

MITIGACIÓN DE CADMIO POR FITORREMEDIACIÓN



“CAJA DE HERRAMIENTAS PARA LA PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE CADMIO EN LA CADENA DE CACAO-ECUADOR”



sembramos
Futuro

Lenín



GUÍA 13

MITIGACIÓN DE CADMIO POR FITORREMEDIACIÓN

Dirigida a: investigadores, asesores, técnicos y agricultores.

AUTORES

Karina Peña¹; Manuel Carrillo¹; Wuellins Durango¹; Patricia Orozco¹;
Ana Peña¹

REVISIÓN PARES EXTERNOS

Marcelo Calvache²; Frank Intriago³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP. Estación Experimental Tropical Pichilingue. Mocache, Ecuador. karina.pena@iniap.gob.ec ; manuel.carrillo@iniap.gob.ec ; wuellins.durango@iniap.gob.ec ; patyrosco.17@gmail.com ; anitakpj1996@gmail.com

²Profesor honorario de la Universidad Central del Ecuador, PhD en Ciencias Agrícolas. Quito, Ecuador. mcalvache20@gmail.com

³Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ingeniería Agronómica. Portoviejo, Ecuador. frank.intriago@utm.edu.ec

Coordinación general

República del Ecuador
Ministerio de Agricultura y Ganadería
Programa Nacional de Reactivación de Café y Cacao



Coordinación editorial

Magdalena López, Consultor Programas Cadena de Valor, GIZ
Pedro Ramírez, GIZ
José Luis Cueva Cango, MOCCA-Rikolto

Revisores internos

Andrés Proaño, MAG; Luis Herrera, MAG; Luis Orozco, MOCCA-LWR; Verónica Proaño, AVSF;
Ana Gabriela Velasteguí, CESA; Natalia Palomino, MOCCA-Rikolto; Luis Gualotuña, MAG

Fotografías

Pedro Ramírez, GIZ

Corrección de estilo y diagramación editorial

Carla Bohórquez; Ricardo Bravo; Martín Quirola

Cita del documento

Versión digital:

Peña, K., Carrillo, M., Durango, W., Orozco, P. & Peña, A. (2021). Guía 13: Mitigación de cadmio por fitorremediación. *Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador* (1.ª ed., pp. 1-26). Quito, Ecuador. https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja%20de%20Herramientas_Cadmio_Cacao/

“La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo financiero de la Unión Europea y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Su contenido es responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de los donantes”.

Copyright © 2021. Todos los derechos reservados. Este documento puede reproducirse para fines no comerciales citando la fuente.

ISBN: 978-9942-22-526-9





ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Tipos de fitorremediación	3
2.1 Fitodegradación	4
2.2 Fitovolatilización	4
2.3 Fitoestabilización	4
2.4 Fitoextracción	4
3. Limitaciones de la fitorremediación	5
4. Plantas arvenses fitorremediadoras de cadmio	6
5. Plantas arvenses como fitorremediadoras de cadmio en suelos cacaoteros	8
5.1 Arvenses de reproducción sexual	11
5.2 Arvenses de reproducción asexual	13
6. Conclusiones	19
7. Recomendaciones	20
8. Referencias	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Enmiendas minerales evaluadas en diferentes países, bajo características químicas de suelos contrastantes y sus efectos sobre la disponibilidad del cadmio.</i>	9
--	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Mecanismos de fitorremediación.</i>	3
Figura 2a. <i>Respuesta fisiológica de las arvenses de reproducción sexual cultivadas en suelo contaminado con cadmio.</i>	10
Figura 2b. <i>Respuesta fisiológica de las arvenses de reproducción asexual cultivadas en suelo contaminado con cadmio.</i>	10
Figura 3a. <i>Concentración de cadmio en la raíz en arvenses de reproducción sexual.</i>	12
Figura 3b. <i>Concentración de cadmio en la parte aérea en arvenses de reproducción sexual.</i>	12
Figura 4. <i>Factor de translocación de arvenses de reproducción sexual.</i>	13
Figura 5a. <i>Concentración de cadmio en la raíz de arvenses de reproducción asexual.</i>	14
Figura 5b. <i>Concentración de cadmio en la parte aérea de arvenses de reproducción asexual.</i>	15
Figura 6. <i>Factor de translocación en arvenses de reproducción asexual.</i>	15
Figura 7. <i>Mecanismos de fitoestabilización de metales</i>	16

1. Introducción

En la naturaleza existen especies vegetales que crecen de forma silvestre, las cuales, aparentemente, no tienen importancia ambiental y generan pérdidas para la biodiversidad. Estas plantas reciben diversas denominaciones: maleza, hierba mala, monte o planta arvense (Kumar Rai & Singh, 2020). Sin embargo, se han documentado diversos estudios, los cuales describen la capacidad de absorción que tienen estas plantas; su fisiología y funciones metabólicas les ha permitido acumular diversos contaminantes, por lo tanto, estas plantas pueden remediar suelos contaminados con cadmio (Cd) (Chandra, Kumar, Tripathi & Sharma, 2018).

Una de las técnicas de remediación del suelo es la fitorremediación, proceso en el que se utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar o dejar en formas inocuas los contaminantes del suelo. Además, constituye una medida sostenible para la remediación y su costo de operación es económico con respecto a los métodos físicos y químicos (Hamzah, Hapsari & Wisnubroto, 2016). Esta guía introduce a investigadores, asesores, técnicos y agricultores en los fundamentos teóricos de la fitorremediación, sus limitaciones y el uso de arvenses como plantas fitorremediadoras de cadmio para el cultivo de cacao.



2. Tipos de fitorremediación

En función del tipo y concentración de contaminantes, de las condiciones de campo, del nivel de limpieza requerido y del tipo de planta, se pueden usar diferentes mecanismos de fitorremediación. Por ejemplo, la fitoestabilización y fitodegradación se utilizan solamente para compuestos orgánicos, mientras que, la fitovolatilización y fitoextracción, también son útiles para elementos inorgánicos como metales y metaloides (Warren & Alloway, 2003). La Figura 1 muestra la representación esquemática de los mecanismos de fitorremediación.

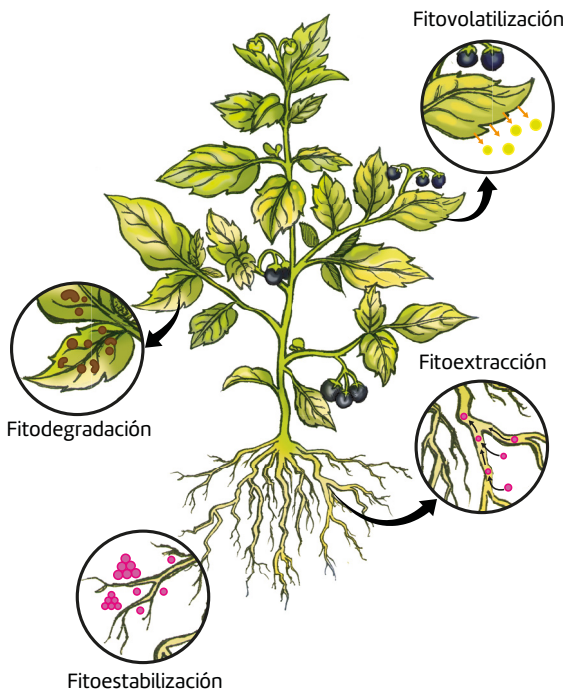


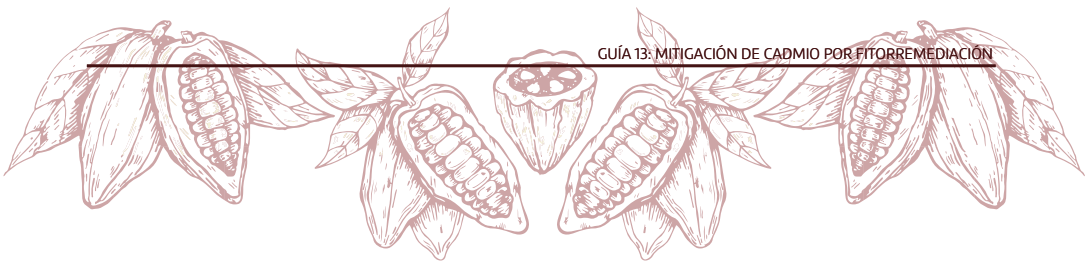
Figura 1. Mecanismos de fitorremediación.

2.1 Fitodegradación: esta técnica implica la descomposición de contaminantes absorbidos por las plantas a través de sus procesos metabólicos o la descomposición de contaminantes externos a la planta a través del efecto de los compuestos producidos por las mismas (Parmar & Singh, 2015).

2.2 Fitovolatilización: en este mecanismo de descontaminación, las plantas absorben metales del suelo que son convertidos biológicamente en una forma volátil, y luego son liberados a la atmósfera por volatilización, con el inconveniente de no eliminar el contaminante por completo, solo lo transfiere del suelo a la atmósfera, desde donde nuevamente se deposita al suelo o aguas superficiales (Parmar & Singh, 2015). El arsénico (As), mercurio (Hg) y selenio (Se) son susceptibles de ser fitovolatilizados debido a que se encuentran naturalmente en forma gaseosa.

2.3 Fitoestabilización: esta técnica se basa en la capacidad que tienen las plantas para limitar la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo debido a la producción de compuestos químicos en las raíces que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos en la interfase raíz-suelo (Kidd et al., 2009). Esta técnica combina el efecto de los exudados de las raíces, las propiedades del suelo y el papel de los microorganismos asociados a las raíces. Las plantas que actúan como fitoestabilizadoras toleran altos niveles de estrés y su sistema radicular es denso y profundo, lo que les permite tener alta acumulación de metales pesados en los tejidos de la raíz (Hrkic Ilic, Pajevic, Borisev & Lukovic, 2020).

2.4 Fitoextracción: en este mecanismo, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación) y posteriormente son translocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción). Las plantas que absorben y translocan los contaminantes a su biomasa aérea son llamadas hiperacumuladoras (Sas-Nowosielska et al., 2004). La biomasa de estas plantas puede procesarse de manera segura mediante secado, cenizas o compostaje (Suthar, Mahmood-ul-Hassan, Memon & Rafique, 2013).



3. Limitaciones de la fitorremediación

Aunque, la fitorremediación es una tecnología prometedora para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, presenta algunas limitaciones (Zubair et al., 2016; LeDuc y Terry, 2005; Ramamurthy y Memarian, 2012), por ejemplo:

- Se requiere de largos periodos de tiempo para la limpieza.
- La eficacia de la fitorremediación de la mayoría de los hiperacumuladores metálicos generalmente está limitada por su lenta tasa de crecimiento y baja biomasa.
- Dificultad en la movilización de la fracción de iones metálicos más fuertemente unidos al suelo; es decir, biodisponibilidad limitada de los contaminantes en el suelo.
- Es aplicable a sitios con niveles bajos o moderados de contaminación por metales, ya que el crecimiento de las plantas no se mantiene en suelos muy contaminados.
- Existe el riesgo de contaminación de la cadena alimentaria en caso de mala gestión y falta de atención adecuada.



4. Plantas arvenses fitorremediadoras de cadmio

Las plantas arvenses son capaces de adaptarse a medios contaminados con metales pesados y absorber cantidades importantes, razón por la cual, son reconocidas como plantas metalófitas (Hernández-Allica, Becerril & Garbisu, 2008). Las arvenses tienen la particularidad de crecer rápidamente y propagarse sin mayor dificultad, suelen tener raíces profundas y muchas de ellas son selectivas para un metal en específico. No obstante, la cantidad total del metal extraído depende de su concentración en la biomasa seca y la biomasa total producida por la planta (Ghosh & Singh, 2005).

Se conoce que las arvenses han logrado extraer eficientemente el cadmio, como lo mencionan distintos autores (Sarkar et al., 2019; Zhong et al., 2019; Lin et al., 2014b). Mientras, ciertas arvenses han demostrado ser capaces de fitoestabilizar metales pesados (Cambrolle, Redondo-Gomez, Mateos-Naranjo y Figueroa, 2008; Cheraghi et al., 2011).

En condiciones de invernadero se encontró que *Gynura pseudochina*, *Chromolaena odorata*, *Conyza sumatrensis*, *Crassocephalum crepidioides* y *Nicotiana tabacum* mostraron el potencial de hiperacumular el cadmio y esta información se corroboró en experimentos *in situ*, en un campo agrícola de una provincia de Tailandia, altamente contaminada con el metal. Las arvenses de este experimento crecieron y presentaron una tasa de supervivencia del 95%. Además, todas las especies, excepto *C. odorata*, hiperacumularon el metal presente en el suelo (Khaokaew y Landrot, 2015).

El cultivo intercalado de plantas hiperacumuladoras con plantas no hiperacumuladoras puede mejorar significativamente la absorción de metales pesados en las plantas hiperacumuladoras y reducir la biodisponibilidad de los metales en las plantas no hiperacumuladoras.

Así, por ejemplo, se estudió el efecto de la absorción y la acumulación de cadmio en lechugilla espinosa (*Sonchus asper* L. Hill) y maíz (*Zea mays* L.) bajo un sistema de cultivo intercalado. Los resultados mostraron que la biomasa del cultivo intercalado con respecto al monocultivo aumentó de 4,8% a 64,9% y de 4% a 33%, y el contenido de cadmio en *S. asper* fue mayor en relación a los niveles encontrados en *Zea mays* L. (Qin et al., 2013).

En otro estudio, cuatro arvenses (*Crassocephalum crepidioides*, *Galinsoga parviflora*, *Sigesbeckia orientalis* y *Solanum nigrum*) fueron intercaladas con plántulas de uva (*Vitis vinifera*), a fin de evaluar la efectividad del intercalado para remediar suelos contaminados con cadmio. En comparación con el monocultivo, las arvenses redujeron el cadmio en un 78,7%; 12,7%; 29,8% y 26,5%, respectivamente para *C. crepidioides*, *S. nigrum*, *S. orientalis* y *G. parviflora* (Hu et al., 2019).

De esta manera se corrobora que intercalar los cultivos con plantas arvenses puede reducir la biodisponibilidad de cadmio en plantas de consumo humano, siempre y cuando se realicen los respectivos seguimientos agronómicos. Además de ello, la aplicación de enmiendas, sobre todo las de origen natural, mejora las condiciones del suelo provocando que la biomasa de las arvenses aumente y por ende se reduzca la movilidad del cadmio a las plantas de consumo humano (Zeng et al., 2018).

5. Plantas arvenses como fitorremediadoras de cadmio en suelos cacaoteros

En el Ecuador, debido a la problemática del cadmio presente en la almendra de cacao, el Departamento de Suelos de la Estación Experimental Pichilingue del INIAP evaluó, en condiciones de invernadero, el potencial fitorremediador de especies arvenses adaptadas al ambiente de plantaciones cacaoteras (bajo sombra) de las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, El Oro y Los Ríos.

En la Tabla 1 se presenta la identificación de las especies colectadas y que fueron cultivadas por semilla (reproducción sexual) y estolones (reproducción asexual).



Tabla 1. Enmiendas minerales evaluadas en diferentes países, bajo características químicas de suelos contrastantes y sus efectos sobre la disponibilidad del cadmio.

Nombre común	Nombre científico
Reproducción asexual	
Canutillo	<i>Commelina diffusa</i>
Verbenilla de vaca	<i>Pseudelephantopus spiralis</i>
Bejuco ubí	<i>Cissus verticillata</i>
Ciempién	<i>Epipremnum pinnatum</i>
Patita de Belén	<i>Oplismenus burmannii</i>
Horquetilla	<i>Paspalum conjugatum</i>
Oreja de ratón	<i>Geophila macropoda</i>
Campanilla	<i>Ipomoea purpurea</i>
Gloria matutina	<i>Ipomoea grandifolia</i>
Reproducción sexual	
Caminadora	<i>Rottboellia cochinchinensis</i>
Pangola	<i>Digitaria sanguinalis</i>
Yerba carnífera	<i>Conyza bonariensis</i>
Garrapatilla	<i>Peperomia pellucida</i>
Arrocillo	<i>Echinochloa colonum</i>
Hierba de chivo	<i>Ageratum conyzoides</i>
Pata de gallina	<i>Eleusine indica</i>
Paja mona	<i>Leptochloa filiformis</i>
Coquito	<i>Cyperus cephalotes</i>
Hierba mora	<i>Solanum nigrum</i>

En la Figura 2a y 2b se aprecia la respuesta fisiológica de las arvenses cultivadas en suelo contaminado con cadmio, donde las plantas no mostraron afección en sus diferentes órganos a causa del metal; de igual manera, otros trabajos también evidenciaron la adaptabilidad de las especies arvenses para cadmio (Sarkar et al., 2019; Gisbert et al., 2006).



Figura 2a. Respuesta fisiológica de las arvenses de reproducción sexual cultivadas en suelo contaminado con cadmio.

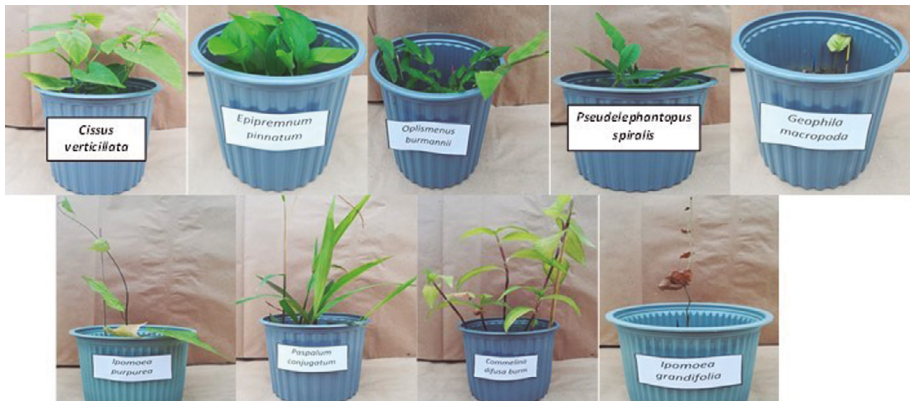


Figura 2b. Respuesta fisiológica de las arvenses de reproducción asexual cultivadas en suelo contaminado con cadmio.

En condiciones de invernadero, las plantas sembradas en suelo contaminado con 3 mg kg^{-1} de cadmio se desarrollaron por 75 días, hasta la cosecha, donde fueron separadas en raíz y parte aérea, para posteriormente determinar la concentración, el contenido y el Factor de Translocación (FT) del cadmio en cada arvense. El FT indica la capacidad que tienen las plantas de movilizar metales desde la raíz hacia los órganos aéreos. Este se calculó dividiendo la concentración de cadmio en la parte aérea para la concentración en las raíces (Khaokaew & Landrot, 2015), como se indica en la Ecuación 1.

$$FT = \frac{\text{Cd Aérea (mg/kg)}}{\text{Cd Raíz (mg/kg)}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Si el $FT > 1$, la planta tiene el potencial de ser utilizada como fitoextractora. Por el contrario, valores menores a 1 pueden revelar su afinidad para fitoestabilizar los contaminantes (Drozdova et al., 2019).

5.1 Arvenses de reproducción sexual

En la Figura 3 se aprecia que la concentración de cadmio en las plantas arvenses de reproducción sexual, son estadísticamente diferentes entre especies ($p \text{ value} \leq 0,05$). Las especies que acumularon mayor cantidad de cadmio en la raíz fueron: *Conyza bonariensis* ($26,7 \text{ mg kg}^{-1}$), *S. nigrum* ($22,83 \text{ mg kg}^{-1}$), *E. colonum* ($18,17 \text{ mg kg}^{-1}$), *E. indica* ($18,0 \text{ mg kg}^{-1}$) y *R. cochinchinensis* ($15,17 \text{ mg kg}^{-1}$). Por el contrario, *P. pellucida* ($7,66 \text{ mg kg}^{-1}$), *L. filiformis* ($7,39 \text{ mg kg}^{-1}$), *D. sanguinalis* ($7,66 \text{ mg kg}^{-1}$), *C. cepha* ($4,96 \text{ mg kg}^{-1}$) y *A. conyzoides* ($2,66 \text{ mg kg}^{-1}$) retuvieron menos cadmio en la raíz.

En los tejidos aéreos se observa que *P. pellucida* ($23,94 \text{ mg kg}^{-1}$) y *C. cepha* ($15,01 \text{ mg kg}^{-1}$) contienen la mayor concentración de cadmio, y, por lo tanto, el mayor factor de translocación de cadmio de la raíz a los brotes, mientras que, *C. bonariensis* ($6,05 \text{ mg kg}^{-1}$), *S. nigrum* ($4,99 \text{ mg kg}^{-1}$), *A. conyzoides* ($4,58 \text{ mg kg}^{-1}$), *R. cochinchinensis* ($3,89 \text{ mg kg}^{-1}$), *D. sanguinalis* ($2,82 \text{ mg kg}^{-1}$), *E. colonum* ($2,72 \text{ mg kg}^{-1}$), *L. filiformis* ($1,25 \text{ mg kg}^{-1}$) y *E. indica* ($0,85 \text{ mg kg}^{-1}$) presentaron menor concentración del metal en la biomasa aérea.

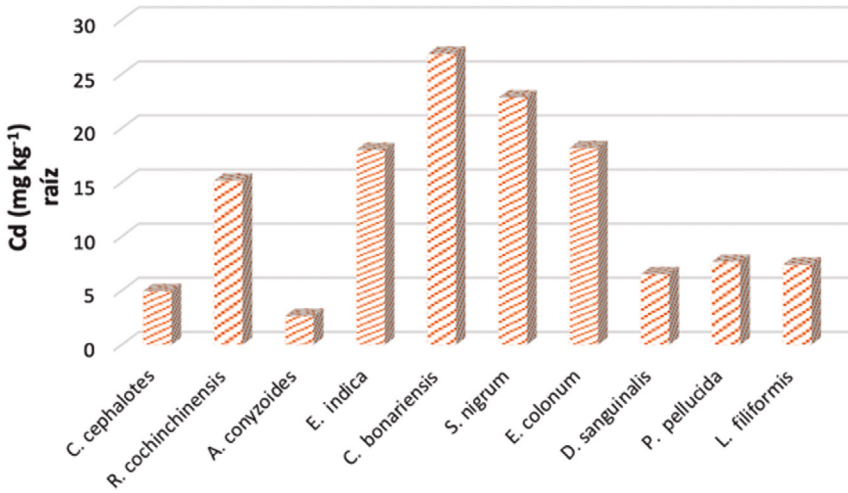


Figura 3a. Concentración de cadmio en la raíz en arvenses de reproducción sexual.

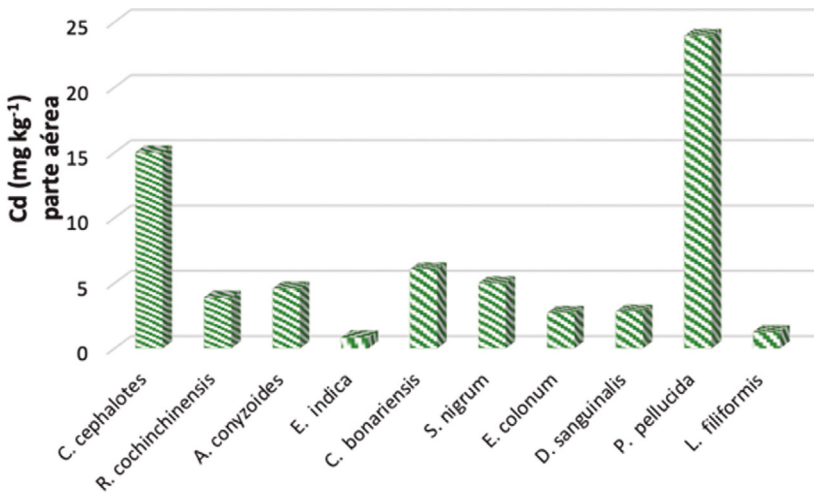


Figura 3b. Concentración de cadmio en la parte aérea en arvenses de reproducción sexual.

Con respecto al FT, se evidenció que *P. pellucida* (3,13), *C. cephalotes* (3,07) y *A. conyzoides* (1,73) actuaron como fitoextractoras de cadmio (FT > 1), mientras que, el resto de especies funcionaron como fitoestabilizadoras del contaminante (FT < 1), como se indica en la Figura 4.

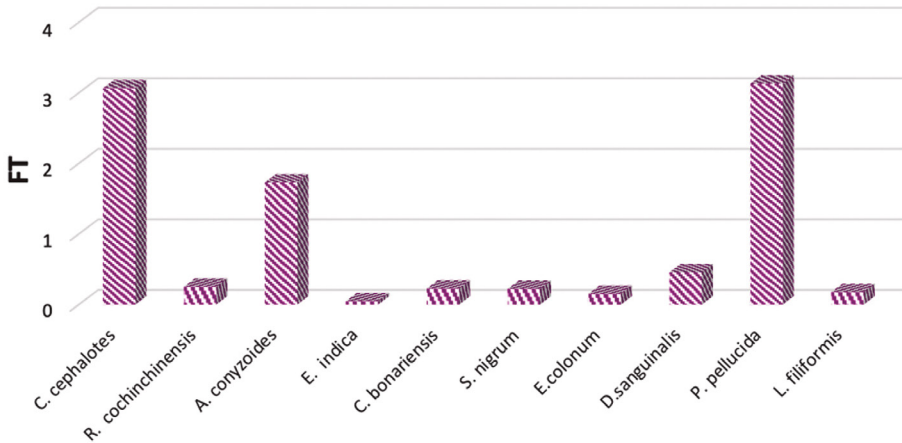


Figura 4. Factor de translocación de arvenses de reproducción sexual.

5.2 Arvenses de reproducción asexual

En las arvenses de reproducción asexual se observa que todas las especies concentraron la mayor cantidad de cadmio en sus raíces (Figura 5). La *C. verticillata* fue la especie que acumuló más cadmio en relación a las otras plantas, las cuales se mantuvieron en un rango de 23 a 42 mg kg⁻¹. Hay que considerar que, por tratarse de multiplicación asexual, los explantes usados podían variar en el contenido inicial de cadmio, aunque fueron multiplicados en el suelo con valores de cadmio no detectables en el laboratorio.

Los contenidos de cadmio en la parte aérea indican que *P. spiralis* (19,30 mg kg⁻¹), *G. macropoda* (18,30 mg kg⁻¹), *O. burmannii* (15,26 mg kg⁻¹), *I. grandifolia* (12,02 mg kg⁻¹) y *E. aureum* (11,61 mg kg⁻¹) retuvieron mayor cantidad de cadmio en los tejidos superiores en comparación a *C. diffusa* (3,81 mg kg⁻¹), *C. verticillata* (3,12 mg kg⁻¹), *P. Conjugatum* (2,66 mg kg⁻¹) e *I. purpurea* (2,53 mg kg⁻¹), Figura 5.

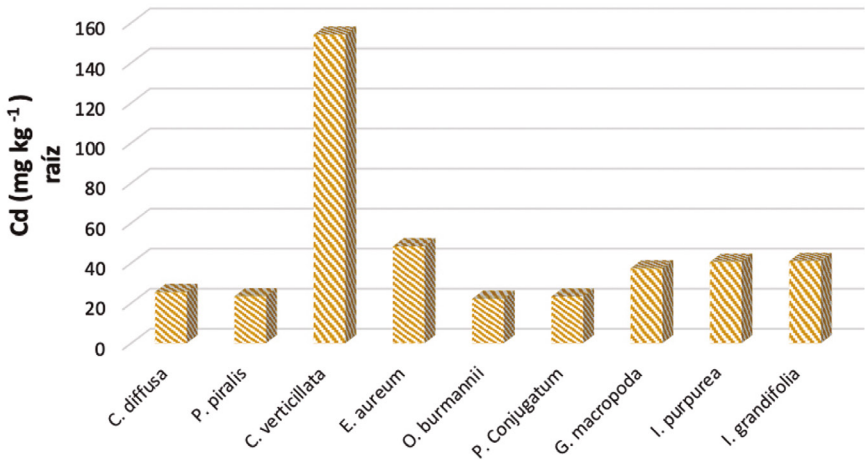
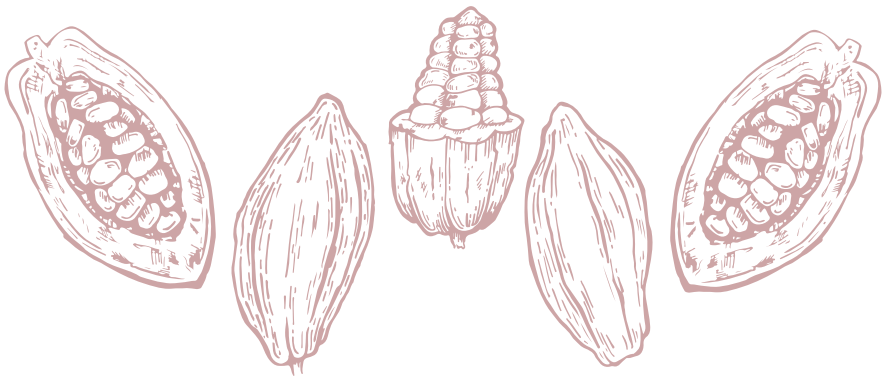


Figura 5a. Concentración de cadmio en la raíz de arvenses de reproducción asexual.



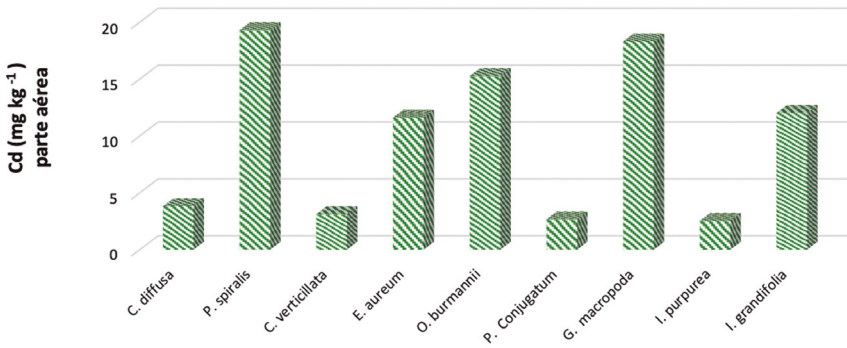


Figura 5b. Concentración de cadmio en la parte aérea de arvenses de reproducción asexual.

A través del factor de translocación (Figura 6), se evidencia que todas las arvenses de reproducción asexual funcionaron como fitoestabilizadoras del contaminante, debido a que presentaron un FT menor a 1.

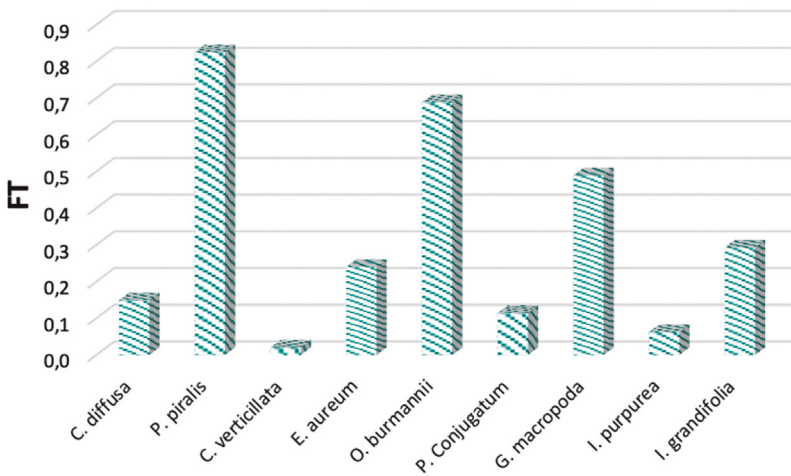


Figura 6. Factor de translocación en arvenses de reproducción asexual.

Los resultados de este estudio revelaron que las arvenses de reproducción sexual y asexual absorbieron y translocaron de diferente manera el metal. No obstante, el cadmio quedó retenido mayoritariamente en las raíces. Este comportamiento obedece exclusivamente a los mecanismos de fitoestabilización, que incluyen la precipitación de metales por exudados bacterianos y radiculares, la absorción y secuestro bacteriano de metales, y la adsorción de raíces por metales (Figura 7). En la fitoestabilización, la acumulación de metales en los tejidos de los brotes de las plantas no es deseable (Méndez Maier, 2008).

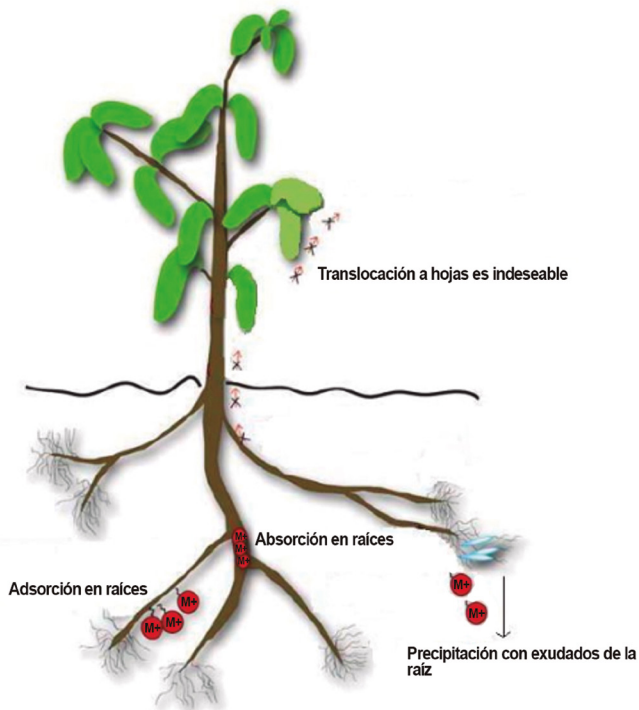


Figura 7. Mecanismos de fitoestabilización de metales
Fuente: Mendez y Maier (2008).



Las plantas ideales para la fitoestabilización deben: ser tolerantes a altas concentraciones de metales y tener tasas de translocación relativamente bajas; es decir que, restrinjan el transporte y entrada de cadmio a la biomasa aérea (Malik y Biswas, 2012), tengan una vida útil relativamente larga, requieran poco mantenimiento después de la siembra, produzcan alta cantidad de biomasa seca y cuenten con un sistema radicular largo y denso (Yang et al., 2016).

Las concentraciones obtenidas de las especies evaluadas, concuerdan con los valores reportados en otras arvenses utilizadas para remediar el cadmio en suelos contaminados (H. Zeng, Chen, Zhou, Zeng, 2019; Abe, Fukami y Ogasawara, 2008). Así, en el estudio que evaluó malezas para fitorremediar el cadmio en suelos agrícolas, se encontró que *A. conyzoides* actuó como hiperacumuladora del metal, mientras que, *E. indica* logró fitoestabilizarlo (Hamzah et al., 2016); esta información concuerda con los resultados antes mencionados en el estudio de invernadero realizado por el INIAP.

Finalmente, varios autores manifiestan que el proceso de extracción del cadmio y demás elementos pesados se realiza por las raíces de las especies acumuladoras, las cuales absorben el metal desde el sustrato. Esta absorción se realiza, ya sea, por el flujo del agua a través de los poros de la pared celular o mediante transporte activo a través de proteínas transportadoras de la membrana (Baxter et al., 2003). Incluso, las especies hiperacumuladoras poseen más proteínas transportadoras por gramo de peso seco que las plantas normales y se ha demostrado que tienen un alto grado de selectividad, acumulando solo metales específicos desde el suelo (Pilon-Smits y Pilon, 2002).

6. Conclusiones

- Los problemas de contaminación que existen actualmente requieren de implementación de acciones y tecnologías costo-efectivas, ambientalmente amigables y que puedan aplicarse a gran escala, para la mitigación de cadmio, tal es el caso de la fitorremediación.
- Existe la posibilidad de utilizar la fitorremediación en suelos cacaoteros empleando plantas adaptadas al ambiente de sombra de las plantaciones y que presentan afinidad por el cadmio, siendo necesario realizar este trabajo en coordinación con otras actividades de manejo, como el uso de enmiendas del suelo, fertilización y labores culturales oportunas.
- Las arvenses son plantas de rápido crecimiento, con bajas exigencias ambientales y alta capacidad de adaptación a condiciones adversas, parámetros que son fundamentales para desarrollar planes de fitorremediación en suelos agrícolas contaminados con metales pesados.
- La mayoría de las plantas arvenses evaluadas en el Ecuador, actuaron como fitoestabilizadoras de cadmio, mientras que, *P. pellucida*, *C. cephalotes* y *A. conyzoides* acumularon el metal en su biomasa aérea, pudiendo considerarlas como plantas hiperacumuladoras.

7. Recomendaciones

- Previo a utilizar un proceso de fitorremediación de un suelo, es necesario conocer sus características físicas, geológicas y químicas, las condiciones climáticas del sitio y la concentración del contaminante (cadmio), para posteriormente, elegir una o varias especies que hayan sido identificadas como fitoextractoras de cadmio y que se adapten a las condiciones climáticas y del suelo a descontaminar.
- Se recomienda continuar con trabajos de investigación en campo para determinar los efectos de la implementación de arvenses en la absorción de cadmio por plantas de cacao en sistemas agroforestales.
- Es necesario continuar con la exploración e identificación de plantas arvenses para establecer su capacidad de hiperacumulación o fitoestabilización de cadmio y de otros metales en suelos agrícolas.
- Implementar un plan de manejo y disposición adecuado de la biomasa de las plantas que se utilicen en la fitorremediación de metales.
- Identificar plantas fitorremediadoras y realizar estudios paralelos sobre temas como: las interacciones planta - microorganismos rizosféricos, los metabolitos responsables del fenómeno de quelación de metales pesados al interior de las plantas, así como, el papel que juegan ciertas enzimas en el proceso de fitorremediación. En la medida en que este conocimiento se incremente, será posible una aplicación más eficiente y a gran escala de esta tecnología.

8. Referencias

- Abe, T., Fukami, M., & Ogasawara, M. (2008). Cadmium accumulation in the shoots and roots of 93 weed species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54(4), 566–573. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00288.x>
- Barac, T. (2004). Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water soluble, volatile, organic pollutants. *Nat. Biotechnol.* 22:583–588.
- Baxter, I., Tchieu, J., Sussman, M. R., Boutry, M., Palmgren, M. G., Gribskov, M., . . . Axelsen, K. B. (2003). Genomic comparison of P-type ATPase ion pumps in Arabidopsis and rice. *Plant physiology*, 132(2), 618–628. <https://doi.org/10.1104/pp.103.021923>
- Cambrolle, J., Redondo-Gomez, S., Mateos-Naranjo, E., & Figueroa, M. E. (2008). Comparison of the role of two *Spartina* species in terms of phytostabilization and bioaccumulation of metals in the estuarine sediment. *Mar Pollut Bull*, 56(12), 2037–2042. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.08.008>
- Chandra, R., Kumar, V., Tripathi, S., & Sharma, P. (2018). Heavy metal phytoextraction potential of native weeds and grasses from endocrine-disrupting chemicals rich complex distillery sludge and their histological observations during in-situ phytoremediation. *Ecological Engineering*, 111, 143–156. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.007>
- Cheraghi, M., Lorestani, B., Khorasani, N., Yousefi, N., & Karami, M. (2011). Findings on the phytoextraction and phytostabilization of soils contaminated with heavy metals. *Biol Trace Elem Res*, 144(1–3), 1133–1141. <https://doi.org/10.1007/s12011-009-8359-0>
- Drozdova, I., Alekseeva-Popova, N., Dorofeyev, V., Bech, J., Belyaeva, A., & Roca, N. (2019). A comparative study of the accumulation of trace elements in Brassicaceae plant species with phytoremediation po-

- tential. *Applied Geochemistry*, 108, 104377. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104377>
- Gaur, N., Flora, G., Yadav, M., & Tiwari, A. (2014). A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Environ Sci Process Impacts*, 16(2), 180–193. <https://doi.org/10.1039/C3EM00491K>
- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. *Environ Pollut*, 133(2), 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.05.015>
- Gisbert, C., Clemente, R., Navarro-Aviñó, J., Baixauli, C., Ginér, A., Serrano, R., . . . Bernal, M. P. (2006). Tolerance and accumulation of heavy metals by Brassicaceae species grown in contaminated soils from Mediterranean regions of Spain. *Environmental and Experimental Botany*, 56(1), 19–27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.12.002>
- Hamzah, A., Hapsari, R. I., & Wisnubroto, E. I. (2016). Phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural land using indigenous plants. *International Journal of Environmental & Agriculture Research*, 2(1), 8–14.
- Hernández-Allica, J., Becerril, J. M., & Garbisu, C. (2008). Assessment of the phytoextraction potential of high biomass crop plants. *Environ Pollut*, 152(1), 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.002>
- Hrkic Ilic, Z., Pajevic, S., Borisev, M., & Lukovic, J. (2020). Assessment of phytostabilization potential of two *Salix L.* clones based on the effects of heavy metals on the root anatomical traits. *Environ Sci Pollut Res Int.*<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09228-8>
- Hu, R., Zhang, Z., Lin, L., Liao, M. a., Tang, Y., Liang, D., . . . Ren, W. (2019). Intercropping with hyperaccumulator plants decreases the cadmium accumulation in grape seedlings. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 69(4), 304–310. <https://doi.org/10.1>

080/09064710.2018.1564786

- Khaokaew, S., & Landrot, G. (2015). A field-scale study of cadmium phyto-remediation in a contaminated agricultural soil at Mae Sot District, Tak Province, Thailand: (1) Determination of Cd-hyperaccumulating plants. *Chemosphere*, 138, 883–887. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.108>
- Kidd, P., Barceló, J., Bernal, M. P., Navari-Izzo, F., Poschenrieder, C., Shilev, S., . . . Monterroso, C. (2009). Trace element behaviour at the root-soil interface: Implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 243–259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.013>
- Kumar Rai, P., & Singh, J. S. (2020). Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecol Indic*, 111, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106020>
- LeDuc, D. L., & Terry, N. (2005). Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 32(11-12), 514–520. <https://doi.org/10.1007/s10295-005-0227-0>
- Lin, L., Chen, F., Wang, J., Liao, M., Lv, X., Wang, Z., . . . Ren, W. (2018). Effects of living hyperaccumulator plants and their straws on the growth and cadmium accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings. *Ecotoxicol Environ Saf*, 155, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.072>
- Lin, L., Jin, Q., Liu, Y., Ning, B., Liao, M., & Luo, L. (2014a). Screening of a new cadmium hyperaccumulator, *Galinsoga parviflora*, from winter farmland weeds using the artificially high soil cadmium concentration method. *Environ Toxicol Chem*, 33(11), 2422–2428. <https://doi.org/10.1002/etc.2694>
- Lin, L., Shi, J., Liu, Q., Liao, M., & Mei, L. (2014b). Cadmium accumulation characteristics of the winter farmland weeds *Cardamine hirsuta* Linn. and

- Gnaphalium affine* D. Don. *Environ Monit Assess*, 186(7), 4051–4056. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3679-8>
- Macek, T., Kotrba, P., Svatos, A., Novakova, M., Demnerova, K., Mackova, M. (2007). Novel roles for genetically modified plants in environmental protection. *Trends in Biotechnology*. 26: 146–152.
- Malik, N., & Biswas, A. (2012). Role of higher plants in remediation of metal contaminated sites. *Sci. Rev. Chem. Commun*, 2(2), 141–146.
- Mendez, M. O., & Maier, R. M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments--an emerging remediation technology. *Environmental health perspectives*, 116(3), 278–283. <https://doi.org/10.1289/ehp.10608>
- Parmar, S., & Singh, V. (2015). Phytoremediation approaches for heavy metal pollution: a review. *J Plant Sci Res*, 2(2), 135.
- Pilon-Smits, E., & Pilon, M. (2002). Phytoremediation of Metals Using Transgenic Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21(5), 439–456. <https://doi.org/10.1080/0735-260291044313>
- Qin, L., Zu, Y., Zhan, F., Li, Y., Wang, J., Tang, Y., & Li, P. (2013). Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and maize in intercropping systems. *J Agro-Environ Sci*, 32(03), 471–477.
- Ramamurthy, A. S., & Memarian, R. (2012). Phytoremediation of Mixed Soil Contaminants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(2), 511–518. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0878-6>
- Rittmann, B. E. (2006). Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends Biotechnol*. 24: 261–266.
- Sarkar, M. D., Rahman, M. J., Jasim Uddain, M. D., Rojoni, R. N., & Subramaniam, S. (2019). METAL ACCUMULATION BEHAVIOR OF THE WEED SPECIES GROWING UNDER SOIL CADMIUM STRESS. *Pak. J. Bot*, 51(4),

1209-1214.

- Sas-Nowosielska, A., Kucharski, R., Malkowski, E., Pogrzeba, M., Kuperberg, J. M., & Krynski, K. (2004). Phytoextraction crop disposal--an unsolved problem. *Environ Pollut*, 128(3), 373-379. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.09.012>
- Suthar, V., Mahmood-ul-Hassan, M., Memon, K. S., & Rafique, E. (2013). Heavy-Metal Phytoextraction Potential of Spinach and Mustard Grown in Contaminated Calcareous Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(18), 2757-2770. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.812733>
- Villacieros, M. (2005). PCB rhizoremediation by *Pseudomonas fluorescens* F113 derivatives using a *Sinorhizobium meliloti* nod system to drive bph gene expression. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 2687-2694.
- Warren, G. P., & Alloway, B. J. (2003). Reduction of arsenic uptake by lettuce with ferrous sulfate applied to contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*, 32(3), 767-772. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.7670>
- Wu, M., Luo, Q., Liu, S., Zhao, Y., Long, Y., & Pan, Y. (2018). Screening ornamental plants to identify potential Cd hyperaccumulators for bioremediation. *Ecotoxicol Environ Saf*, 162, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.049>
- Yang, S.-x., Liao, B., Yang, Z.-h., Chai, L.-y., & Li, J.-t. (2016). Revegetation of extremely acid mine soils based on aided phytostabilization: A case study from southern China. *Science of The Total Environment*, 562, 427-434. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.208>
- Zeng, H., Chen, L., Zhou, X., & Zeng, Q. (2019). Cadmium accumulation in winter crops and the assessment of paddy soil phytoremediation in southern China. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(17), 17173-17182. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05054-9>

- Zeng, P., Guo, Z., Xiao, X., Cao, X., & Peng, C. (2018). Response to cadmium and phytostabilization potential of *Platycladus orientalis* in contaminated soil. *Int J Phytoremediation*, 20(13), 1337–1345. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1501338>
- Zhong, L., Lin, L., Liao, M., Wang, J., Tang, Y., Sun, G., . . . Ren, W. (2019). Phytoremediation potential of *Pterocypsela laciniata* as a cadmium hyperaccumulator. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(13), 13311–13319. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04702-4>
- Zubair, M., Shakir, M., Ali, Q., Rani, N., Fatima, N., Farooq, S., . . . Nasir, I. A. (2016). Rhizobacteria and phytoremediation of heavy metals. *Environmental Technology Reviews*, 5(1), 112–119. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1259358>



La “colección de guías sobre recomendaciones y buenas prácticas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio” es el resultado del esfuerzo de diferentes actores que, bajo la coordinación del Ministerio de Agricultura y Ganadería, han rescatado y sistematizado conocimientos y buenas prácticas, generadas por investigadores y técnicos nacionales e internacionales, útiles para prevenir y mitigar la contaminación por cadmio en la cadena del cacao. Las publicaciones que componen esta colección han sido elaboradas, publicadas y difundidas gracias al apoyo de las siguientes instituciones y organizaciones:

www.agricultura.gob.ec



Proyecto
Cadenas de valor
inclusivas y sostenibles



Plataforma Multiagencia
Cacao 2030-2050



Maximizando Oportunidades
en Café y Cacao en las Américas



@AgriculturaEc

AgriculturaEcuador

agricultura.ec

/AgriculturaEcuador

Dirección: Av. Eloy Alfaro N30-350 y Av. Amazonas

Código postal: 170516 / Quito-Ecuador. Teléfono: 593-2 396-0100

ISBN: 978-9942-22-526-9



9789942225269