

**MITIGACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO
MEDIANTE ENMIENDAS INORGÁNICAS**



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



sembramos
Futuro

Lenín



GUÍA 10

MITIGACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO MEDIANTE ENMIENDAS INORGÁNICAS

Dirigida a: técnicos, investigadores y agricultores.

AUTORES

Manuel Carrillo Z.^{1,2}; Wuellins Durango C.¹; Karina Peña S.¹; Carla Albán S.²

REVISIÓN PARES EXTERNOS

Eduardo Chávez³; Laurence Marchive⁴

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

²Universidad UTE-Sede Santo Domingo. Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.

³Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Facultad de Ciencias de la Vida. Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador. fchavez@espoL.edu.ec.

⁴Laboratoire Geosciences Environnement Toulouse (GET); Observatoire Midi-Pyrénées (OMP). 14 avenue Edouard Belin - 31400. Toulouse, France. laurence.maurice@ird.fr ; <https://orcid.org/0000-0003-3482-3892>

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:

Carrillo, M., Durango, W., Peña, K. & Albán, C. (2021). Guía 10: Mitigación de cadmio en el suelo mediante enmiendas inorgánicas. *Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador* (1.ª ed., pp. 1-33). 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: 978-9942-22-523-8





ÍNDICE

1. Introducción	1
2. ¿Qué son las enmiendas minerales?	3
3. ¿Cómo actúan las enmiendas minerales?	5
4. Resultados de investigaciones locales	16
5. Ejemplo de aplicación de enmiendas inorgánicas en suelos cacaoteros	22
5.1 Previo a la siembra	22
5.2 Aplicación en plantaciones establecidas	24
5.3 Cálculo de dosis de CaCO_3 para corregir el pH	25
6. Conclusiones	28
7. Recomendaciones	29
8. Referencias	30

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>	12
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Disminución de la disponibilidad de cadmio en el suelo por precipitación química causada por la aplicación de calcita (CaCO_3).</i>	6
---	---

Figura 2.	<i>Disminución de la disponibilidad de cadmio por la adsorción de partículas minerales del suelo.</i>	6
Figura 3.	<i>Estructura de la zeolita con porosidad regular.</i>	7
Figura 4.	<i>Isotermas de adsorción total (A) y específica (B) de cadmio en enmiendas orgánicas y minerales.</i>	8
Figura 5.	<i>Concentración de cadmio en el suelo a dos profundidades (0 – 5 y 6 – 10 cm) y en el cotiledón de cacao, después de dos años de acción de las enmiendas minerales. Cerecita, Santa Elena.</i>	17
Figura 6.	<i>Concentración de cadmio en el suelo a dos profundidades (0 – 5 y 6 – 10 cm) y en el cotiledón de cacao, después de dos años de acción de las enmiendas minerales. Canuto, Manabí.</i>	18
Figura 7.	<i>Concentración de cadmio en el suelo a dos profundidades (0 – 5 y 6 – 10 cm) y en el cotiledón de cacao, después de dos años de acción de las enmiendas minerales. Santa Rosa, El Oro.</i>	19
Figura 8.	<i>Cambios en el A) pH del suelo y B) contenido de cadmio (mg vaso⁻¹) extraído por plantas de arroz, sembradas en 100 g de suelo procedente de cuatro provincias cacaoteras y contaminadas con 3 mg kg⁻¹ de cadmio.</i>	20
Figura 9.	<i>A) Aplicación superficial de enmiendas con boleadora y B) Incorporación de enmienda previa a la siembra de cacao.</i>	23
Figura 10.	<i>Aplicación de calcita (cal o carbonato de calcio, CaCO₃) A) Alrededor de la planta, en plantación nueva de cacao y B) Al voleo, en plantación joven de cacao; para disminuir la disponibilidad de cadmio en suelos.</i>	24
Figura 11.	<i>Variación en el pH de un suelo altamente tamponado, por la aplicación de dosis crecientes de calcita.</i>	26

1. Introducción

La presencia de cadmio (Cd) en el suelo y almendras de cacao en Ecuador fue citada antes del año 2000 por varios investigadores, quienes encontraron concentraciones de cadmio en suelos y almendras mayores a las permitidas por el Codex Alimentarius (Mite et al., 2010). Posteriormente, en un estudio a nivel nacional realizado por Argüello et al., en el año 2019, encontraron que el 40% de las muestras de almendras de cacao de 560 sitios excedieron el valor de $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ de cadmio aceptado actualmente por exportadores.

La absorción y acumulación de cadmio por las plantas de cacao depende de la cantidad, disponibilidad y movilidad del elemento. Ciertas enmiendas tienen la capacidad de inmovilizar los metales y pueden ser adicionadas al suelo para reducir su disponibilidad, formando complejos o actuando como adsorbentes de iones metálicos.

Entre los factores del suelo más importantes, relacionados con la inmovilización del cadmio tenemos el pH. Así, al incrementar el pH, el cadmio es removido y adsorbido por los coloides del suelo. El principal mecanismo para la inmovilización del cadmio es por adsorción, precipitación y/o formación de complejos (Hamid et al., 2019).

El cadmio es un metal pesado, que cuando está presente en cantidades elevadas en el organismo es considerado tóxico (Hewit y Smith, citados por Adriano, 1986), siendo los alimentos una vía importante de ingreso de este metal, desde el suelo hasta el hombre. Muchos países dependientes económicamente de la agricultura y venta de sus productos ven sus negocios en riesgo por las exigencias de países importadores en cuanto a la calidad e inocuidad de los productos.

Esta guía dirigida a técnicos, investigadores y agricultores, introduce el uso de enmiendas minerales para la remediación de suelos contaminados con cadmio, a partir de trabajos de investigación realizados en otros países con características de suelos diferentes a las del Ecuador y presenta resultados de estudios nacionales.



2. ¿Qué son las enmiendas minerales?

Son sustratos minerales que son aplicados al suelo para mejorar sus características o propiedades, y, en este caso, ayudan en la inmovilización de metales pesados, reduciendo la absorción por las plantas, y, en algunos casos para mejorar el rendimiento del cultivo (Sharma y Nagpal, 2017). Es necesario identificar las enmiendas adecuadas según las características físicas y químicas de los suelos, las condiciones climáticas del lugar y los requerimientos de los cultivos.

Las enmiendas son usadas para la corrección de problemas de salinidad y acidez del suelo. A su vez, para mitigar *in situ* el problema de metales pesados como el cadmio, es recomendado corregir el pH del suelo, lo que contribuye a disminuir su movilidad por precipitación o adsorción; sin embargo, queda la duda si, con la re-acidificación del suelo que puede suceder por efecto de la fertilización, lavado de cationes, por el mismo cultivo, entre otros, este metal puede volver a estar disponible en la fase acuosa del suelo (Hamon, McLaughlin y Cozens, 2002).







3. ¿Cómo actúan las enmiendas minerales?

Se aplica una enmienda al suelo para aumentar la proporción del metal en la fase sólida del suelo por medio de la precipitación química, por ejemplo: con la cal (CaCO_3), por adsorción (Zeolita) y por fijación del metal (retención fuerte en los óxidos como FeO), disminuyendo de este modo su solubilidad (Oeste et al., 2002; Basta y McGowen, 2004). El objetivo de esta inmovilización no es remover el metal contaminante, sino reducir su disponibilidad y reactividad.

La precipitación es un fenómeno natural reversible y sucede en la parte líquida del suelo (solución del suelo), donde el Cd^{+2} se encuentra en forma disponible (libre y fácilmente absorbido por las raíces de las plantas) y que tras la aplicación de CaCO_3 , se pueden formar precipitados como CdCO_3 (Olivita), acompañado de la liberación de Ca^{+2} , que puede permanecer en el suelo o ser absorbido por las plantas en la fase acuosa (Figura 1).

La adsorción es un fenómeno natural reversible y sucede a nivel de la superficie de las partículas sólidas del suelo (Figura 2); consiste en el proceso de atracción y retención de átomos, moléculas o iones por intermedio de uniones químicas o físicas (Curi et al., 1993) dependientes de factores como el potencial redox, contenido de arcilla, materia orgánica, óxidos de calcio, magnesio, etc. (Kumpiene, Lagerkvist y Maurice, 2008; Merdy, Gharbi y Lucas, 2009).

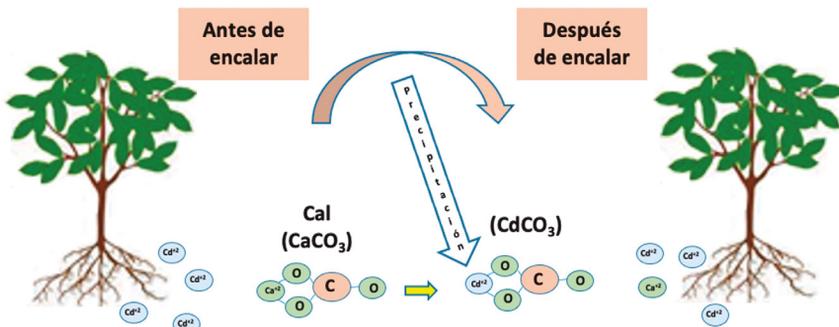


Figura 1. Disminución de la disponibilidad de cadmio en el suelo por precipitación química causada por la aplicación de calcita (CaCO_3).

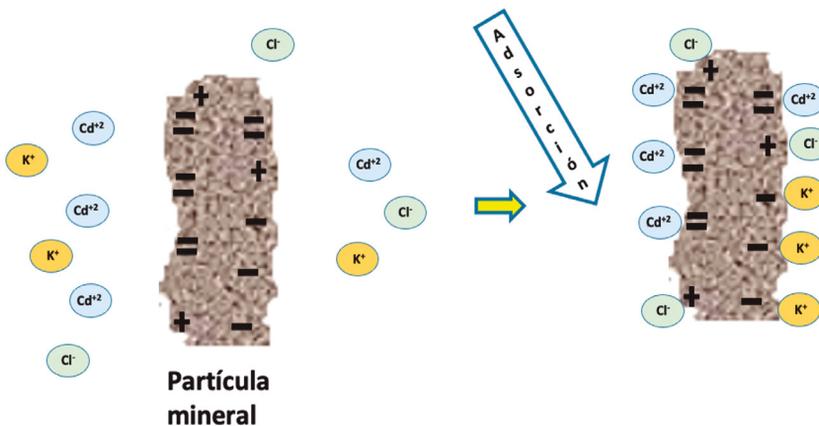


Figura 2. Disminución de la disponibilidad de cadmio por la adsorción de partículas minerales del suelo.

Entre las enmiendas minerales más utilizadas sobresalen las siguientes:

Zeolitas

La capacidad de adsorción de las zeolitas depende de su volumen poroso y del diámetro de los poros (de ahí el nombre de tamiz molecular), esto permite que sean utilizadas como adsorbentes tanto en procesos de purificación como de separación (Aguar y Cardoso, 2002). Estos aluminosilicatos cristalinos tienen una estructura tridimensional compuesta por un conjunto de cavidades ocupadas por iones y moléculas de agua con considerable libertad de movimiento, permitiendo el intercambio iónico e hidratación reversibles (Figura 3).

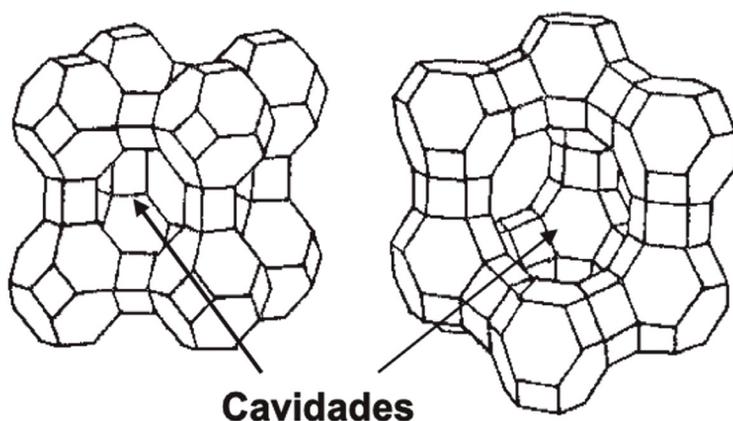
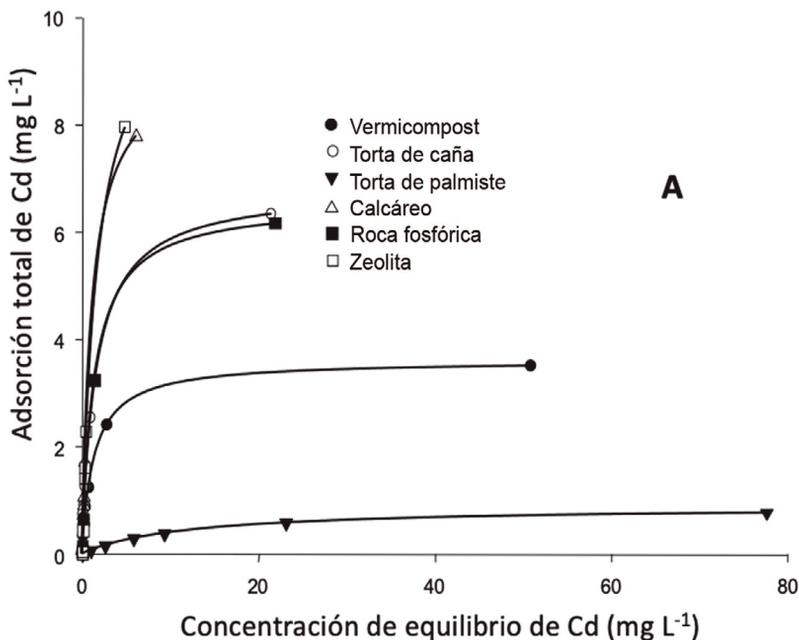


Figura 3. Estructura de la zeolita con porosidad regular.

Fuente: Aguar y Cardoso (2002).

Carrillo et al. (2013), se propusieron evaluar el efecto de aplicaciones de enmiendas orgánicas y minerales sobre la adsorción total¹, no específica² y específica³ del cadmio en suelos de textura arcillosa y pH variable, y encontraron que la calcita y zeolita, mostradas en la isoterma de adsorción total (Figura 4A), resultan en una excelente técnica de remediación de suelos. Ambas muestran una curva con declividad muy acentuada para bajas concentraciones de la solución de equilibrio lo que indica una alta afinidad entre el elemento con la enmienda. Sin embargo, la zeolita tiende a liberar cadmio (desorción) debido a la presencia de algunos sitios con menor fuerza de retención, pero este fenómeno es poco significativo comparado con el cadmio adsorbido (Figura 4B), lo cual resulta globalmente en un alto poder de adsorción.



¹Adsorción total: es el enriquecimiento de un componente en la interfase sólido – líquido.

²Adsorción no específica: es el componente adsorbido que no está fijo en un lugar específico de la superficie; por ello es libre de trasladarse en la interfase (desorción).

³Adsorción específica: es el componente que es adsorbido en forma fija en la superficie (1 - 2).

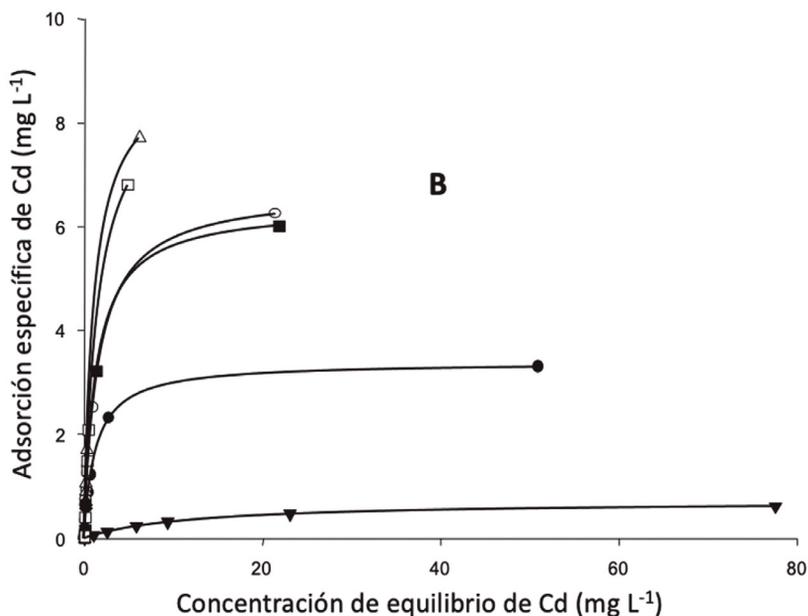


Figura 4. *Isotermas de adsorción⁴ total (A) y específica (B) de cadmio en enmiendas orgánicas y minerales.*

Fuente: Carrillo et al. (2013).

Calcitas

La aplicación de calcita es considerada la técnica más antigua para disminuir la movilidad de metales del suelo y se puede usar productos como CaCO_3 , Ca(OH)_2 (Chaney et al., 2009; Liu et al., 2019; Li et al., 2019), CaSO_4 (Zhang et al., 2019; Qayyum et al., 2017), entre otros. Existe discrepancia en la forma de actuar del CaCO_3 , indicándose que el efecto puede ser debido al fenómeno de adsorción, precipitación o hidrólisis según los autores Martínez y Motto (1999).

⁴Isoterma de adsorción: describe el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie a una temperatura constante.

Varios trabajos de investigación se han realizado evaluando el uso de estas enmiendas para remediación de suelos con presencia de niveles elevados de cadmio (Accioly et al., 2004; Gray et al., 2005). En la Figura 4, los resultados indican que la cal es una excelente alternativa para remediación de suelos ácidos, presentando elevada fuerza de retención de cadmio, incluso mayor que la zeolita. Sin embargo, el efecto del encalado varía según el poder tampón de cada suelo y requiere repetir las aplicaciones cada dos o tres años, para mantener el pH adecuado (Sharma y Nagpal, 2017).

En la Tabla 1 se presenta algunos resultados encontrados en investigaciones realizadas a nivel mundial, que muestran efectos variados del uso de enmiendas minerales para la disminución de la disponibilidad de cadmio en suelos, debido especialmente a la variabilidad del pH, Materia Orgánica del Suelo (MOS) y concentración del metal.

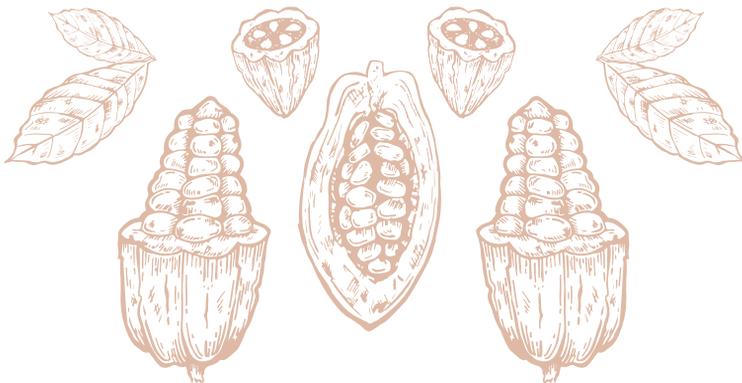




Tabla 1. Enmiendas minerales evaluadas en diferentes países, bajo características químicas de suelos contrastantes y sus efectos sobre la disponibilidad del cadmio.

País	Enmienda	Dosis	pH suelo	Cd suelo mg kg ⁻¹	Textura %	MOS %	
China	Mineral de borosilicato (Turmalina)	1%, 2,5%, 5% w/w	7,45	4,62	Arcilla: 20 Limo: 46 Arena: 34	2,2	
China	Bentonita	0,5%, 1%, 3%, 5% w/w	8,2	0,15	Arcilla: 21,8 Limo: 57,4 Arena: 20,8	3,3	
China	Hidroxiapatita (HA) Roca fosfórica (PR) Superfosfato Triple (TSP) Fosfato Diamónico (DAP)	2500 mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹ de suelo	5,42	0,6 1,5	-	-	
China	Sepiolita Caliza	0,2%, 0,4%, 0,8%	5,41	19,3	Arcilla: 19,7 Limo: 46,1 Arena: 34,2	-	
Irán	Zeolita natural + Biocarbones (paja de trigo, paja de maíz, pulpa de regaliz, cáscara de arroz, estiércol de oveja)	0% 3% 6% w/w 3% w/w	7,60	0,5	-	1,20	

Continuación Tabla 1

Efecto suelo	Efecto planta	Referencia
Disminución de la concentración de cadmio extraíble con DTPA con dosis crecientes.	Reducción en la acumulación de cadmio en brotes y raíces de lechuga, siendo la dosis de 5% la más efectiva.	(Wang, Wang, Li, Sun & Xu, 2014)
Reducción de la fracción intercambiable de cadmio en 42,5% y aumento de la fracción residual en 54,3%.	La bentonita redujo la concentración de cadmio en las raíces en un 31,3% y en los brotes a 44,3% de <i>Oryza sativa</i> L.	(Sun, Li, Xu, Liang & Wang, 2015)
HA promovió el mayor aumento de pH del suelo en comparación con las otras enmiendas. La adición de fosfato al suelo disminuyó significativamente el cadmio ligado a intercambiables, óxidos y orgánicos, y aumentó significativamente en la fracción residual.	La aplicación de las diferentes enmiendas de P incrementó la biomasa en los brotes y raíces de <i>B. campestris</i> L. Dichas enmiendas también disminuyeron las concentraciones de cadmio en las raíces y brotes de la planta, probablemente a través de la coprecipitación de fosfato metálico insoluble en los suelos.	(Chen, Xu, Ma & Yang, 2007)
Valores de pH del suelo y la capacidad de intercambio catiónico significativamente aumentados, lo que resultó en una reducción de la fracción intercambiable.	Inhibición de la absorción y acumulación de cadmio en plantas de arroz.	(Zhou et al., 2014)
Al aumentar los niveles de aplicación de zeolita de 0 a 6%, la concentración de cadmio ligado a la fracción intercambiable, carbonato, óxido de Fe-Mn y orgánicas se redujo significativamente, mientras que el contenido residual se incrementó. Se observaron cambios en las fracciones químicas de cadmio y su transformación en formas más estables con la aplicación de todos los biocarbones.	-	(Boostani, Hardie, Najafi-Ghiri & Khalili, 2017)

Continuación Tabla 1

País	Enmienda	Dosis	pH suelo	Cd suelo mg kg ⁻¹	Textura %	MOS %	
China	Carbonato de calcio Roca fosfórica Roca fosfórica activada con ácido oxálico, harina de hueso	0,1%, 0,5%, 1,2%, 4% (w/w)	5,17	6,01	-	-	
China	Sulfato de calcio + Óxido de hierro	90% 10%	6,16 0,23	0,46 0,22	Arcilla: 18 Limo: 48 Arena: 37 Arcilla: 18 Limo: 49 Arena: 33	-	
Taiwán	Compost (CO) Óxido de zinc ZnSO ₄ ·HO ₂ (ZN) Carbonato de calcio (CA) (CA + ZN)	40 t ha ⁻¹ 50 kg ha ⁻¹ 10 y 20 t ha ⁻¹ 50 kg ha ⁻¹ 40 t ha ⁻¹	S. arenoso 1: 6,0 S. arenoso 2: 5,9 S. arcilloso 1: 5,4 S. arcilloso 2: 5,1	9,80 32,0 1,14 2,23	-	-	
Bélgica	(CA + CO) Biocarbón + Carbonato de calcio	(1%, 5% y 10%) (5%)	6,57	24,0	-	-	



Continuación Tabla 1

Efecto suelo	Efecto planta	Referencia
<p>La aplicación de fosfato y carbonato de calcio al suelo contaminado cambió los valores de pH del suelo y transformó la especiación química del cadmio de una fracción relativamente efectiva (intercambiable y unida a carbonato) a una fracción más estabilizada (unida a materia residual/orgánica).</p>	-	<p>(Huang, Su, Rizwan, Zhu & Hu, 2016)</p>
<p>Los resultados indicaron que la aplicación de la enmienda disminuyó significativamente la concentración de cadmio en la solución del suelo.</p>	<p>La aplicación de la enmienda disminuyó la acumulación de cadmio en los brotes y los granos de arroz.</p>	<p>(Zhai et al., 2020)</p>
<p>El valor del pH de los suelos se incrementó significativamente después de los tratamientos. Los análisis demostraron una disminución significativa en la concentración de la solución del suelo con DTPA y EDTA extraíbles en suelos tratados con carbonato de calcio, carbonato de calcio mezclado con ZnO y compost.</p>	<p>Las enmiendas redujeron significativamente la concentración y absorción total de cadmio en los órganos vegetativos del trigo.</p>	<p>(Lee, Lai & Chen, 2004)</p>
<p>El pH del suelo aumentó por efecto de la naturaleza alcalina del biocarbón. Con las dosis de 1%, 5% y 10% de biocarbón el cadmio extraído con CaCl₂ se redujo en 14%, 44% y 71% respectivamente.</p>	<p>En comparación con el encalado, el tratamiento con biocarbón al 10% demostró ser igualmente eficaz para reducir la concentración de cadmio, en los brotes de <i>Brassica napus</i> L., pero la producción de biomasa se triplicó como resultado de la mejora de la fertilidad del suelo.</p>	<p>Houben, Evrard & Sonnet, 2013)</p>



4. Resultados de investigaciones locales

En el país se han realizado trabajos de investigación a nivel de campo para disminuir la presencia de cadmio en el cotiledón (grano sin cáscara) de cacao; entre estos tenemos el estudio conducido entre el 2010 y 2013 por el Departamento de Suelos de la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP, donde se evaluaron por dos años en fincas de las provincias de Santa Elena, Manabí y El Oro, algunas enmiendas minerales edáficas, en dosis de 1 t ha^{-1} , las variaciones de las concentraciones de cadmio semi-total del suelo (extraído con agua regia) y cadmio total en el cotiledón de cacao (digestión nítrico-perclórica), se indican a continuación:

Para la provincia de Santa Elena, en un suelo con pH de 7,9 (ligeramente alcalino), con 1% de materia orgánica y textura Franco limosa, cultivado con cacao variedad CCN-51, se encontró que todas las enmiendas (Figura 5) provocaron una reducción del contenido de cadmio en el suelo mayor al 25% en la profundidad de 0 a 5 cm, mayor al 15% en la profundidad de 6 a 10 cm y mayor al 9,5% en el cotiledón. La aplicación de CaSO_4 , presentó las menores concentraciones de cadmio en el suelo en las dos profundidades y en el cotiledón, seguido por la zeolita y carbonato de magnesio (MgCO_3). En el cotiledón se consiguió disminuir la concentración del cadmio en un 45,6% con la enmienda de CaSO_4 en relación al testigo.



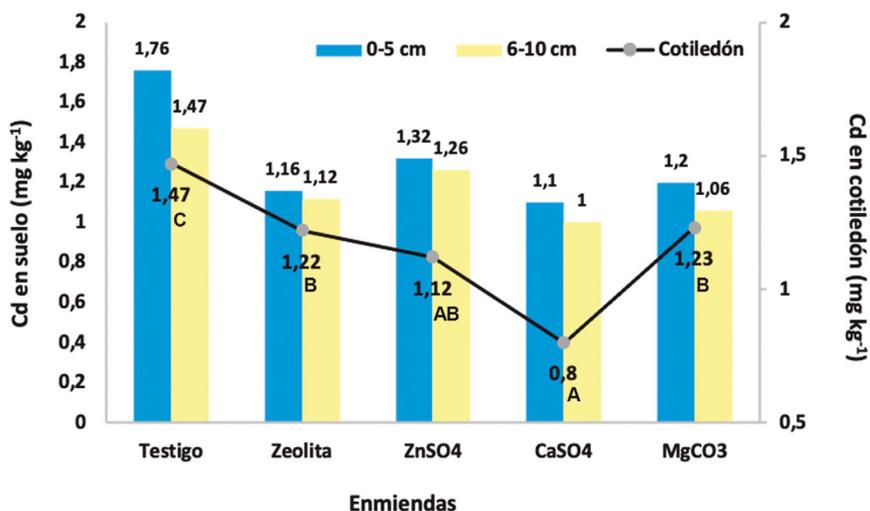


Figura 5. Concentración de cadmio en el suelo a dos profundidades (0 - 5 y 6 - 10 cm) y en el cotiledón de cacao, después de dos años de acción de las enmiendas minerales. Cerecita, Santa Elena.

Fuente: INIAP (2014).

En el ensayo paralelo realizado en la provincia de Manabí, se evaluaron tres enmiendas minerales (MgCO_3 , ZnSO_4 y CaCO_3), en un suelo con pH de 6,8 (neutro), 2,1% de materia orgánica y de textura Franco arcillo limosa, cultivado con cacao tipo Nacional. Las tres enmiendas redujeron el contenido de cadmio del suelo en las dos profundidades. La mayor reducción de cadmio disponible en el suelo fue con la aplicación CaCO_3 con un 57,8 y 58,8% a las dos profundidades (Figura 6). Pero la reducción más alta de cadmio en el cotiledón correspondió a la aplicación de ZnSO_4 con un 41,2%.

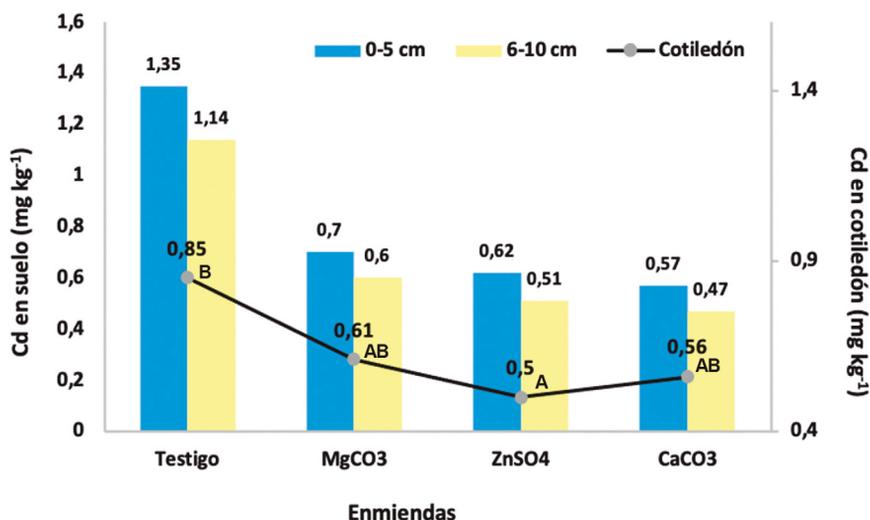


Figura 6. Concentración de cadmio en el suelo a dos profundidades (0 - 5 y 6 - 10 cm) y en el cotiledón de cacao, después de dos años de acción de las enmiendas minerales. Canuto, Manabí.

Fuente: INIAP (2014).

En la provincia de El Oro, se utilizaron cinco enmiendas minerales (CaCO₃, MgCO₃, dolomita cálcica, Ca,Mg(CO₃)₂, ZnSO₄ y Zeolita) en un suelo con pH de 6,2 (ligeramente ácido), 2,3% de materia orgánica y textura Franco arcillosa. La mayor reducción de cadmio en el suelo en relación al testigo, correspondió a la aplicación de CaCO₃, con un 40,2 y 41,2% en las dos profundidades 0-5 y 6-10 cm, respectivamente (Figura 7). La enmienda que dio una menor concentración de cadmio en el cotiledón fue la dolomita que disminuyó en un 52,8%.



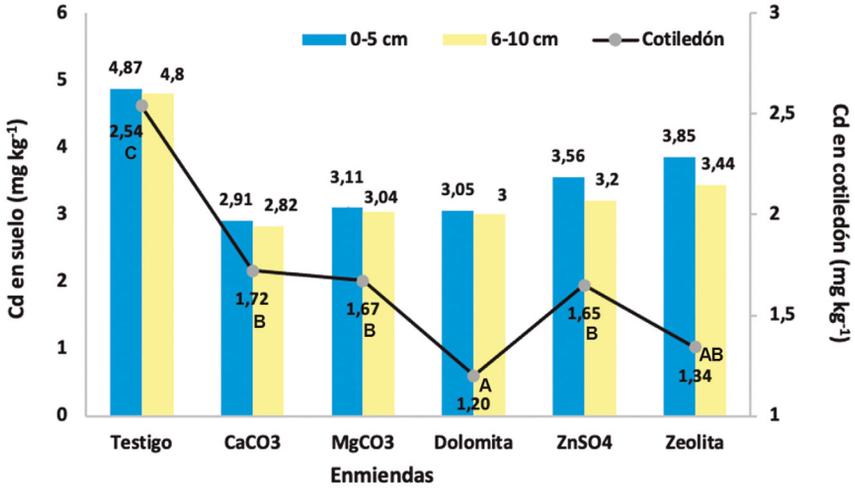


Figura 7. Concentración de cadmio en el suelo a dos profundidades (0 - 5 y 6 - 10 cm) y en el cotiledón de cacao, después de dos años de acción de las enmiendas minerales. Santa Rosa, El Oro.
Fuente: INIAP (2014).

En una investigación realizada por Albán (2017) utilizando cuatro suelos tropicales, se determinó que la aplicación de CaCO₃, independientemente del valor de pH inicial, elevó los pHs alcanzando la máxima respuesta (incremento de pH) en los suelos de Manabí y Esmeraldas, cuando se aplicó la dosis de 10 t ha⁻¹ (Figura 8A).



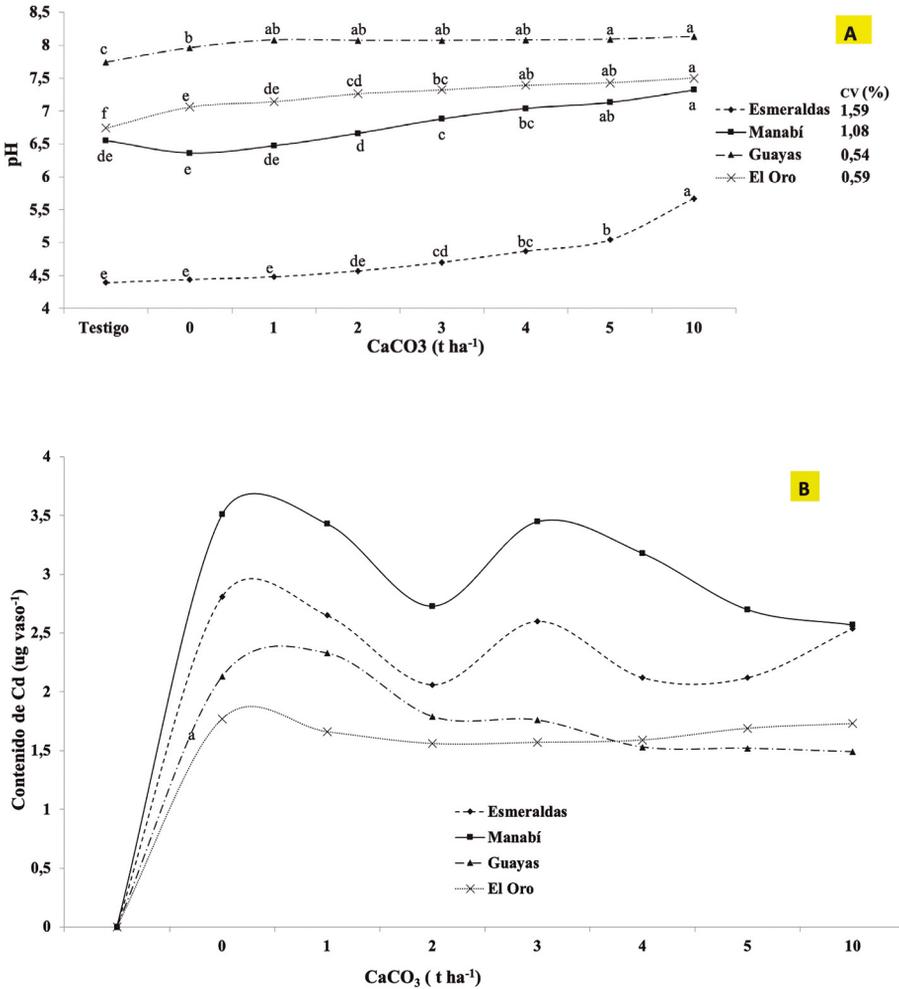


Figura 8. Cambios en el **A)** pH del suelo y **B)** contenido de cadmio (mg vaso^{-1}) extraído por plantas de arroz, sembradas en 100 g de suelo procedente de cuatro provincias cacaoteras y contaminadas con 3 mg kg^{-1} de cadmio.

Fuente: INIAP (2014).

La respuesta de las plantas de arroz, utilizadas como indicadoras, mostraron que las aplicaciones de CaCO_3 y los cambios en el pH del suelo provocaron una disminución en la cantidad de cadmio biodisponible en el suelo, registrando tal reducción desde la primera dosis de enmienda en tres de los cuatro suelos encalados, a excepción del suelo de la provincia del Guayas que incrementó su biodisponibilidad (Figura 8B). Para los cuatro suelos, la mejor dosis y con la que se registró la mayor disminución en la absorción de cadmio fue con 2 t ha^{-1} de CaCO_3 .

Estos resultados confirman la hipótesis de que el encalado no es recomendable para todos los tipos de suelos y que por la heterogeneidad de estos, sus respuestas son variables y en algunos casos contraproductivas.

5. Ejemplo de aplicación de enmiendas inorgánicas en suelos cacaoteros

5.1 Previo a la siembra

Previo a la siembra de una nueva plantación, es necesario realizar un análisis químico de suelos para determinar las propiedades fisicoquímicas y contenido de cadmio, y, si es posible, evaluar también la presencia del metal en almendras de cacao de una plantación vecina. En el caso de estar presente el cadmio en el ambiente cacaotero, será necesario realizar trabajos de mitigación como la aplicación de enmiendas minerales.

Es preferible aplicar la enmienda mineral al suelo antes de la siembra y del inicio de la época lluviosa. El tamaño de partículas de la enmienda es importante; mientras menor sea el tamaño, menos tiempo se necesitará para remediar el área contaminada y probablemente actuará a mayor profundidad dentro del suelo. Así también, en el caso de los carbonatos, a mayor pureza, menor será la dosis a aplicar.

La frecuencia de aplicación será variable de un suelo a otro y dependerá del valor de cadmio encontrado, pH y fertilidad del suelo, tratando de no provocar desequilibrios nutricionales.

En esta etapa se deben hacer las correcciones necesarias para que el suelo presente las condiciones físicas y químicas adecuadas para el desarrollo del sistema radicular de las plantas. En caso de requerirse remover el suelo, la enmienda se debe aplicar antes de esta actividad de acuerdo a lo recomendado por un personal técnico y si no es necesaria la remoción, este producto deberá ser esparcido en superficie.

Al momento de la aplicación se debe tratar de cubrir el 100% del área, esparciendo con boleadora (Figura 9A) o manualmente, para posteriormente realizar el pase del arado (Figura 9B) con la intención de incorporar la enmienda y procurar que el efecto sea homogéneo hasta la profundidad deseada que generalmente está entre los 0,10 o 0,20 m.



Figura 9. A) Aplicación superficial de enmiendas con boleadora y B) Incorporación de enmienda previa a la siembra de cacao.

Se debe aplicar sobre toda la superficie del suelo ya que las raíces al desarrollarse se expanden horizontalmente y cubren toda el área disponible. Posteriormente se podrá hacer aplicaciones localizadas, enfocándose en las zonas de mayor actividad radicular.

5.2 Aplicación en plantaciones establecidas

El tener plantas de cacao establecidas en campo, imposibilita el ingreso de maquinaria para incorporar las enmiendas en el suelo. Por lo tanto, se recomienda usar enmiendas de tamaño fino menores a 200 mesh⁵ o de 0,074 mm, más aún si el suelo es de textura arcillosa, para mejorar la migración vertical de la enmienda.

Para plantaciones menores de dos o tres años, la aplicación deberá ser localizada en la zona de mayor concentración de raíces absorbentes, que generalmente están ubicadas en las tres cuartas partes externas de la copa del árbol (Figura 10A). En plantaciones jóvenes y adultas de más de tres años, se podrá aplicar en la calle a lo largo de la hilera, tratando de cubrir toda el área (Figura 10B), a esa edad las raíces se encuentran traslapadas.

En plantaciones donde se cuente con agua de riego, se recomienda realizar un riego para mejorar el movimiento de la enmienda hacia y dentro del suelo.

A)



Figura 10. Aplicación de calcita (cal o carbonato de calcio, CaCO_3) **A)** Alrededor de la planta, en plantación nueva de cacao y **B)** Al voleo, en plantación joven de cacao; para disminuir la disponibilidad de cadmio en suelos. Manabí, 2020.

⁵número de mesh: especifica el tamaño mínimo de partícula que será retenido en un tamiz



Figura 10. Aplicación de calcita (cal o carbonato de calcio, CaCO_3) **A)** Alrededor de la planta, en plantación nueva de cacao y **B)** Al voleo, en plantación joven de cacao; para disminuir la disponibilidad de cadmio en suelos. Manabí, 2020.

5.3 Cálculo de dosis de CaCO_3 para corregir el pH

Como se indicó anteriormente, valores de pH bajos provocan mayor movilidad del cadmio en el suelo. Por lo tanto, es necesario llevar el pH a un valor adecuado para que el cadmio se encuentre precipitado como CdCO_3 o adsorbido a las partículas sólidas de la enmienda, disminuyendo así su biodisponibilidad.

Las cantidades de enmiendas necesarias para corregir el pH son variables debido a la alta heterogeneidad de los suelos. Las dosis pueden fluctuar entre valores elevados para suelos de textura arcillosa y contenidos altos de materia orgánica o dosis bajas para suelos de textura arenosa y bajos en materia orgánica.

Para determinar la cantidad correcta de la enmienda a usar y llegar a un valor de pH determinado, es necesario realizar una prueba de reactividad del CaCO_3 (Figura 11) que consta de siete etapas: 1) determinación del pH inicial del suelo, 2) determinar la humedad a capacidad de campo, 3) planificar

la prueba, 4) aplicación de diferentes dosis de la enmienda, 5) incubación aproximadamente por un mes con la humedad constante, 6) análisis del pH resultante y 7) interpretación de resultados.

En la práctica se pone a incubar cinco fundas con tres repeticiones como mínimo, conteniendo una masa conocida de suelo del cual se desea corregir el pH, por ejemplo 1 kg, y en cada funda se agregan dosis crecientes de enmienda equivalentes a dosis de 0 hasta 5 t ha⁻¹ de calcita (CaCO₃). Siguiendo los pasos antes mencionados, después de un mes de incubación se determinará el pH de la solución del suelo y con los promedios se realizará una curva de respuesta (Figura 11). Utilizando el programa Excel y calculando los valores de Y y R², donde Y es el valor de pH que se requiere, el R² nos indica el grado de confianza al utilizar la ecuación y las probabilidades de repetibilidad de los resultados encontrados. X será la cantidad de CaCO₃ necesaria para llegar al pH deseado del suelo.

En la Figura 11 se presenta los resultados del trabajo de incubación de un suelo con bajo poder tampón, con las respuestas a las dosis crecientes de CaCO₃ y se consigue obtener la ecuación: $Y = 5,0786 + 0,4512x - 0,0078x^2$ con un valor de R² de 0,988.

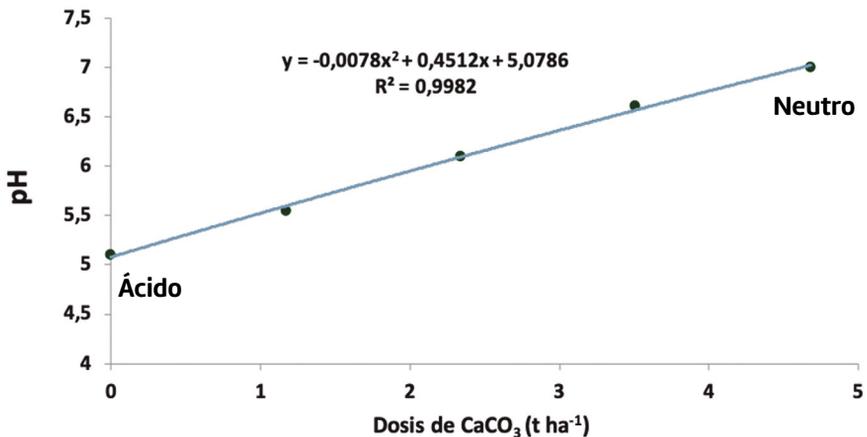


Figura 11. Variación en el pH de un suelo altamente tamponado, por la aplicación de dosis crecientes de calcita.

En la ecuación hay que determinar el valor de X que corresponde a la cantidad de CaCO_3 necesaria para alcanzar un valor determinado de pH del suelo. Suponiendo que se necesite llegar a un pH de 6, la ecuación sería:

$$6 = -0,0078X^2 + 0,4512X + 5,0786$$

$$0 = -0,0078X^2 + 0,4512X + 5,0786 - 6$$

$$0 = -0,0078X^2 + 0,4512X - 0,921$$

$$A = -0,0078 \quad B = 0,4512 \quad C = -0,921$$

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$X = \frac{-0,4512 \pm \sqrt{(0,4512)^2 - 4(-0,0078)(-0,921)}}{2(-0,0078)}$$

$$X = \frac{-0,4512 \pm \sqrt{0,204 - 0,029}}{-0,016}$$

$$X = \frac{-0,4512 \pm \sqrt{0,175}}{-0,016}$$

$$X = \frac{-0,4512 \pm 0,418}{-0,016}$$

$$X = \frac{-0,4512 + 0,418}{-0,016} = 2,075 \text{ t ha}^{-1} \text{ de CaCO}_3$$

6. Conclusiones

- Se conocen alternativas de enmiendas minerales que tienen la capacidad de adsorber el cadmio con la consiguiente reducción en la disponibilidad del elemento en el suelo y en la almendra de cacao; que, para su uso y aplicación, es necesario conocer las características físicas y químicas de los suelos.
- La aplicación de CaCO_3 provoca incrementos del pH en suelos ácidos, provocando la precipitación del cadmio en forma de CdCO_3 y disminuyendo la absorción por las plantas de cacao; sin embargo, hay que tener cuidado en suelos con pH cercanos a la neutralidad o mayores, donde la aplicación podría provocar problemas en la nutrición del cultivo.
- Las aplicaciones de enmiendas minerales se pueden realizar en forma aislada o en combinación con enmiendas orgánicas o dentro de un plan de remediación, con uso de plantas fitoextractoras.

7. Recomendaciones

- Realizar estudios para determinar los efectos de las aplicaciones de enmiendas solas y combinadas sobre la concentración de cadmio en almendras y el rendimiento del cacao a nivel de campo.
- Evaluar residuos de la industria como enmiendas del suelo para reducir la disponibilidad de cadmio en los suelos.
- Previo a la aplicación de enmiendas minerales, realizar un análisis físico y químico del suelo que proveerá de información para decidir la mejor alternativa.
- Si bien no existe una solución ideal específica para enmendar suelos con presencia de cadmio y mitigar su absorción al 100%, se pone a consideración las siguientes fuentes minerales y sus consideraciones generales que pueden disminuir su absorción a nivel parcial:

Fuente	Consideraciones para su uso	Duración de la enmienda
Carbonato de calcio (CaCO ₃) Carbonato de magnesio (MgCO ₃)	Recomendada especialmente para suelos ácidos y bajos contenidos de Ca o Mg, en su orden.	Probablemente un año, de acuerdo a lo que dura el efecto tampón del suelo, los cambios en la acidez del suelo por el cultivo, la fertilización, lluvia, etc.
Zeolita	Recomendada especialmente para suelos pobres, livianos (elevado contenido de arena), baja capacidad de intercambio catiónico o porcentaje de materia orgánica.	Deberá ser anual, sola o junto con la fertilización.
Sulfato de zinc (ZnSO ₄)	Recomendado especialmente en suelos de pH alto, cercano a la neutralidad o mayor, con deficiencia de Zn.	Deberá ser anual, con aplicaciones edáficas como quelato y puede ser también foliar.

8. Referencias

- Accioly, A.M.A., Siqueira, J.O. e Moreira, F.M.S. (2004). Amenizacão do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camadulensis* cultivadas em solo contaminado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28(4):775-783. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000400017>
- Adriano, D. C. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. New York, Springer-Verlag. 533 p.
- Aguiar, de P.M.R. e Cardoso, N. A. (2002). Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*. 25:1145-1154. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422002000700015>
- Alban, S.K.E. (2017). Variación en la disponibilidad de cadmio en suelos con distinto valor de pH. Tesis de Grado para obtención de Título de Ingeniera Ambiental, Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Argüello, D., Chávez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*, 649, 120-127.
- Basta, N.T., and McGrowen, S.L. (2004). Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. *Environmental Pollution*. 127:73-82. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00250-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00250-1)
- Boostani, H. R., Hardie, A. G., Najafi-Ghiri, M., & Khalili, D. (2017). Investigation of cadmium immobilization in a contaminated calcareous soil as influenced by biochars and natural zeolite application. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(11), 2433-2446. <https://doi:10.1007/s13762-017-1544-3>
- Carrillo-Zenteno, M.D., Freitas, R.C.A., Fernandes, R.B.A., Fontes, M.P.F. and

- Jordao, C.P. (2013). Sorption of Cadmium in Some Soil Amendments for In Situ recovery of Contaminated Soils. *Water Air Soil Pollut.* 224:1484. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1418-8>
- Chen, S., Xu, M., Ma, Y., & Yang, J. (2007). Evaluation of different phosphate amendments on availability of metals in contaminated soil. *Ecotoxicol Environ Saf*, 67(2), 278–285. <https://doi:10.1016/j.ecoenv.2006.06.008>
- Curi, N.; Iturri, L.J.O.; Kämpf, N. Moniz, A.C. e Fontes, F.L.E. (1993). Vocabulario de ciencia do solo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. 90 p.
- Hamid, Y., Tang, L., Sohail, M.I., Cao, X., Hussain, B., Aziz, M.Z., Usman, M., He, Z.-L., 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.
- Hamon, R.E., McLaughlin, M.J. and Cozens, G. (2002). Mechanisms of attenuation of metal availability in situ remediation treatments. *Environ. Sci. Technol.* 36:3991–3996. <https://doi.org/10.1021/es025558g>
- Houben, D., Evrard, L., & Sonnet, P. (2013). Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass and Bioenergy*, 57, 196–204. <https://doi:10.1016/j.biombioe.2013.07.019>
- Huang, G., Su, X., Rizwan, M. S., Zhu, Y., & Hu, H. (2016). Chemical immobilization of Pb, Cu, and Cd by phosphate materials and calcium carbonate in contaminated soils. *Environ Sci Pollut Res Int*, 23(16), 16845–16856. <https://doi:10.1007/s11356-016-6885-9>
- INIAP (2014). Informe anual del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas de la Estación Experimental Tropical Pichilingue.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A. and Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu,

Pb and Zn in soil using amendments – A review. *Waste Management*. 215–225.

- Lee, T. M., Lai, H. Y., & Chen, Z. S. (2004). Effect of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long-term contaminated soils. *Chemosphere*, 57(10), 1459–1471. <https://doi:10.1016/j.chemosphere.2004.08.094>
- Liu, Y., Tang, Y., Zhong, G. and Zeng, H. (2019). A comparison study on heavy metal/metalloid stabilization in Maozhou River sediment by five types of amendments. *Journal of Soils and Sediments*. 19: 3922–3933. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02310-w>
- Li, Y., Cui, S., Chang, S.X. and Zhang, Q. (2019). Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*. 19:1393–1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>
- Martínez, C.E. and Motto, H.L. (1999). Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. *Environmental Pollution*. 107:153–158. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00111-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00111-6)
- Merdy, P., Gharbi, L.T., Lucas, Y. (2009). Pb, Cu and Cr interactions with soil: sorption experiments and modeling. *Colloids Surf Physicochem Eng. Asp.* 347:192–199. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.04.004>
- Mite, F., Carrillo, M., & Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador. XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo. Santo Domingo, 17–19 de Noviembre Del 2010. Santo Domingo.
- Oeste, L., Lexmond, T.M. e Van Riemsdijk, W.H. (2002). Metal immobilization in soils using synthetic zeolites. *Journal of Environmental Quality*. 31: 813–821. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.8130>
- Qayyum, M.F., Rahman, M.Z., Ali, S., Rizwan, M., Naeem, A., Maqsood,

- M.A., Khalid, H., Rinklebe, J., Ok, Y.S. (2017). Residual effects of monoammonium phosphate, gypsum and elemental sulfur on cadmium phytoavailability and translocation from soil to wheat in an effluent irrigated field. *Chemosphere*, 174:515–523. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.006>
- Sharma, A. and Nagpal, A.K. (2017). Soil amendments: a tool to reduce heavy metals uptake in crops for production of safe food. *Rev. Environ Sci. Biotechnol.* <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9451-0>
- Sun, Y., Li, Y., Xu, Y., Liang, X., & Wang, L. (2015). In situ stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite. *Applied Clay Science*, 105–106, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.031>
- Wang, B., Wang, C., Li, J., Sun, H., & Xu, Z. (2014). Remediation of alkaline soil with heavy metal contamination using tourmaline as a novel amendment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1281–1286. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.05.017>
- Zhai, W., Zhao, W., Yuan, H., Guo, T., Hashmi, M. Z., Liu, X., & Tang, X. (2020). Reduced Cd, Pb, and As accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by a combined amendment of calcium sulfate and ferric oxide. *Environ Sci Pollut Res Int*, 27(2), 1348–1358. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06765-9>
- Zhang, D., Du, G., Chen, D., Shi, G., Rao, W., Li, X., Jiang, Y., Liu, S., Wang, D. (2019). Effect of elemental sulfur and gypsum application on the bioavailability and redistribution of cadmium during rice growth. *Science of the Total Environment*. 657: 1460–1467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.057>
- Zhou, H., Zhou, X., Zeng, M., Liao, B. H., Liu, L., Yang, W. T., ... Wang, Y. J. (2014). Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil. *Ecotoxicol Environ Saf*, 101, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.001>



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:



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: 978-9942-22-523-8



9789942225238