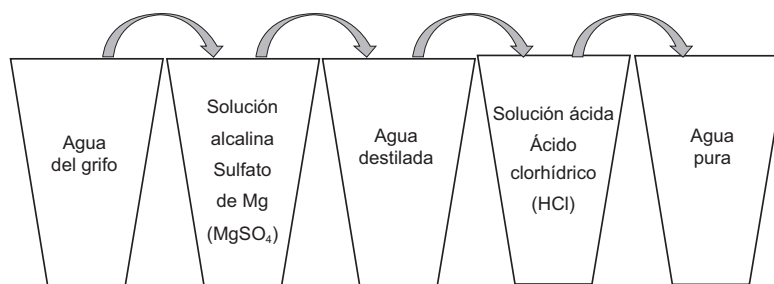


Fig. 1. Proceso de lavado de las plantas usando soluciones alcalinas y ácidas.

72 horas. Transcurrido este tiempo, se procedió a tomar el peso seco de las plantas.

pH del suelo y la rizósfera

En la cosecha se retiró el suelo contenido en cada tratamiento, asimismo se desprendió de las raíces la parte adherida con mayor fuerza, correspondiente a la rizósfera. Ésta se dejó secar y se almacenó en macetas de plástico etiquetadas para su posterior análisis. La determinación del pH del suelo y de la rizósfera de cada muestra, se hizo en una mezcla 1:2.5 de suelo y agua destilada. Cada muestra, correspondiente a una unidad experimental, se colocó en vasos de plástico de seis onzas, se agitó durante 30 segundos y se realizó la determinación con un potenciómetro LAQUAtwin B-712.

Concentración de cadmio

Para la extracción de Cd en las muestras de tejidos aéreo y radical (por separado), se empleó la metodología de mineralización nítrico-perclórica y cuantificación mediante absorción atómica a una longitud de onda de 228.8 nm, se trabajó con muestras de 0.5 g de las plantas en matraces Erlenmeyer de 50 mL, añadiendo 10 mL de la mezcla nítrico perclórica (HNO₃, 8 mL + HClO₄, 2 mL).

Contenido de cadmio

Se estableció el contenido de Cd en parte aérea y radical a partir de los resultados de producción de materia seca y concentración de Cd. El contenido total de Cd absorbido por las plantas en los 400 g de suelo se expresó en g/ha, considerando la densidad del suelo de 1.0 t/m³ a 0.20 m de profundidad.

Factor de traslocación

Esta variable permite conocer la eficiencia de las plantas en el transporte del Cd desde la raíz a la parte aérea, identificando la parte de mayor concentración del metal pesado (Ecuación 1). Este cálculo se realizó relacionando el contenido de Cd de la raíz (radical) con el Cd de la parte aérea.

$$FT = \frac{Cd \text{ aérea}}{Cd \text{ raíz}} \quad (1)$$

Donde:

Cd aérea: Contenido de cadmio en la parte aérea (mg/kg).

Cd radicular: Contenido de cadmio en la parte radical (mg/kg).

Análisis de los resultados

El análisis de los resultados se realizó mediante la prueba de Friedman, contraparte no paramétrica del análisis de varianza (Siegel y Castellan 1998) y los promedios se compararon mediante prueba múltiple por parejas de medias de rangos, usando el enfoque no paramétrico sugerido por Tukey ($p \leq 0.05 \%$); los datos fueron analizados usando el programa estadístico SPSS.

RESULTADOS

En el **cuadro IV** se puede apreciar el resultado de las pruebas de Friedman para cada una de las variables analizadas. Los datos permitieron constatar que realmente existen variaciones entre especies de arvenses cultivadas en suelo contaminado con Cd en relación con las variables estudiadas, por lo que ameritó realizar las pruebas de comparación múltiple por parejas de medias.

Materia seca

La especie *Cissus verticillata* tuvo el mayor valor de materia seca en la parte aérea (8.66 mg/vaso), comportamiento similar desde el punto de vista estadístico a *Commelina difusa*, *Epipremnum aureum*, *Pseudelephantopus spiralis*, *Paspalum conjugatum*, *Geophila macropoda* y *Oplismenus burmannii*. Los valores más bajos de materia seca se observaron en *Ipomoea grandifolia* con un valor de 1.33 mg/vaso (**Fig. 2**), siendo estadísticamente diferente de *Cissus verticillata*.

CUADRO IV. VALORES DESCRIPTIVOS Y ESTADÍSTICO DE FRIEDMAN PARA LAS VARIABLES EVALUADAS.

Variable	^(a) Estadístico de Friedman: χ^2	p – valor ^(b)
Materia seca parte aérea	22.844	0.0036
Materia seca parte radicular	22.400	0.0042
pH del suelo	20.224	0.0095
pH de la rizósfera	17.951	0.0216
Concentración de Cd parte aérea	22.578	0.004
Concentración de Cd parte radicular	23.378	0.003
Contenido de Cd parte aérea	19.289	0.0134
Contenido de Cd parte radicular	21.956	0.005
Contenido de Cd total	20.711	0.008
Factor de traslocación	22.133	0.0047

Nota: ^(a)Corregido por empates. ^(b)Aproximación a la Chi – cuadrada. N = 27; Especies = t = 9; Bloques = r = 3. Significativa si p valor < 0.05. $\chi^2_{0.05;8} = 15.507$

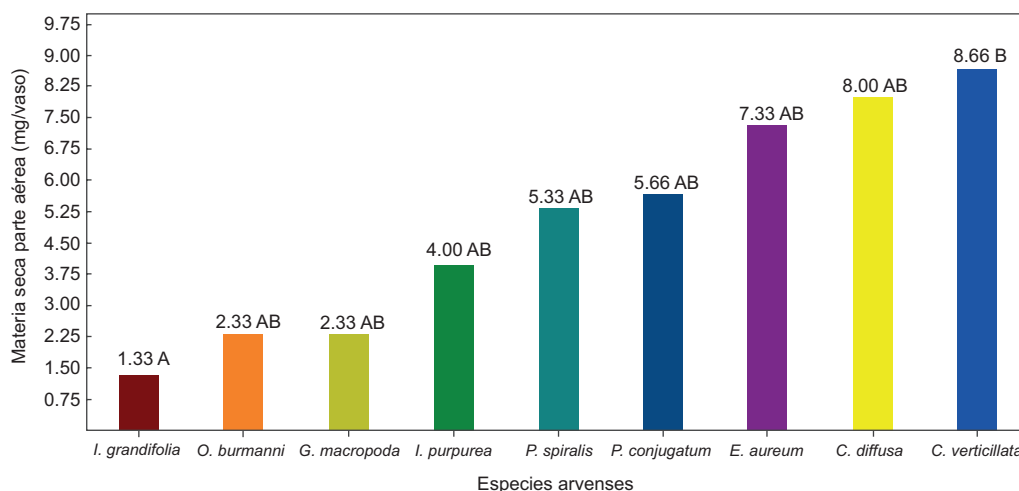


Fig. 2. Comparación de medias de rangos materia seca aérea con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05 \%$).

En cuanto a la materia seca radicular *Commelina diffusa* presentó la mayor producción (9.00 mg/maceta), mientras que *Ipomoea grandifolia* presentó el menor valor (1.33 mg/maceta), con una diferencia significativa respecto a las demás especies (**Fig. 3**).

Commelina diffusa tuvo el mayor peso de materia seca en la parte radical (**Fig. 2**) mientras que en la parte aérea (**Fig. 3**) *Cissus verticillata* presentó el valor más alto después de *C. diffusa*; por tanto, ésta presentó la mayor producción de materia seca por planta, es decir al sumar la parte aérea con la radical; en contraste, la especie con menor producción de materia seca fue *Ipomoea grandifolia*, tanto en la parte aérea como en la radical, con una diferencia significativa respecto a los demás tratamientos.

pH del suelo

El suelo donde se desarrolló la especie *Cissus verticillata* presentó el valor más alto de pH (7.13), mientras el suelo que albergó a la especie *Geophila macropoda* tuvo el más bajo (6.27). Al igual que en los suelos de los otros tratamientos, se podría sugerir que las especies seleccionadas en el estudio generan exudados que lo acidifican y provocan mayor absorción de Cd (**Fig. 4**).

pH de la rizósfera

En la **figura 5** se observa que los valores del pH de la rizósfera se encuentran ligeramente por debajo de los registrados en el suelo y al igual que en éste, el valor más alto se encontró en la rizósfera de la especie *Cissus verticillata* (7.00) y el más bajo se

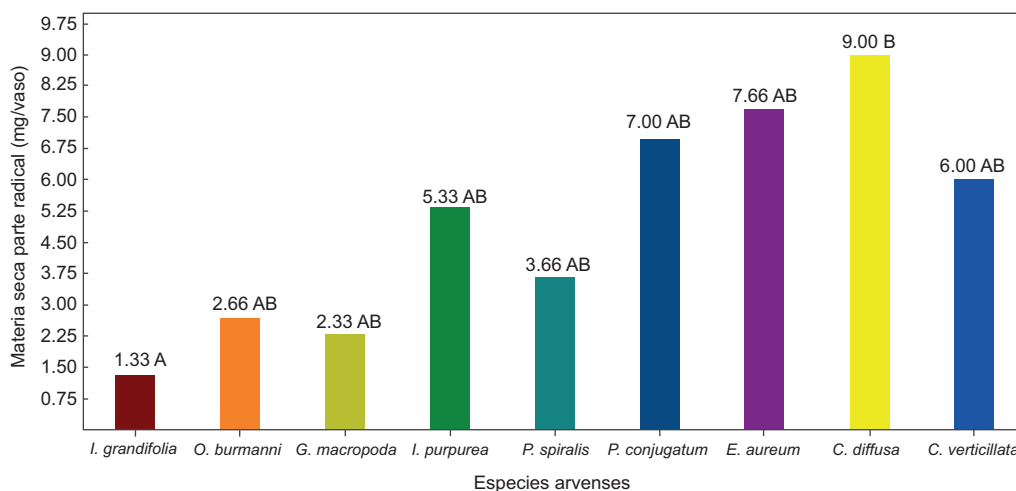


Fig. 3. Comparación de medias de rangos de materia seca radicular con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$ %).

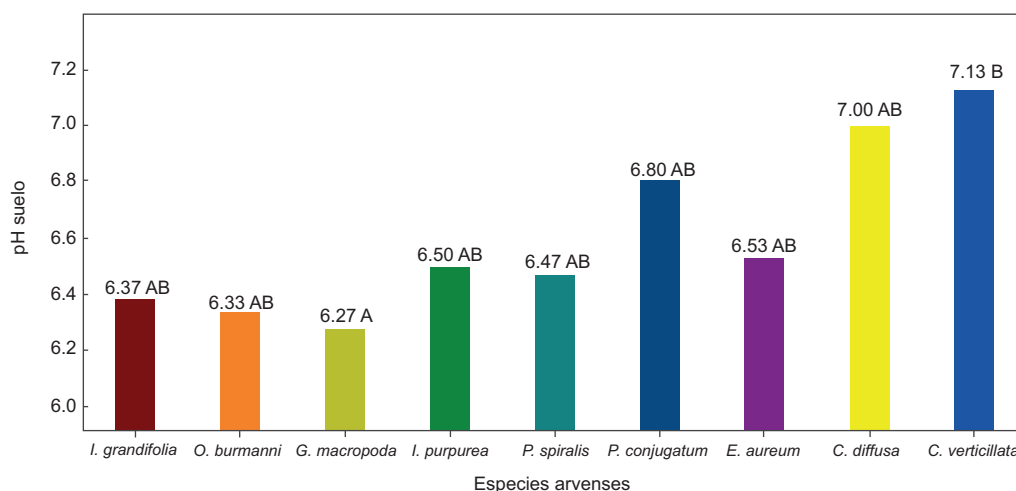


Fig. 4. Comparación de medias de rangos de pH del suelo con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$ %).

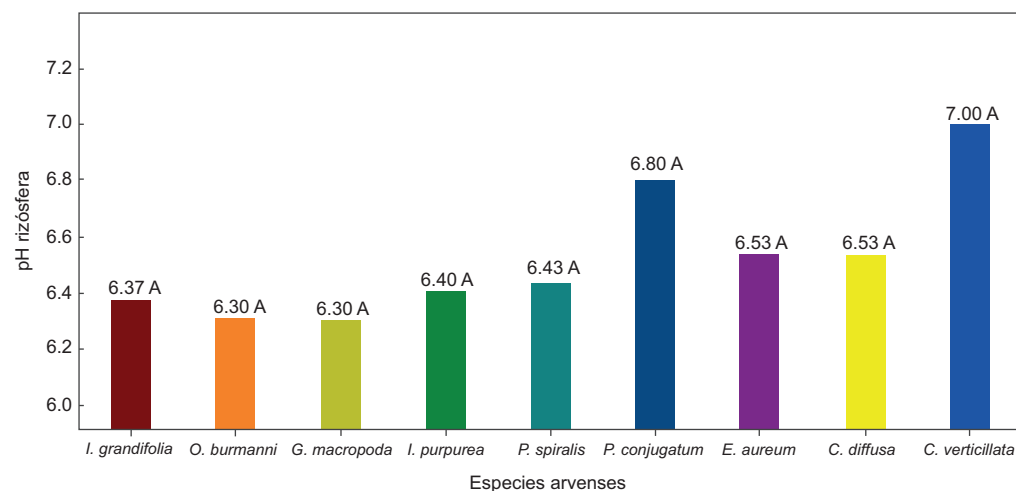


Fig. 5. Comparación de rangos de medias de pH de la rizósfera con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$ %).

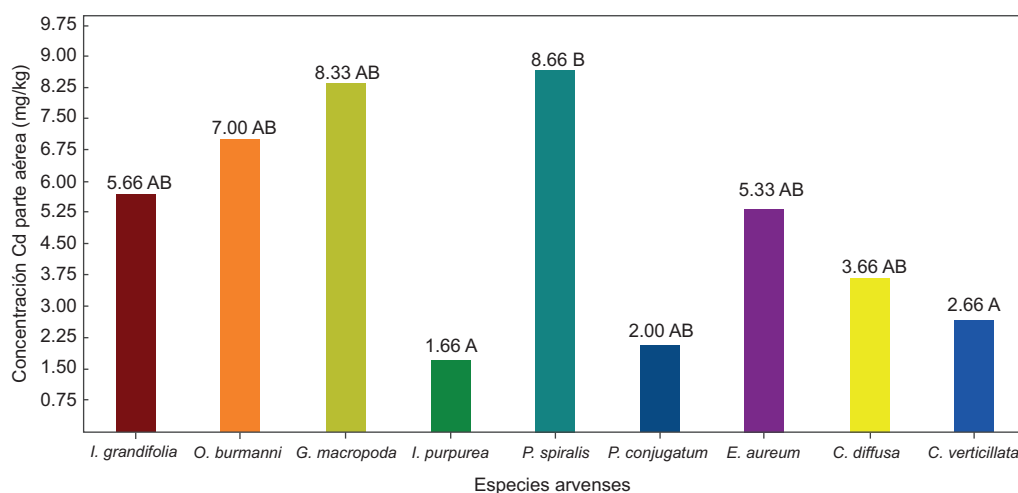


Fig. 6. Comparación de rangos en la concentración de Cd en parte aérea con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05 \%$).

presentó en las especies *Geophila macropoda* (6.30) y *Oplismenus burmannii* (6.30). Aunque los valores de pH en la rizósfera son estadísticamente iguales, las diferencias pueden afectar de manera significativa el comportamiento del Cd en el suelo y por tanto su absorción.

Concentración de cadmio

La mayor concentración de Cd en la parte aérea de las plantas se presentó en la especie *Pseudelephantopus spiralis* (8.66 mg/kg), mientras que las especies *Paspalum conjugatum* (2.00 mg/kg) y *Ipomoea purpurea* (1.66 mg/kg) tuvieron la menor

concentración, la cual fue significativamente menor al resto de los tratamientos (**Fig. 6**).

En la parte radical la especie *Cissus verticillata* tuvo el valor más alto (9.00 mg/kg), en contraste con las especies *Paspalum conjugatum* y *Oplismenus burmannii* que presentaron valores de Cd en las raíces de 2.00 y 1.33 mg/kg respectivamente (**Fig. 7**).

Contenido de cadmio

El contenido de Cd en la parte aérea expresado en mg/maceta fue mayor en las especies *Pseudelephantopus spiralis* y *Geophila macropoda*, con 8.66 y

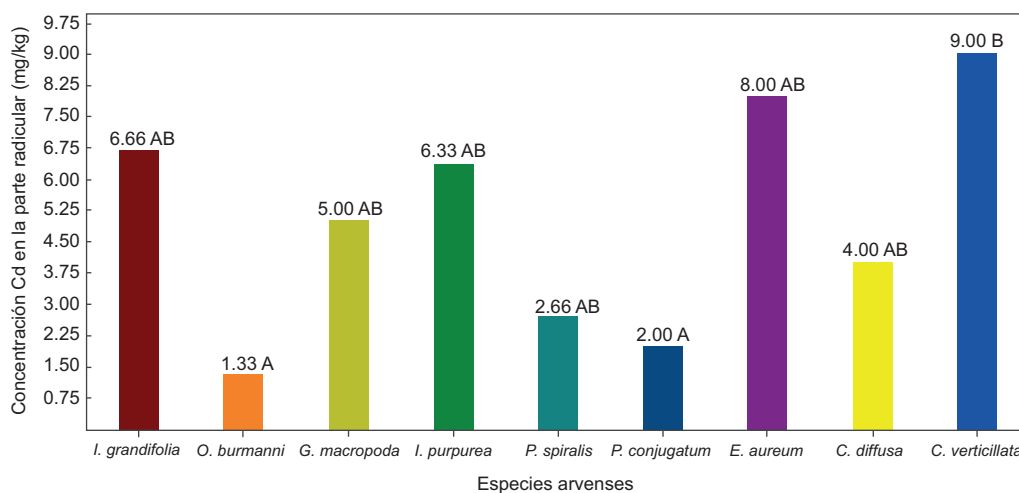


Fig. 7. Comparación de rangos en la concentración de cd en las raíces con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05 \%$).

8.33 mg/kg respectivamente (**Fig. 8**), por lo cual se puede inferir que estas especies tienen una alta capacidad para transportar el metal desde la raíz a las partes aéreas de la planta, mientras que la especie *Ipomoea grandifolia*, presentó los valores más bajos de Cd en la parte aérea de la planta (1.33 mg/kg).

En la **figura 9** se observa que, aunque la especie *Cissus verticillata* absorbió la mayor cantidad de Cd en toda la planta (8.66 mg/kg), se encontró que posee una baja capacidad de translocación, lo que indica que a pesar de apuntar a ser buena alternativa dentro de la fitorremediación esta especie actúa como inmovilizadora del metal, mas no como extractora.

De las especies evaluadas *Cissus verticillata* fue la más prometedora, lo que la convierte en hiperacumuladora de este metal pesado (**Fig. 10**), mientras que *Ipomoea grandifolia* es la que tiene menor potencial fitorremediador, al ser la que menos acumula Cd, lo que coincide con el comportamiento del resto de las variables evaluadas, como producción de materia seca en la parte aérea y radicular.

Factor de traslocación

La especie *Pseudelephantopus spiralis*, presentó el mayor factor de translocación (9.00), pero su comportamiento desde el punto de vista estadístico es similar al resto de las especies. A excepción de *Cissus*

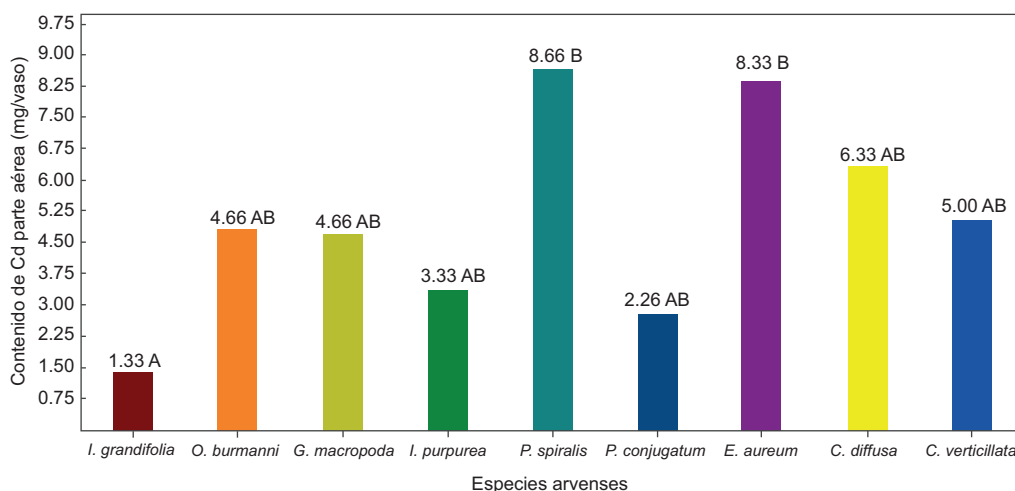


Fig. 8. Comparación de rangos en el contenido de cadmio en parte aérea con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$ %).

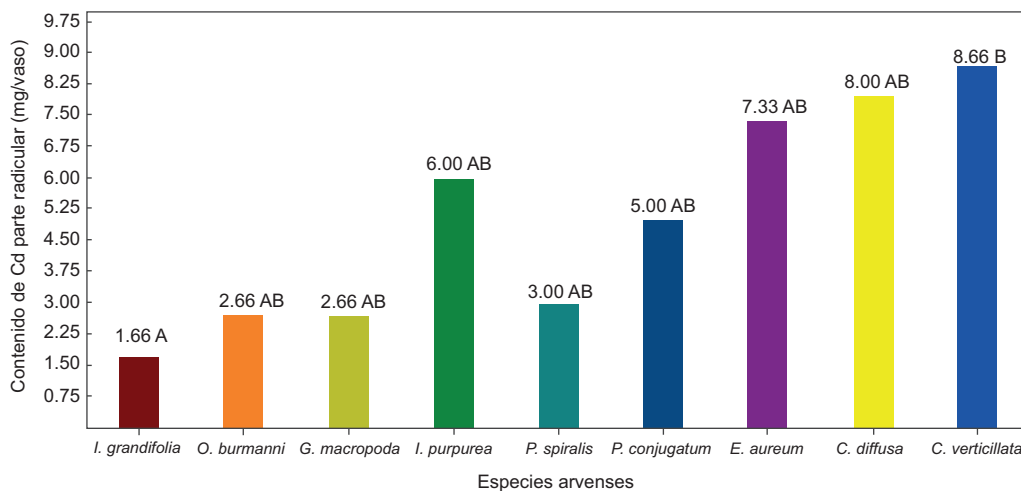


Fig. 9. Comparación de rangos en el contenido de cadmio en parte radicular con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$ %).

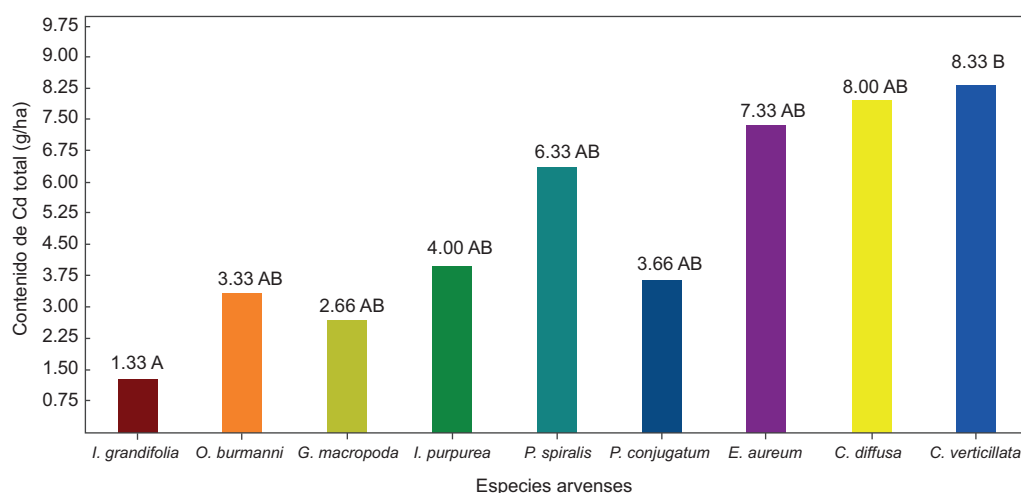


Fig. 10. Comparación de rangos en el contenido total de cadmio con base en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05 \%$).

verticillata, todas las especies evaluadas presentaron menores valores de absorción de Cd que *P. spiralis*, por lo que otros factores pudiesen afectar la absorción del metal (**Fig. 11**).

DISCUSIÓN

Para que una especie sea eficiente como planta fitorremediadora se deben garantizar algunos factores como son la producción de materia seca, tanto en la

parte aérea como en la radical; la acumulación de Cd a nivel radical y su adecuada translocación hacia la parte aérea, además de poseer capacidad adaptativa a las condiciones edáficas (Parihar et al. 2021), las cuales fueron evaluadas en las nueve especies de arvenses como se discute a continuación.

Una especie para ser considerada fitorremediadora debe tener una tasa de crecimiento mayor a la de otras especies y una gran capacidad adaptativa a diferentes condiciones edáficas y climáticas (Ozyigit et al. 2021). Una de estas es *Cissus verticillata* que, bajo

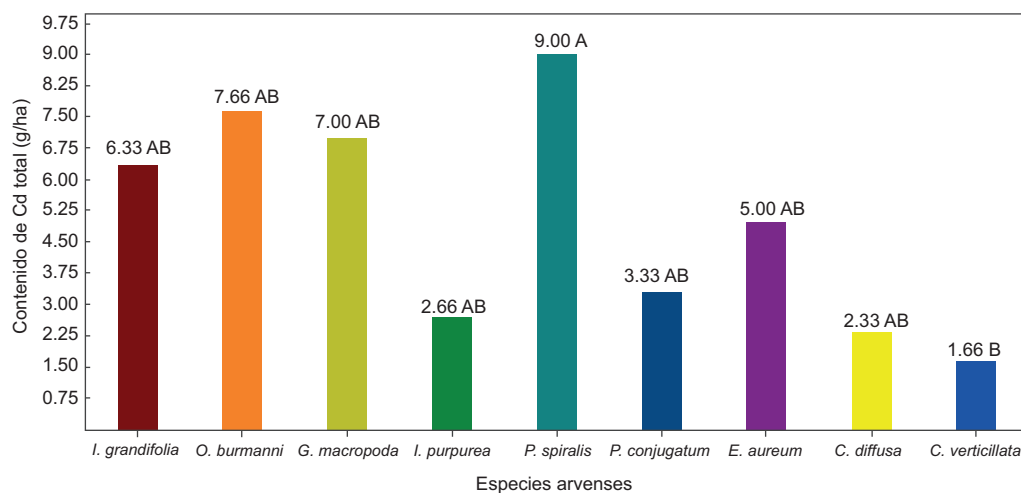


Fig. 11. Comparación de rangos en el factor de translocación (FT) en la prueba de Tukey según especies de arvenses evaluadas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio. Letras diferentes indican diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05 \%$).

condiciones tropicales, presentó la producción de materia seca más alta por planta, con valores ligeramente inferiores a los reportados por Braga et al. (2007), quienes evaluaron su potencial en hojas recolectadas con fines medicinales en una zona templada brasileña.

Aunque la mayor producción de materia seca por algunas especies se relaciona con la remoción de Cd (Yin et al. 2022), no siempre ocurre así. Tal es el caso de lo reportado en estudio realizado con suelos contaminados por elementos potencialmente tóxicos (EPT), de una zona minera de oro (Au) en el Amazonas, donde usando plantas de *Ipomoea grandifolia*, que produjo baja cantidad de materia seca, se encontraron altas concentraciones de EPT (Cardoso et al. 2022).

La producción de materia seca puede ser indicativo de la capacidad adaptativa de la planta (Amabogha et al. 2023), en este sentido la especie *Oplismenus burmannii*, tuvo el mayor crecimiento, lo que se puede atribuir en parte, a su capacidad de adaptación, tal como lo afirman Dolker et al. (2023), quienes encontraron que en un sotobosque *O. burmannii* presentó el mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) oscilando entre 138 y 230. Esta característica de adaptación a la sombra de los árboles se podría aprovechar como estrategia de mitigación en sistemas agroforestales o cultivos perennes, como es el caso del cacao, donde se ha reportado contaminación por Cd.

Uno de los factores que más influye en la absorción de Cd es el pH del suelo (Zhong et al. 2020) y los valores extremos pueden afectar el crecimiento de las plantas (Neina 2019), incluso de aquellas arvenses con gran capacidad adaptativa (Zhang et al. 2020). En los suelos evaluados el pH osciló entre 6 y 7, cercano a la neutralidad. Se encontró que las especies estudiadas presentaron baja extracción de metales, aun sabiendo que las plantas pueden segregar exudados radicales, que acidificarían el pH de la rizósfera y, por ende, elevarían la disponibilidad de los metales.

Se ha demostrado que en suelos con pH menor de 5, se facilita la absorción de Cd al haber mayor disponibilidad (Furcal-Beriguete y Torres-Morales 2020, Hussain et al. 2021). Aunque la práctica de acidificar el suelo (sólo factible para condiciones extremas de contaminación y suelos no agrícolas), a largo plazo traería más daños que beneficios sobre la producción, debido a que son pocas las especies de plantas que se adaptan a condiciones de extrema acidez.

El pH en la rizósfera presentó valores ligeramente inferiores a los reportados en el suelo y, aunque son cercanos a la neutralidad, se evidencia, como se señaló anteriormente, que algunas de las nueve especies evaluadas pueden poseer ciertos mecanismos

que permiten la reducción del pH y por tanto pueden favorecer el proceso de absorción. Esto fue demostrado en un estudio realizado por Sun et al. (2019) con la especie *Sedum plumbizincicola* donde se observó acidificación de la rizósfera provocada por las raíces de esta planta.

A pesar de que las condiciones edáficas no fueron las apropiadas, se observó que en *Cissus verticillata* la concentración de Cd en la parte radical fue mayor que en la aérea y esta variación podría deberse a la diversidad de los sistemas de transporte implicados en la captación y translocación (Moore et al. 2020). Al ser el Cd un elemento no esencial, parte puede ser secuestrado por las raíces (Ismael et al. 2019), no obstante, esto es dependiente de la especie vegetal (Sterckeman y Thomine, 2020, Li et al. 2021, Lou et al. 2021, Wang et al. 2022).

En la especie *Cissus verticillata* se observó la mayor acumulación de Cd, lo cual le ofrece un potencial fitorremediador en suelos contaminados, a pesar de que las condiciones del suelo no favorecieron la movilidad del Cd, en especial por los valores del pH (Huang et al. 2020). Aunque las especies estudiadas no tuvieron la aptitud para modificar las condiciones rizosféricas, su potencial uso se debe a la gran producción de materia seca y su capacidad de tolerancia al Cd, razones por las que es importante considerarlas para programas de fitorremediación (DalCorso et al. 2019) en zonas donde los niveles de contaminación sean de medios a bajos. Para el caso de suelos alcalinos como los predominantes en la provincia del Guayas (Pérez 2019), la remoción de Cd sería menor, por lo que el uso de estas especies se recomendaría de preferencia para zonas con suelos donde el pH sea menor a 5.

La eliminación de Cd del suelo, además de su acumulación en los tejidos de las plantas, dependen de la capacidad de traslocación hacia la parte aérea (Brandão et al. 2018), como fue observado de manera positiva con la especie *Pseudelephantopus spiralis*, que presentó un FT > 1, por lo que se le puede considerar como hiperacumuladora (Hamzah et al. 2016).

A pesar de que las especies evaluadas en esta investigación (excepto *Cissus verticillata*) presentaron un factor de translocación alto, la acumulación de Cd también depende de la capacidad adaptativa de las especies. Por lo anterior, las otras ocho especies evaluadas no deberían ser descartadas, sino evaluar las condiciones edáficas que necesitan para ser eficientes en la extracción del metal y favorecer la producción de materia seca y, como consecuencia, la absorción de Cd.

CONCLUSIONES

Cissus verticillata tuvo los mayores contenidos de Cd total, concentrándose principalmente en el sistema radical. Esta especie, aunque no sea considerada en procesos de extracción, puede ser empleada en otros procesos de fitorremediación, contribuyendo a estabilizar el metal en el suelo.

La especie *Cissus verticillata* presentó una concentración de Cd por encima del umbral establecido para considerarla como una planta hiperacumuladora, por lo que podría ser considerada dentro de esta categoría. Sin embargo, debido a que posee un bajo factor de translocación se dificulta la eliminación práctica de este metal pesado.

Se identificó a la especie *Pseudelephantopus spiralis*, como fitoextractora por presentar el factor de translocación más elevado, indicando una alta tasa de transferencia del metal desde la raíz hacia la parte aérea, haciéndola parte del grupo de plantas acumuladoras o hiperacumuladoras.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a INIAP, UTE y especialmente a la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ), por su apoyo en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Abt E. y Robin L.P. (2020). Perspective on cadmium and lead in cocoa and chocolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 68 (46), 13008-13015. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08295>
- Al-Huqail A.A. (2023). Stimulating the efficiency of Cd-phytoremediation from contaminated soils by *Solanum nigrum* L.: Effect of foliar and soil application of yeast extract. *South African Journal of Botany* 161, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.053>
- Amabogha O.N., Garelick H., Jones H. y Purchase D. (2023). Combining phytoremediation with bioenergy production: developing a multi-criteria decision matrix for plant species selection. *Environmental Science and Pollution Research* 30, 40698-40711. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24944-z>
- Aparicio J.D., Raimondo E.E., Saez J.M., Costa-Gutierrez S.B., Álvarez A., Benimeli C.S. y Polti M.A. (2022). The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10 (2), 107141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.107141>
- Awa S.H. y Hadibarata T. (2020). Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: A review. *Water, Air, and Soil Pollution* 231 (2), 47. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0>
- Baez H. B., Arzapalo L. C., Nakayo J. J. y Alfaro E. B. (2020). Electrorremediación de suelos agrícolas contaminados con plomo, Carabayllo. *Revista ECIPerú* 17 (1), 34-39.
- Barraza F., Schreck E., Uzu G., Lévêque T., Zouiten C., Boidot M. y Maurice L. (2021). Beyond cadmium accumulation: Distribution of other trace elements in soils and cacao beans in Ecuador. *Environmental Research* 192, 110241. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110241>
- Brandão M.C.S., Martins F.M., Accioly A.M.A., Santos N.M., Romão M.V.V. y Azevedo A. D. (2018). Phytoremediation potential and morphological changes of plants growing in the vicinity of lead smelter plant. *International Journal of Environmental Science and Technology* 15 (2), 361-372. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1403-2>
- Chancay L.F., Delgado M. y Salas C.A. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica: Revista de las Agrociencias Edición Especial*, 91-110. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.4324
- DalCorso G., Fasani E., Manara A., Visioli G. y Furini A. (2019). Heavy metal pollutions: State of the art and innovation in phytoremediation. *International Journal of Molecular Sciences* 20 (14), 3412. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms20143412>
- de la Vega M.H., Lemir A.H., García A.E., Pace R. y Aceñolaza M. (2000). Control de *Commelina erecta* L. con herbicidas postemergentes con el objetivo de su uso en cultivos de soja transgénica. *Planta Daninha* 18, 51-56. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582000000100005>
- Dolker T., Agrawal S.B. y Agrawal M. (2023). Elevated ozone negatively affects the community characteristics and productivity of subtropical grassland in India. *Ecosystem Health and Sustainability* 9, 0006. <https://doi.org/10.1080/15324982.2021.1953634>
- EU (2014). Commission Regulation (EU) No 488/2014 of 12 May 2014 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs. *Official Journal of the European Union* 57 (L 138), 75-79.
- Fatima G., Raza A. M., Hadi N., Nigam N. y Mahdi A.A. (2019). Cadmium in human diseases: It's more than just a mere metal. *Indian Journal of Clinical Biochemistry* 34, 371-378. <https://doi.org/10.1007%2Fs12291-019-00839-8>

- Furcal-Beriguete P. y Torres-Morales J.L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha* 33 (1), 122-137. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>
- García-Briones A.R., Pico-Pico B.F. y Jaimez R. (2021). La cadena de producción del cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. *Revista Digital Novasineria* 4 (2), 152-172. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.10>
- Genchi G., Sinicropi M.S., Lauria G., Carocci A. y Catalano A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (11), 3782. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Haider F.U., Lique C., Coulter J.A., Cheema S.A., Wu J., Zhang R., Wenjun M. y Farooq M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Hamid Y., Tang L., Sohail M.I., Cao X., Hussain B., Aziz M.Z., Usman M., He Z. y Yang X. (2019). An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain. *Science of The Total Environment* 660, 80-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.419>
- Hamzah A., Hapsari R.I. y Wisnubroto E.I. (2016). Phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural land using indigenous plants. *International Journal of Environmental and Agriculture Research* 2 (1), 8-14. https://ijoeear.com/assets/articles_menuscripts/file/IJOEAR-JAN-2016-2.pdf
- Huang R., Dong M., Mao P., Zhuang P., Paz-Ferreiro J., Li Y., Li Y., Hu X., Netherway P. y Li Z. (2020). Evaluation of phytoremediation potential of five Cd (hyper) accumulators in two Cd contaminated soils. *Science of The Total Environment* 721, 137581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137581>
- Huaraca-Fernández J.N., Pérez-Sosa L., Bustinza-Cabala L.S. y Pampa-Quispe N.B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: Una revisión. *Información Tecnológica* 31 (4), 139-152. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Hussain B., Ashraf M.N., Abbas A., Li J. y Farooq M. (2021). Cadmium stress in paddy fields: effects of soil conditions and remediation strategies. *Science of The Total Environment* 754, 142188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142188>
- Ismael M.A., Elyamine A.M., Moussa M.G., Cai M., Zhao X. y Hu C. (2019). Cadmium in plants: Uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. *Metallomics* 11 (2), 255-277. <https://doi.org/10.1039/c8mt00247a>
- Li Z., Liang Y., Hu H., Shaheen S. M., Zhong H., Tack F.M., Wu M., Li Y., Gao Y., Rinklebe J. y Zhao J. (2021). Speciation, transportation, and pathways of cadmium in soil-rice systems: A review on the environmental implications and remediation approaches for food safety. *Environment International* 156, 106749. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106749>
- Loyde de la Cruz L.A., Méndez B.G., Avalos A.M.C. y Portales R.L. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *Epistémus* 16 (33), 93-98. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>
- Luo J.S. y Zhang Z. (2021). Mechanisms of cadmium phytoremediation and detoxification in plants. *The Crop Journal* 9(3), 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.001>
- Maddela N.R., Kakarla D., García L.C., Chakraborty S., Venkateswarlu K. y Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of The Total Environment* 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>
- Manori S., Shah V., Soni V., Dutta K. y Daverey A. (2021). Phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Bidens pilosa* L.: Impact of pine needle biochar amendment. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 58872-58884. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12953-3>
- McLaughlin M.J., Smolders E., Zhao F.J., Grant C. y Montalvo D. (2021). Managing cadmium in agricultural systems. *Advances in Agronomy* 166, 1-129. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.10.004>
- Moore R.E., Ullah I., de Oliveira V.H., Hammond S.J., Strekopytov S., Tibbett M., Dunwell, J. y Rehkämper M. (2020). Cadmium isotope fractionation reveals genetic variation in Cd uptake and translocation by *Theobroma cacao* and role of natural resistance-associated macrophage protein 5 and heavy metal ATPase-family transporters. *Horticulture Research* 7 (71), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0292-6>
- Neina D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science* 2019, 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Niture S., Lin M., Qi Q., Moore J.T., Levine K.E., Fernando R.A. y Kumar D. (2021). Role of autophagy in cadmium-induced hepatotoxicity and liver diseases. *Journal of Toxicology* 2021, 9564297. <https://doi.org/10.1155/2021/9564297>
- Ozyigit I.I., Can H. y Dogan I. (2021). Phytoremediation using genetically engineered plants to remove metals: A review. *Environmental Chemistry Letters* 19,

- 669-698. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01095-6>
- Parihar J.K., Parihar P.K., Pakade Y.B. y Katnoria J. K. (2021). Bioaccumulation potential of indigenous plants for heavy metal phytoremediation in rural areas of Shaheed Bhagat Singh Nagar, Punjab (India). *Environmental Science and Pollution Research* 28, 2426-2442. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10454-3>
- Pérez Molina A. (2019). Riesgo de sodicidad en los suelos de Cantón Milagro, Guayas-Ecuador en época de estiaje. *Revista Politécnica* 42 (2), 15-22.
- Porras M.E., Arboleda L., Baño D. y Guerrero S.A. (2022). Análisis comparativo del impacto económico del cultivo del cacao en Ecuador del primer semestre 2019 frente al primer semestre 2020. *Revista Científica Multidisciplinaria InvestiGo* 3 (5), 17-31. <https://doi.org/10.56519/09dqhe88>
- Qin G., Niu Z., Yu J., Li Z., Ma J. y Xiang P. (2021). Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere* 267, 129205. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205>
- Quintana M. D. y Aguilar J. V. (2018). Denominación de origen de cacao ecuatoriano: ¿un aporte de marketing global?. *Innova Research Journal* 3 (10.1), 68-76. <http://dx.doi.org/10.33890/innova.v3.n10.1.2018.825>
- Reis K.L., Rieger F.W., Amaral M.E., Storto R., Matias F.I. y Antunes R. (2019). Nutritional status and root morphology of tomato under Cd-induced stress: comparing contrasting genotypes for metal-tolerance. *Scientia Horticulturae* 246, 518-527. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2018.11.023>
- Shen X., Dai M., Yang J., Sun L., Tan X., Peng C. Ali I. y Naz I. (2022). A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. *Chemosphere* 291, 132979. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979>
- Siegel S. y Castellan N.J. (1998). Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta. 4a ed, Trillas, Ciudad de México, México, 195 pp.
- Sterckeman T. y Thomine S. (2020). Mechanisms of cadmium accumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* 39 (4), 322-359. <https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179>
- Sun X., Li Z., Wu L., Christie P., Luo Y. y Fornara D.A. (2019). Root-induced soil acidification and cadmium mobilization in the rhizosphere of *Sedum plumbizincicola*: Evidence from a high-resolution imaging study. *Plant and Soil* 436, 267-282. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>
- Wang J., Chen X., Chu S., You Y., Chi Y., Wang R., Yang X., Hayat K., Zhang D. y Zhou P. (2022). Comparative cytology combined with transcriptomic and metabolomic analyses of *Solanum nigrum* L. in response to Cd toxicity. *Journal of Hazardous Materials* 423, 127168. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127168>
- Wen Y., Li W., Yang Z., Zhang Q. y Ji J. (2020). Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China. *Chemosphere* 245, 125620. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125620>
- Wilches-Ortiz W.A., Sandoval-Cáceres Y.P. y Cruz-Castiblanco G.N. (2022). Contaminantes presentes en granos y productos de cacao (*Theobroma cacao* L.) a nivel mundial, una revisión. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo* 12 (2), 45-58. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15209>
- Yin Z., Yu J., Han X., Wang H., Yang Q., Pan H., Lou Y. y Zhuge Y. (2022). A novel phytoremediation technology for polluted cadmium soil: *Salix integra* treated with spermidine and activated carbon. *Chemosphere* 306, 135582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135582>
- Zhang X., Gu P., Liu X., Huang X., Wang J., Zhang S. y Ji J. (2021). Effect of crop straw biochars on the remediation of Cd-contaminated farmland soil by hyperaccumulator *Bidens pilosa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 219, 112332. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112332>
- Zhang Z., Sun J., Liu M., Xu M., Wang Y., Wu G.L., Zhou H., Ye Ch., Tsechoe D. y Wei T. (2020). Don't judge toxic weeds on whether they are native but on their ecological effects. *Ecology and Evolution* 10 (17), 9014-9025. <https://doi.org/10.1002/ece3.6609>
- Zhao C., Dong Y., Feng Y., Li Y. y Dong Y. (2019). Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review. *Chemosphere* 221, 841-855. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.079>
- Zhong X., Chen Z., Li Y., Ding K., Liu W., Liu Y., Yuan Y., Zhang M., Baker A., Yang W., Fei Y., Wang Y., Chao Y. y Qiu R. (2020). Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China. *Journal of Hazardous Materials* 400, 123289. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123289>
- Zhou W., Li F., Yang X., Yang W., Wang C., Cao R., Zhou Ch. y Tian M. (2023). Peanut-chocolate-ball-inspired construction of the interface engineering between CdS and intergrown Cd: Boosting both the photocatalytic activity and photocorrosion resistance. *Journal of Energy Chemistry* 76, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.09.013>