

## Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión

Jhon N. Huaraca-Fernandez<sup>1</sup>, Lourdes Pérez-Sosa<sup>1</sup>, Leonor S. Bustinza-Cabala<sup>1</sup> y Noé B. Pampa-Quispe<sup>1,2\*</sup>

(1) Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Carretera Central Km 19.5, Ñaña, Lima-Perú (correo-e: [jhonhuaraca@upeu.edu.pe](mailto:jhonhuaraca@upeu.edu.pe), [lourdesperez@upeu.edu.pe](mailto:lourdesperez@upeu.edu.pe), [leonorb@upeu.edu.pe](mailto:leonorb@upeu.edu.pe))

(2) Departamento Académico de Ingeniería, Universidad Nacional de Barranca, Av. Luzuriaga Mz J, La Florida, Lima-Perú (correo-e: [npampa@unab.edu.pe](mailto:npampa@unab.edu.pe))

\* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Dic. 30, 2019; Aceptado Mar. 2, 2020; Versión final Abr. 26, 2020, Publicado Ago. 2020

### Resumen

El presente artículo es una revisión sobre el uso de las enmiendas orgánicas en la inmovilidad del cadmio en suelos agrícolas. El cadmio (Cd), se ha convertido en un problema global desde la industrialización y la implementación de prácticas agrícolas intensivas. En la actualidad, sigue siendo un problema ambiental omnipresente ya que es un metal altamente tóxico que persiste en el suelo por largos periodos debido a su mínima pérdida microbiana y química. Actualmente, existe conciencia pública sobre las implicaciones de los suelos agrícolas contaminados con cadmio y por ello ha aumentado el interés en desarrollar y/o aplicar técnicas rentables, amigables y respetuosas con el ambiente como la inmovilización *in situ* utilizando enmiendas orgánicas. Se concluye que las enmiendas orgánicas tienen el valor potencial para reducir la captación de Cd por las plantas y mejorar la inmovilización por procesos de adsorción, intercambio iónico, complejación y precipitación.

*Palabras clave:* biochar; biodisponibilidad; compost; estiércol; suelo; vermicompost

## Organic amendments in the immobilization of cadmium in contaminated agricultural soils: a review

### Abstract

This article is a review of the use of organic amendments in the immobility of cadmium in contaminated agricultural soils. Cadmium (Cd) has become a global problem since industrialization began and since the implementation of intensive agricultural practices. Cadmium remains as an omnipresent environmental problem since it is a highly toxic metal that persists in the soil for long periods due to its minimal microbial and chemical loss. Currently, there is public awareness about the implications of agricultural soils contaminated with cadmium. Therefore, there is increased interest in developing and applying cost-effective, friendly, and environmentally friendly techniques such as *in situ* immobilization using organic amendments. It is concluded that organic amendments have the potential value to reduce Cd uptake by plants and improve immobilization by adsorption, ion exchange, complexation and precipitation.

*Keywords:* biochar; bioavailability; compost; manure; soil; vermicompost

## INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es un metal pesado sin funciones biológicas esenciales, que causa gran preocupación en el medio ambiente debido a su toxicidad para los animales y los seres humanos; las concentraciones de Cd pueden acumularse en plantas que no son tóxicas para ellas, pero son tóxicas para los animales y las personas que los consumen. Entre todos los metales pesados tóxicos, el Cd es el más móvil y biodisponible (Gramlich *et al.*, 2017; Gramlich *et al.*, 2018; Lewis *et al.*, 2018). En los seres humanos, la exposición al Cd se ha relacionado con la disfunción renal, la osteoporosis y varios tipos de cáncer (Åkesson *et al.*, 2014). La presencia de Cd en el suelo se produce tanto de fuentes naturales como antropogénicas (Pan *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2017).

En la agricultura, la principal fuente de este metal es la aplicación de fertilizantes que contienen fosfatos, estos hacen que el Cd se acumule en suelos agrícolas y por lo tanto aumente el riesgo de su transferencia a través de la cadena alimentaria (Roberts, 2014; Salmanzadeh *et al.*, 2017). Hoy en día, se necesitan urgentemente técnicas factibles para remediar los suelos contaminados con Cd y con ello; garantizar la inocuidad de los alimentos y proteger la salud pública (Guo *et al.*, 2018a). Se han investigado varias técnicas de remediación de suelos en experimentos de campo y en ambientes controlados, como el lavado de suelos, la fitorremediación, la solidificación, la estabilización, la excavación y electrorremediación; estas técnicas de remediación emplean mecanismos de contención, extracción/eliminación e inmovilización para reducir los efectos de contaminación a través de procesos físicos, químicos, biológicos, eléctricos y térmicos (Tajudin *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018a). Sin embargo, la mayoría de estas técnicas pueden producir efectos secundarios al aumentar la movilidad de los metales y cambiar las propiedades físico-químicas del suelo.

Para los suelos agrícolas contaminados con cadmio, la técnica de inmovilización química *in situ* denominada también como estabilización *in situ* implica la aplicación de enmiendas para inmovilizar metales a través de diversas reacciones biológicas y químicas, representa una solución más realista, rentable, simple, con rápida implementación y sostenibilidad ambiental (Hu *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2017), dado que de forma rutinaria a nivel mundial cada día se generan grandes volúmenes de desechos orgánicos de la agricultura, de las industrias de ganado y aves de corral, estos materiales pueden proporcionar grandes cantidades para tratar extensas áreas de tierras agrícolas (Cruz-Paredes *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2017). Esta técnica consiste en atrapar o inmovilizar el Cd en el suelo mediante la introducción de agentes estabilizadores como las enmiendas, para solidificar el suelo o convertir las fracciones de contaminantes móviles; es decir, formas solubles e intercambiables en precipitados y/o restos fuertemente absorbidos (Tajudin *et al.*, 2016).

La mayoría de las enmiendas orgánicas disminuyen el Cd disponible para las plantas, principalmente, a través de la adsorción, sorción, precipitación y los procesos de formación de complejos (Shaheen *et al.*, 2014). Asimismo, las enmiendas orgánicas forman un recubrimiento sobre una materia particulada especialmente en las capas superficiales y sub superficiales del suelo y podrían actuar como aglomerantes metálicos. Estas enmiendas se caracterizan por la presencia de lignina, celulosa, taninos y carbonatos que aumentan la capacidad natural del suelo para retener metales pesados (Sebastian y Prasad, 2013).

La inmovilización química no elimina ni extrae contaminantes del suelo, se basa en la movilidad/solubilidad de los metales pesados y sus concentraciones en el agua de los poros del suelo, disminuyendo su concentración drásticamente, lo que minimiza su posible transporte a plantas, microorganismos y aguas (Tajudin *et al.*, 2016). El presente artículo aborda la revisión sobre el empleo de las enmiendas orgánicas en la inmovilidad del cadmio en suelos agrícolas contaminados.

## EL ELEMENTO CADMIO Y BIODISPONIBILIDAD

El cadmio es un metal pesado tóxico sin funciones biológicas esenciales para las plantas, animales y humanos, se encuentra principalmente como un catión divalente, que forma complejos con otros aniones. Está clasificado en la 7ª posición entre 20 toxinas, debido a su alta solubilidad y naturaleza tóxica (Gramlich *et al.*, 2018; Hamid *et al.*, 2018). Se emplea ampliamente en baterías, pinturas, pantallas de televisión, paneles solares, láseres, cosméticos y en los fertilizantes. Comparado con otros elementos pesados, se absorbe fácilmente por las raíces y se transporta hacia los brotes de las plantas (Yang *et al.*, 2017), y de ésta se incorpora a la cadena alimenticia (Guo *et al.*, 2018b). La toxicidad del cadmio en las plantas causa retraso en el crecimiento, clorosis, enrojecimiento de las puntas de las raíces y conduce a su muerte (Guo *et al.*, 2008). Los cultivos más tolerantes son: girasol (*Helianthus annuus*), pak choi (*Brassica chinensis* L.), Mostaza de la India (*Brassica juncea*), *Noccaea caerulea* (*Thlaspi caerulea*), *Arabidopsis thaliana*, *Arabis paniculata*, *Arabis gemmifera*, *N. goesingensis* (*T. goesingense*) y *N. praecox* (*T. praecox*).

El cadmio se libera al medio ambiente en cantidades variables por actividades naturales y antropogénicas. Los estudios realizados muestran que la contribución total de las fuentes naturales a la contaminación de Cd en el suelo representa el 10% en comparación a las fuentes antropogénicas (Cloquet *et al.*, 2006). Entre las principales fuentes naturales de Cd a la atmósfera se encuentran las rocas progenitoras, las erupciones volcánicas, los incendios forestales, el polvo arrastrado por el viento y la pulverización marina (Liu *et al.*, 2013). Las fuentes antropogénicas liberan al medio ambiente más del 90% de Cd y las fuentes principales son el uso de fertilizantes fosfatados, detergentes, combustión de combustibles fósiles, trabajos metalúrgicos, desechos de la industria del cemento, lodos de depuración, desechos municipales e industriales, minería, fundición y procesamiento de minerales (Cloquet *et al.*, 2006).

El término biodisponibilidad se define como “la parte de la concentración total de una sustancia química disponible para las células receptoras (plantas, microorganismos, etc.)”. Por ello, el Cd biodisponible es la fracción del Cd total en el agua intersticial y las partículas del suelo que está fácilmente disponible para los organismos receptores (Khan *et al.*, 2017). La parte de la concentración de Cd del suelo disponible para las plantas se denomina Cd biodisponible. Esta concentración biodisponible es la principal preocupación por su absorción y acumulación en las plantas. Por ello, en cualquier estudio, se deben medir tanto la concentración total como la concentración biodisponible. Los principales factores que influyen en la biodisponibilidad de Cd en el suelo son: el potencial de hidrógeno (pH) del suelo, la presencia de materia orgánica y la capacidad de intercambio iónico (tabla 2). Estos factores influyen en la solubilidad de los compuestos de Cd y la liberación de Cd en la solución del suelo o afectan la capacidad de las plantas para absorber el Cd del suelo (Sarwar *et al.*, 2010).

El pH es uno de los factores más importantes, que controla la absorción de cadmio, a medida que el pH disminuye, aumenta la absorción del Cd por las plantas. Es decir, que existe una relación lineal indirecta. Al incrementar el pH en el suelo, el cadmio es removido y adsorbido por los coloides del suelo, restringiendo su movilidad y biodisponibilidad. Del mismo modo, Liu *et al.* (2019) como Shen *et al.* (2019) declararon que las enmiendas orgánicas, especialmente, las dosis altas, aumentan el pH del suelo y el contenido de materia orgánica, y en consecuencia disminuyen la biodisponibilidad de Cd del suelo.

La materia orgánica es un componente reactivo importante en suelos capaces de retener cationes metálicos (He *et al.*, 2015). La aplicación de materia orgánica a un suelo contaminado puede reducir la capacidad de extracción y la biodisponibilidad de Cd, Zn y Pb (Houben *et al.*, 2012). En estudios realizados por He *et al.* (2015) se muestra que la presencia de 5% y 10% de biochar disminuye las concentraciones extraíbles de Cd, Zn y Pb durante los siguientes 56 días. Hao *et al.* (2012) informaron que el estiércol de cerdo disminuyen significativamente las concentraciones de Cd y Zn en el girasol. Los residuos orgánicos como estiércol de granja, estiércol de aves de corral, estiércol de cerdo, compost, biosólidos, lodo de alcantarillado, desechos domésticos, paja y una amplia gama de enmiendas orgánicas combinadas pueden utilizarse como enmiendas del suelo para reducir la disponibilidad de Cd (Sarwar *et al.*, 2010; Hao *et al.*, 2012).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es un fenómeno basado en la presencia de cargas en las arcillas y demás partículas coloidales de los suelos. Por medio de estas cargas, los iones que son liberados de minerales que han sido sometidos a procesos de meteorización o provenientes de compuestos orgánicos en descomposición, del agua de lluvia o de riego y de los fertilizantes, pueden ser absorbidos por las partículas del suelo y bajo esta condición son retenidos en forma relativamente inmóvil. Asimismo, He *et al.* (2015) afirman que la capacidad de intercambio catiónico es un factor importante que influye en la movilidad de Cd en el suelo y que este elemento está fuertemente ligado a las superficies de minerales de arcilla, óxidos de Fe, Al y humus, disminuyendo así su movilidad en suelos arcillosos.

Los suelos que presentan alta capacidad de intercambio catiónico (ricos en materia orgánica y con elevados contenidos de arcilla), por ejemplo: suelos humíferos y arcillosos, dan como resultado la inmovilización de los metales pesados por quedar estos retenidos por adsorción al complejo coloidal del suelo (Cortes Páez *et al.*, 2016).

## **ABSORCIÓN DEL CADMIO POR LAS PLANTAS**

Las plantas toman Cd del agua intersticial del suelo. Si bien la mayor parte del Cd en los suelos generalmente se asocia con los coloides del suelo (>98%), con solo una pequeña fracción del total está disponible para la absorción. Al manipular las cantidades de sitios de unión de cationes disponibles en los suelos, la cantidad de Cd disuelto se puede reducir y disminuye su absorción por las plantas. Esto se puede lograr con el cambio del pH del suelo (encalado) o mediante la introducción de sitios de unión adicionales (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

Las enmiendas orgánicas (aserrín, biochar, turba, compost, etc.) pueden reducir efectivamente la solubilidad del Cd y su absorción por las plantas en suelos altamente contaminados. El Cd en el suelo forma quelatos con materia orgánica reduciendo su fitodisponibilidad (Singh y Prasad, 2014). Khan *et al.* (2018) investigaron los efectos de diferentes enmiendas orgánicas (biochar de madera dura, bagazo, cáscara de arroz y residuos de mazorca de maíz) sobre la biodisponibilidad de Cd en suelos contaminados por metales pesados y su posterior bioacumulación en tomate y pepino. Entre las enmiendas utilizadas, el biochar de madera dura fue la más efectiva para reducir la biodisponibilidad de Cd, en donde se observaron disminuciones significativas en la absorción de este elemento por el tomate (24-30%) y pepino (36-54%). Se demostró que a mayor tasa de aplicación de enmiendas orgánicas, es más efectiva para mitigar la movilidad de Cd y la bioacumulación en plantas cultivadas en suelos que contienen Cd.

Las investigaciones de Yu *et al.* (2018); Liu *et al.* (2019) y Rehman *et al.* (2019) mostraron que la aplicación de enmiendas al suelo disminuyen los niveles de Cd en las plantas. Además, señalan que una combinación de enmiendas orgánicas podría ayudar a reducir aún más los niveles de Cd, en comparación con las enmiendas orgánicas individuales. Este progreso de mitigación podría atribuirse a los cambios en la translocación y distribución de Cd entre los tejidos de las plantas y la inhibición de la biodisponibilidad de Cd en el suelo a través de la alteración de las propiedades del suelo (pH, CIC, MO). Las enmiendas orgánicas combinadas facilitaron la transformación del Cd del suelo de la forma biodisponible a la forma de Cd inmovilizado, y por lo tanto disminuyeron los niveles de Cd en las plantas, esto se debe a que las enmiendas orgánicas contienen ácidos húmicos (AH). Debido a su carácter anfifílico, los AH forman estructuras parecidas a micelas en condiciones neutras a ácidas, que son útiles en agricultura, para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. Las AH tienen composiciones indefinidas que varían según el origen, el proceso de obtención y los grupos funcionales presentes en sus estructuras, como quinonas, fenoles y ácidos carboxílicos (De Melo *et al.*, 2016).

Los estudios realizados por Nieto-Velázquez *et al.* (2011) muestran claramente la existencia de interacciones entre los ácidos húmicos y los metales pesados. Estas interacciones pueden ser de utilidad para la inmovilización de metales pesados en aguas y suelos como estrategia de remediación de la contaminación. Las enmiendas orgánicas contienen sustancias húmicas, estas pueden reducir la movilidad y la bioaccesibilidad del Cd en el suelo y, por lo tanto, inhibir su absorción por las plantas (Yu *et al.*, 2018).

Las tablas 1 y 2 muestran respectivamente, los factores edáficos y del cultivo que determinan la absorción de cadmio en las plantas y la relación que genera la bioacumulación de cadmio en los granos y frutos de las plantas, respectivamente.

Tabla 1: Factores edáficos y del cultivo que determinan la absorción de Cadmio en las plantas (Adaptado MINAGRI, 2018).

Factores	Efecto en la absorción de Cadmio por las plantas.
<i>Factores edáficos</i>	
pH	La absorción se incrementa cuando disminuye el pH (suelos ácidos).
Cantidad de cadmio	La absorción se incrementa con la concentración de Cd, relación directa.
Micronutrientes	Puede incrementar (deficiencia de micronutrientes) o decrecer (concentración adecuada de micronutrientes) la absorción.
Macronutrientes	Puede incrementar (deficiencia de macronutrientes) o decrecer (concentración adecuada de macronutrientes) la absorción.
Temperatura	Alta temperatura incrementa la absorción.
<i>Factores del cultivo</i>	
Especies y cultivares	Las hortalizas absorben más que las raíces, las raíces absorben más que los cereales, y los cereales absorben más que los frutos.
Tejido de la planta	Hoja > grano > fruto y raíces comestible.
Edad de la hoja	Hojas viejas > hojas jóvenes.

Tabla 2: Relación de problemas que genera la bioacumulación de cadmio en los granos y frutos de las plantas (Adaptado MINAGRI, 2018)

<i>Problemas que generan la bioacumulación de Cadmio en las plantas.</i>	<i>Medidas de mitigación propuestas.</i>
Suelos de baja fertilidad natural.	Fertilizar el suelo con adecuado contenido de nutrientes.
Bajo contenido de materia orgánica en el suelo.	Incrementar la materia orgánica (> 4%MOS).
Baja concentración de Zn y Mn.	Incorporación de cantidades adecuadas de zinc y manganeso.
Suelos arenosos.	Evitar sembrar en suelos arenosos, de preferencia utilizar suelos francos a arcillosos.
Aguas salinas (2mS/cm) con altos contenidos de cloruros.	Tratar el agua de riego para bajar su salinidad y disminuir los cloruros.
Suelos fuertemente ácidos.	Encalar los suelos hasta niveles moderadamente neutros. El aumento en el pH del suelo mejora la disociación de H <sup>+</sup> de los grupos funcionales tales como hidroxilo, fenólico, carbonilo y carboxilo, mejorando así la afinidad por los iones de cadmio.

## ENMIENDAS ORGÁNICAS PARA ESTABILIZAR EL CADMIO EN SUELOS

Una enmienda orgánica es cualquier material orgánico, incluido el compost, los abonos animales, desechos orgánicos, biofertilizantes residuos de cultivos o acondicionadores sintéticos del suelo que se incorporan al suelo o se aplican en la superficie para mejorar el crecimiento de la planta (Hueso-González *et al.*, 2018). Las enmiendas orgánicas tienen el potencial para afectar significativamente el comportamiento de los metales en el suelo alterando su solubilidad, disponibilidad, transporte y distribución espacial. Muchos estudios han demostrado claramente que la aplicación de las enmiendas orgánicas en suelos contaminados con metales tienen el potencial de remediación *in situ* por inmovilización de metales, reduciendo así la disponibilidad de metal para las plantas (Mohamed *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2011). Las enmiendas orgánicas cuentan con una estructura porosa, alto pH, alto CIC y grupos funcionales que contienen oxígeno, estas características influyen en las propiedades fisicoquímicas del suelo y ayudan en la inmovilización del Cd (Park *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2012).

Asimismo, las enmiendas orgánicas pueden usarse como sumideros para reducir la biodisponibilidad del metal en suelos y sedimentos contaminados a través de su efecto sobre la adsorción, complejación, intercambio iónico (Tabla 3), precipitación, reducción y volatilización del metal (Park *et al.*, 2011). La retención del metal inducida por la enmienda orgánica se atribuye a un aumento en la carga superficial y la presencia de compuestos de unión de metal (Clark *et al.*, 2007). La inmovilización de Cd mediante enmiendas ofrece un menor transporte y biodisponibilidad en el suelo (Fig. 1).

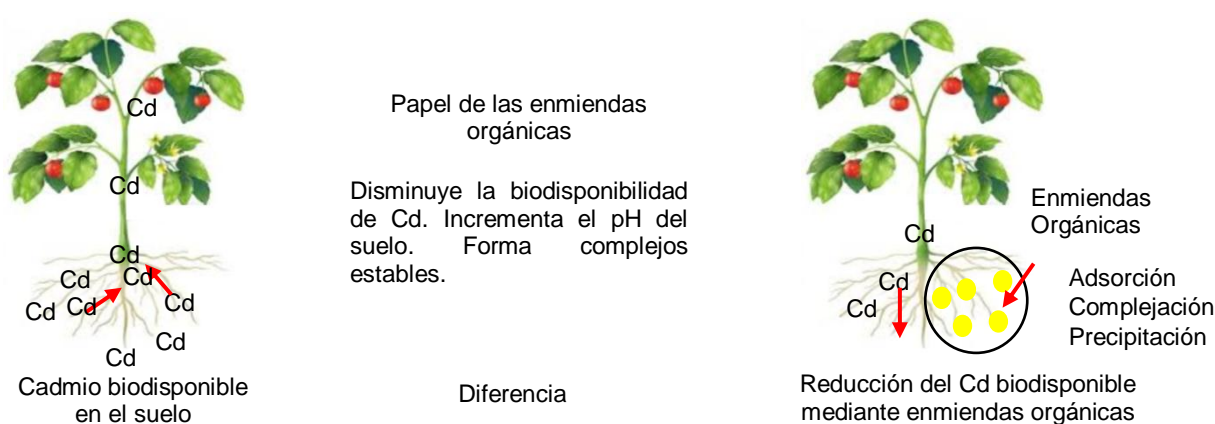


Fig. 1: Reducción del cadmio disponible mediante enmiendas orgánicas.

Tabla 3: Principales investigaciones en el uso de enmiendas orgánicas inmovilizadoras de cadmio por procesos de adsorción, complejación e intercambio iónico

Enmienda	Definición	Tipos de enmiendas orgánicas	Propiedades físicas y químicas	Aplicación de las enmiendas en la inmovilización	Referencia
Biochar	El biochar es un compuesto sólido, negro, altamente poroso compuesto de 70% de carbón en forma estable de la descomposición térmica carbonácea, sólido y recalcitrante derivado de la pirólisis de la biomasa residual. Su rendimiento y propiedades están fuertemente influenciados por las condiciones de pirólisis y la composición de la materia prima. El biochar tiene importancia en el campo de la remediación del suelo (Cha et al/2016; Pandey et al., 2020).	Biochar de la pirólisis de maderas duras como el roble ( <i>Quercus spp.</i> ), fresno de hoja ancha ( <i>Fraxinus excelsior</i> ), el sicómoro ( <i>Acer spp.</i> ), el abedul ( <i>Betula spp.</i> ) y la cereza ( <i>Prunus spp.</i> ).	pH = 9.9(0.0) Carbono orgánico total (%) = 53(2.4)	El biochar demostró ser eficaz para reducir altas concentraciones de Cd solubles originados en un suelo contaminado y que la sorción es uno de los mecanismos por los cuales se retiene este metal.	Beesley et al. (2010) Beesley y Marmiroli (2011)
		Biochar de madera de <i>Eucalyptus saligna</i> .	pH = 10.98 ± 0.34, CE (dS/m) = 0.97 ± 0.16, CO (%) = 68.029 ± 4.47, C/N=57 ± 1.84, Cd (mg/kg) = 1.43 ± 0.27	El biochar disminuyó el cadmio disponible en un 43.82%, la absorción/acumulación de Cd por las plantas de trigo y la acumulación de Cd en sus diferentes partes.	Yousaf et al. (2016)
		Biochar derivado de la paja de trigo.	Carbono (%)=46.8, N total (%) = 0.59, K (%) = 2.8, P disponible (mg/kg) = 80, carbono orgánico disuelto (g/kg) = 0.53, pH = 10.4 y superficie total (m <sup>2</sup> /g) = 8.92	La enmienda de biochar tuvo un mayor efecto en la inducción de alcalinización del suelo y contribuyó a la inmovilización de Cd. La inoculación de hongos y la aplicación de biochar produjeron un efecto interactivo positivo sobre la tolerancia de las plantas al estrés del Cd y la absorción de Cd en los tejidos de superficie.	Liu et al. (2018b)
		Biochar de bambú.	Biochar de bambú es de naturaleza alcalina (pH= 8.86), tiene un efecto encalado en los suelos, tiene alta CE (537.36 uS/cm) y CIC (14.25 cmol+/kg). N total (7.13 g/kg), P total (2.07 g/kg), K total (6.56 g/kg), COT (730 g/kg), BET (235.3 g/kg).	La disponibilidad de Cd disminuyó significativamente (p<0.05) con biochar de bambú. La adición de biochar modificó la CIC y pH del suelo, proporcionando condiciones favorables para la inmovilización de Cd. La presencia de grupos fenólicos, -OH, -COOH y C=N en biochar de bambú mostró una mayor adsorción de Cd. Biochar redujo la disponibilidad y movilidad del Cd en los tejidos de <i>Brassica juncea</i> . Cd.	Ali et al. (2017)
		Biochar de estiércol de bovino.	pH alcalino (8.4), > área de superficie (8.55 m <sup>2</sup> /g), < tamaño de poro (11.36 nm), volumen del poro (cc/g) = 0.021, está compuesto predominantemente de C (41.7%), tiene una pequeña proporción de H y N (1.2 y 1.89 %), H/C = 0.34, C/N = 25.7, Cd total (mg/kg) = 0.001±0.00, Zn total (mg/kg) = 10.71±0.36, Fe total (mg/kg) = 9.18±0.32 y Mn total (mg/kg) = 3.72±0.036	Se demostró que la modificación del suelo <i>Udic Ferrisol</i> con biochar de estiércol de vaca proporciona una ruta sostenible para disminuir la disponibilidad de Cd en el suelo. Además, el suelo modificado con biochar ha mostrado otras mejoras de valor agregado, como el aumento del pH del suelo y la producción de biomasa de la planta. Por lo tanto, el biochar de estiércol de vaca se puede usar como una enmienda del suelo en suelos ácidos contaminados con Cd para reducir los riesgos para la salud causados por la contaminación del Cd.	Kiran et al. (2017)



Tabla 3: (continuación).

Enmienda	Definición	Tipos de enmiendas orgánicas	Propiedades físicas y químicas	Aplicación de las enmiendas en la inmovilización	Referencia
Compost	El compost es la descomposición controlada de desechos orgánicos y el producto resultante se puede usar para mejorar la calidad del suelo y ayudar al crecimiento de las plantas (Geethamani et al., 2020).	Compost de estiércol de aves de corral y paja compostado durante 6 meses.	pH=8.11, N total (g/kg)=3.63, P total (g/kg)=5.90, N disponible (g/kg)=0.45, P disponible (mg/kg)=79.42, K disponible (g/kg)=1.07, MO (g/kg)=272.7 y Cd total (mg/kg)=0.75	La enmienda del compost en el suelo contaminado con Cd redujo la absorción de Cd por las semillas y los tallos de trigo y mejoró el rendimiento de los cultivos.	Liu et al. (2009)
		Compost de una mezcla de estiércol de ganado y desechos de té.	pH = 6.4, MO (%) = 86.2, N total (%) = 3.88, Cd <sub>T</sub> (mg/kg) = 0.62	El estudio mostró que la efectividad de la enmienda de compost utilizada para la estabilización de Cd y para disminuir la fitodisponibilidad de Cd para plantas de arroz es diferente en suelos ácidos y alcalinos. En el suelo ácido, el fraccionamiento de Cd se redistribuye rápidamente después de la enmienda del compost y muestra una reducción significativa de la acumulación de Cd por parte de la planta en unas pocas semanas.	Juang et al. (2011)
		Compost de estiércol de bovino.	Ligeramente alcalino (pH = 8.98), rico en materia orgánica (MO = 34.82%), N amoniacal (mg/g) = 0.41, nitrato de nitrógeno (mg/g) = 0.19, P total (mg/g) = 2.3, P disponible (mg/g) = 0.92, Cd total (mg/kg) = 0.94.	La transformación de Cd intercambiable en formas de oxidación puede ser el mecanismo principal de la inmovilización de Cd con la aplicación de compost de estiércol de bovino.	Liao et al. (2016)
		Compost biosólido (residuos verdes + lodo de aguas residuales).	pH = 6.79, carbono orgánico (g/kg) = 423.5, carbono orgánico disuelto (g/kg) = 22.5, N (g/kg) = 22.7, P (g/kg) = 9.31, K (mg/kg) = 6.5, es bajo en la mayoría de los metales (Cu =54.3 mg/kg, Zn=69.4mg/kg, Cd=0.23 mg/kg)	La adición de compost biosólido tuvo un efecto mayor tanto en la carga negativa como en la adsorción de Cd. El compost biosólido rico en materia orgánica y bajo en cadmio actúa como sumidero al secuestrar Cd en los suelos, por lo tanto, reduce su efecto fitotóxico sobre el crecimiento de las plantas. La inmovilización in situ mediante compost biosólido, de calidad excepcional, es una opción prometedora para reducir la biodisponibilidad de Cd en el suelo.	Bolan et al. (2003)

Tabla 3: (continuación).

Enmienda	Definición	Tipos de enmiendas orgánicas	Propiedades físicas y químicas	Aplicación de las enmiendas en la inmovilización	Referencia
Estiércol	El estiércol es materia orgánica en descomposición, principalmente, excrementos de animales, que se destina al abono de las tierras.	Estiércol de aves de corral.	Alta concentración de macronutrientes (N, P y K), proteínas y sales solubles.  pH = 8.9, MO (g/kg) = 599, K disponible (mg/kg) = 7150, N total (g/kg) = 17.3 g/kg, P total (g/kg) = 29, K total (g/kg) = 13.3, Zn (mg/kg) = 120, Cd (mg/kg) = 0.37	La formación de complejos insolubles y la adsorción con materia orgánica sólida dan como resultado una movilidad reducida de Cd.  El estiércol de cerdo disminuyó la concentración de Cd en diferentes tejidos del girasol por el efecto de dilución con alta biomasa y la reducción de la concentración de Cd disponible en el suelo. La aplicación del estiércol de cerdo cambia la disponibilidad del metal pesado en el suelo, desplazándolo de forma disponible para las plantas, extraíble con agua o solución de sales neutras, a fracción asociada con la materia orgánica, carbonato u óxido metálico.	Irfan Sohail, et al. (2019)
		Estiércol de pollo.	pH = 6.95 ± 0.02, Cd total (mg/kg) = 0.21 ± 0.01 a, material orgánico (g/kg) = 465.27 ± 1.53, N total (g/kg) = 11.79 ± 0.93, P disponible (mg/kg) = 2017.3 ± 21.75, K disponible (mg/kg) = 310.27 ± 1.25.	Bajo el sistema de cultivo en maceta, la concentración de Cd extraíble en el suelo se redujo significativamente con la adición del estiércol de pollo. Esta disminución puede ser causada por la quelación o consolidación de materiales orgánicos o compuestos de fósforo en el estiércol de pollo. El efecto más significativo fue con 100 g/kg de estiércol de pollo. Asimismo, el estiércol de pollo disminuyó las concentraciones de Cd en el <i>Solanum nigrum</i> L. y podría ser un mejor fertilizante para la fitoestabilización de este metal pesado.	Wei et al. (2010)
Residuo	El residuo es un material que no se desea, resto o subproducto inutilizable.	Residuos de arroz triturados en polvo fino (mezcla de paja y raíz).	Tiene componentes lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina)	La complejación de Cd con la materia orgánica disuelta de los residuos de arroz redujo la disponibilidad de Cd para las plántulas de arroz.	Tang et al. (2017)
vermicompost	El vermicompost es un compuesto de la transformación por parte de lombrices que aceleran la conversión de los residuos orgánicos; estimulando los procesos de mineralización y humificación, obteniendo un producto final estable y maduro (Hait y Tare 2011).	Residuos orgánicos y lombrices de tierra.	Presenta un alto contenido de CIC, alta humedad, gran distribución de partículas, alta concentración de nutrientes (Ca, Mg, Na, K, P, S, N) y sustancias húmicas.	Las lombrices de tierra disminuyen la movilidad de los metales al modificar su especiación química en formas menos disponibles. Las investigaciones presentan datos para respaldar la aplicabilidad de vermicompost en procesos de adsorción del cadmio. El vermicompost es un sorbente <i>in situ</i> prometedora para metales pesados.	Bhat et al., (2018).



Como se observa en la tabla 3, un número importante de investigaciones ha demostrado que la adición de enmiendas orgánicas a los suelos aumenta la inmovilización de los metales a través de reacciones de adsorción. La retención del metal inducida por la enmienda orgánica se atribuye a un aumento en la carga superficial. Sin embargo, la concentración de Cd en el suelo no disminuye con el uso de enmiendas orgánicas, pero sí reduce su biodisponibilidad. La materia orgánica en el suelo convierte el Cd soluble/intercambiable en una fracción de enlace orgánico, lo que reduce la absorción (tabla 2).

El aumento en el pH del suelo mejora la disociación de H<sup>+</sup> de los grupos funcionales tales como hidroxilo, fenólico, carbonilo y carboxilo, mejorando así la afinidad por los iones de cadmio (Bolan *et al.*, 2003). Además, la aplicación de enmiendas orgánicas hace que el Cd sea menos móvil, pero la concentración total sigue siendo la misma y puede aumentar si las enmiendas orgánicas contienen Cd (Chaudri *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2015).

Diferentes agentes estabilizantes (enmiendas) orgánicos se pueden usar para reducir la movilidad de los metales en sitios contaminados (Hamid *et al.*, 2018). Por ejemplo los abonos de estiércol, biosólidos y desechos sólidos municipales con bajo contenido de metal son considerados fuente de nutrientes y también como acondicionador para mejorar las propiedades físicas y la fertilidad de los suelos. A menudo se ha demostrado que la adición de enmiendas orgánicas a los suelos aumenta la inmovilización del metal a través de reacciones de adsorción (Park *et al.*, 2011). La adición de compost biosólido aumenta la carga superficial de los suelos modificados, lo que se atribuye al mayor pH y la carga superficial del compost biosólido. Investigaciones realizadas demuestran que la concentración de Cd disponible en el suelo disminuye significativamente debido a la adición de estiércol de pollo (Wei *et al.*, 2010).

Experimentos realizados por Xie *et al.* (2018) evaluaron 6 enmiendas orgánicas compuestas en la inmovilización del Cd y reportaron una disminución prominente en el contenido de Cd y Cu biodisponible. De manera similar, Hamid *et al.* (2018) evaluaron doce enmiendas (solas y mixtas) para la inmovilización de Cd en el sistema de cultivo de arroz-trigo y encontraron una disminución relativamente mayor en la absorción de la planta por la adición combinada de estiércol.

## DISCUSIÓN

La contaminación de suelos agrícolas con cadmio es un problema global, por lo que la tierra es el lugar principal de acumulación de metales pesados, tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Ante ello, se buscan técnicas de remediación *in situ* que son factibles, rentables y amigables con el medio ambiente; una de ellas, es la remediación mediante enmiendas orgánicas fácilmente disponibles que tienen la propiedad de inmovilizar el Cd mediante procesos de adsorción, complejación y precipitación (Clark *et al.*, 2007; Bravo Realpe *et al.*, 2014).

La aplicación de enmiendas orgánicas a los suelos agrícolas reduce la absorción de Cd por las plantas, mejora el suelo físicamente, además proporciona nutrientes esenciales para el suelo y las plantas. Sin embargo, algunas enmiendas pueden contener niveles elevados de Cd y, por lo tanto, su aplicación podría exacerbar los problemas de contaminación del suelo (Shaheen *et al.*, 2014). Por lo cual, recomiendan determinar la concentración de Cd en las enmiendas orgánicas.

Las enmiendas orgánicas como el compost, residuos de estiércol, desechos orgánicos, biofertilizantes, residuos de cultivos, biosólidos y desechos sólidos municipales con bajo contenido de metal cumplen el papel fundamental en la remediación de suelos contaminados con metales pesados; por ende, son considerados fuentes de nutrientes y también como acondicionadores para la mejora de las propiedades físicas y la fertilidad de los suelos (tabla 3).

Las enmiendas orgánicas tiene la función de aumentar los sitios de unión, incrementar el potencial de hidrógeno del suelo, formar complejos estables y disminuir las biodisponibilidad del Cadmio (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

## CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo presentado, se pueden plantear las siguientes conclusiones principales:

- 1.- El uso de enmiendas orgánicas en suelos agrícolas contaminados con Cd es más realista, simple, factible, de rápida implementación, rentable y amigable con el medio ambiente.
- 2.- Las enmiendas orgánicas como el compost, vermicompost, biochar, residuos de cultivos, abonos de estiércol y desechos sólidos municipales con bajo contenido de Cd cumplen el papel fundamental en la mejora de la inmovilización del Cd en suelos agrícolas contaminados.

3.-Las enmiendas orgánicas tienen la función de aumentar los sitios de unión, incrementar el potencial de hidrógeno del suelo, formar complejos estables y disminuir la biodisponibilidad del cadmio.

4.-En los últimos 13 años se ha realizado un considerable progreso en el uso de las enmiendas orgánicas y en el conocimiento de los procesos de adsorción, intercambio iónico, complejación y precipitación implicados en la inmovilización del cadmio.

5.- Los trabajos de remediación son complejos en la actualidad se tiene que realizar en base a un conjunto de técnicas (físicas, químicas y biológicas) para la obtención de mejores resultados, así como identificar la fuente o el origen de la contaminación para poder controlar el ingreso del contaminante en el suelo agrícola y luego optar por la remediación del suelo.

## REFERENCIAS

- Åkesson, A., Barregard, L. y otros cuatro autores, *Non-Renal Effects and the Risk Assessment of Environmental Cadmium Exposure*, <https://doi.org/10.1289/ehp.1307110>, *Environmental Health Perspectives*, 122(5), 431-438 (2014).
- Ali, A., Guo, D. y otros cinco autores, *Using Bamboo Biochar with Compost for the Stabilization and Phytotoxicity Reduction of Heavy Metals in Mine-contaminated Soils of China*, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03045-9>, *Scientific Reports*, 7(1), 1-12 (2017).
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E. y Gomez-Eyles, J.L., *Effects of Biochar and Greenwaste Compost Amendments on Mobility, Bioavailability and Toxicity of Inorganic and Organic Contaminants in a Multi-element Polluted Soil*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.003>, *Environmental Pollution*, 158(6), 2282–2287 (2010).
- Beesley, L. y Marmiroli, M., *The Immobilisation and Retention of Soluble Arsenic, Cadmium and Zinc by Biochar*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>, *Environmental Pollution*, 159(2), 474–480 (2011).
- Bhat, S.A., Singh, S. y otros cuatro autores, *Bioremediation and Detoxification of Industrial Wastes by Earthworms: Vermicompost as Powerful Crop Nutrient in Sustainable Agriculture*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.003>, *Bioresource technology*, 252, 172-179 (2018).
- Bolan, N.S., Adriano, D.C., Duraisamy, P., y Mani, A., *Immobilization and Phytoavailability of Cadmium in Variable Charge Soils. III. Effect of Biosolid Compost Addition*, <https://doi.org/10.1023/a:1026288021059>, *Plant and Soil*, 256(1), 231–241 (2003).
- Bravo, I.D.S.B., Arboleda, C.A.A. y Peinado, F.J M, *Efecto de la Calidad de la Materia Orgánica asociada con el Uso y Manejo de Suelos en la Retención de Cadmio en Sistemas Altoandinos de Colombia*, <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>, *Acta Agronómica*, 63(2), 164–174 (2014).
- Cha, J.S., Park, S.H. y otros cinco autores, *Producción y Utilización de Biochar: una revisión*, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>, *Revista de Química Industrial y de Ingeniería*, 40, 1–15 (2016).
- Chaudri, A., McGrath, S. y otros siete autores, *Cadmium Availability to Wheat Grain in Soils Treated with Sewage Sludge or Metal Salts*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.068>, *Chemosphere*, 66(8), 1415–1423 (2007).
- Clark, G.J., Dodgshun, N., Sale, P.W.G., y Tang, C., *Changes in Chemical and Biological Properties of a Sodic Clay Subsoil with Addition of Organic Amendments*, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.003>, *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2806-2817 (2007).
- Cloquet, C., Carignan, J. y otros tres autores, *Tracing Source Pollution in Soil using Cadmium and Lead Isotopes*. <https://doi.org/10.1021/es052232+>, *Environmental Science & Technology*, 40(8), 2525–2530 (2006).
- Cortes, L.E., Bravo, I.D.S., Martín, F.J. y Menjivar, J.C., *Extracción Secuencial de Metales Pesados en dos Suelos Contaminados (Andisol y Vertisol) Enmendados con Ácidos Húmicos*, <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>, *Acta Agronómica*, 65 (3), 232–238 (2016).
- Cruz-Paredes, C., Wallander, H., Kjølner, R., y Rousk, J., *Using Community Trait-distributions to Assign Microbial Responses to pH Changes and Cd in Forest Soils Treated with Wood Ash*, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.05.004>, *Soil Biology and Biochemistry*, 112, 153–164 (2017).
- De Melo, B.A.G., Motta, F.L., y Santana, M.H.A., *Humic Acids: Structural Properties and Multiple Functionalities for Novel Technological Developments*, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.001>, *Materials Science and Engineering C.*, 62, 967–974 (2016).
- Geethamani, R., Soundara, B. y otros cinco autores, *Affordable Compost Production Using Institutional Waste Using a Rapid Composting Method*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.803>, *Materialstoday Proceedings*, 105, 364-372 (2020).
- Gramlich, A., Tandy, S. y otros cinco autores, *Cadmium Uptake by Cocoa Trees in Agroforestry and Monoculture Systems under Conventional and Organic Management*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>, *Science of The Total Environment*, 580, 677–686 (2017).
- Gramlich, A., Tandy, S. y otros cinco autores, *Soil Cadmium Uptake by Cocoa in Honduras*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>, *Science of The Total Environment*, 612, 370–378 (2018).

- Guo, J., Dai, X., Xu, W., y Ma, M., *Overexpressing GSH1 and AsPCS1 Simultaneously Increases the Tolerance and Accumulation of Cadmium and Arsenic in Arabidopsis Thaliana*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.018>, *Chemosphere*, 72(7), 1020–1026 (2008).
- Guo, F., Ding, C. y otros tres autores, *Stability of Immobilization Remediation of Several Amendments on Cadmium Contaminated Soils as Affected by Simulated Soil Acidification*, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.088>, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 164–172 (2018a).
- Guo, F., Ding, C. y otros tres autores, *Effects of Combined Amendments on Crop Yield and Cadmium Uptake in two Cadmium Contaminated Soils under Rice-wheat Rotation*, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.043>, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 303–310 (2018b).
- Hait, S., y Tare, V., *Vermistabilization of Primary Sewage Sludge*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.031>, *Tecnología Bioresource*, 102 (3), 2812–2820 (2011).
- Hamid, Y., Tang, L. y otros cinco autores, *Comparative Efficacy of Organic and Inorganic Amendments for Cadmium and Lead Immobilization in Contaminated Soil under Rice-wheat Cropping System*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.113>, *Chemosphere*, 214, 259-268 (2018).
- Hao, X.Z., Zhou, D.M., Li, D.D., y Jiang, P., *Cadmium and Zinc Accumulation of Ornamental Sunflower (*Helianthus annuus L.*) in Contaminated Soil with Different Amendments*, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60048-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60048-4), *Pedosphere*, 22(5), 631-639 (2012).
- He, S., He, Z. y otros tres autores, *Soil Biogeochemistry, Plant Physiology, and Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soil*, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.005>, *Advances in Agronomy*, 134, 135–225 (2015).
- Houben, D., Pircar, J. y Sonnet, P., *Heavy Metal Immobilization by Cost-effective Amendments in a Contaminated Soil: Effects on Metal Leaching and Phytoavailability*, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.10.004>, *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 87–94 (2012).
- Hueso-González, P., Muñoz-Rojas, M., y Martínez-Murillo, J.F., *The Role of Organic Amendments in Drylands Restoration*, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.002>, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 1–6 (2018).
- Hu, Y., Cheng, H. y Tao, S., *The Challenges and Solutions for Cadmium-contaminated Rice in China: A Critical Review*, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.042>, *Environment International*, 92-93, 515–532 (2016).
- Irfan Sohail, M., Arif, M. y otros cinco otros, *Organic Manures for Cadmium Tolerance and Remediation*, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815794-7.00002-3>, *Cadmium Tolerance in Plants*, 19–67 (2019).
- Jiang, J., Xu, R., Jiang, T., y Li, Z., *Immobilization of Cu (II), Pb (II) and Cd (II) by the Addition of Rice Straw derived Biochar to a Simulated Polluted Ultisol*, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.086>, *Journal of Hazardous Materials*, 229-230, 145–150 (2012).
- Juang, K.W., Ho, P.C. y Yu, C.H., *Short-term Effects of Compost Amendment on the Fractionation of Cadmium in Soil and Cadmium Accumulation in Rice Plants*, <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0684-0>, *Environmental Science and Pollution Research*, 19(5), 1696–1708 (2011).
- Kabata-Pendias, A., y Mukherjee, A.B., *Trace Elements from Soil to Human*, 1ra edición, 550. Springer, Berlin, Alemania (2007).
- Khan, M.A., Khan, S., Khan, A y Alam, M., *Soil Contamination with Cadmium, Consequences and Remediation using Organic Amendments*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030>, *Science of The Total Environment*, 601-602, 1591–1605 (2017).
- Khan, M.A., Ding, X. y otros cuatro autores, *The Influence of Various Organic Amendments on the Bioavailability and Plant Uptake of Cadmium present in Mine-degraded soil*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.299>, *Science of The Total Environment*, 636, 810–817(2018).
- Kiran, Y.K., Barkat, A. y otros cinco autores, *Cow Manure and Cow Manure-derived Biochar Application as a Soil Amendment for Reducing Cadmium Availability and Accumulation by Brassica chinensis L. in Acidic Red Soil*, [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(16\)61488-0](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(16)61488-0), *Journal of Integrative Agriculture*, 16(3), 725–734 (2017).
- Lewis, C., Lennon, A.M., Eudoxie, G., Umaharan, P., *Genetic Variation in Bioaccumulation and Partitioning of Cadmium in Theobroma cacao L.*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>, *Science of The Total Environment*, 640-641, 696–703 (2018).
- Liao, Z., Wang, J. y otros cuatro autores, *Immobilization of Cd in Landfill-Leachate-Contaminated Soil with Cow Manure Compost as Soil Conditioners: A laboratory Study*. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1218976>, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(12), 1276–1283 (2016).
- Liu, L., Chen, H. y otros tres autores, *Immobilization and Phytotoxicity of Cd in Contaminated Soil Amended with Chicken Manure Compost*, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.004>, *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 563–567 (2009).
- Liu, Y., Xiao, T. y otros cuatro autores, *High Cadmium Concentration in Soil in the Three Gorges Region: Geogenic Source and Potential Bioavailability*, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.022>, *Applied Geochemistry*, 37, 149–156 (2013).

- Liu, K., Lv, J. y otros cuatro autores, *Major Factors Influencing Cadmium Uptake from the Soil into Wheat Plants*, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.005>, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 207–213 (2015).
- Liu, L., Li, W., Song, W y Guo, M., *Remediation Techniques for Heavy Metal-Contaminated Soils: Principles and Applicability*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>, *Science of The Total Environment*, 633, 206–219 (2018a).
- Liu, L., Li, J. y otros cinco autores, *Effects of Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Biochar Amendment on Maize Growth, Cadmium Uptake and Soil Cadmium Speciation in Cd-Contaminated soil*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.025>, *Chemosphere*, 194, 495–503 (2018b).
- Liu, N., Jiang, Z. y otros cuatro autores, *Mitigation of Rice Cadmium (Cd) Accumulation by Joint Application of Organic Amendments and Selenium (Se) in High-Cd-Contaminated Soils*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019>, *Chemosphere*, 241, 125106 (2019).
- R.M. N° 0451-2018-MINAGRI, *Aprueban Documento denominado "Lineamientos de Muestreo para la Determinación de Niveles de Cadmio en Suelos, Hojas, Granos y Productos derivados de Cacao"*, 4-6, Lima – Perú (2018).
- Mohamed, I., Ahamadou, B. y otros cinco autores, *Fractionation of Copper and Cadmium and their Binding with Soil Organic Matter in a Contaminated Soil Amended with Organic Materials*, <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0199-1>, *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 973–982 (2010).
- Nieto-Velázquez, S., Pacheco-Hernández, L., Galán-Vidal, C.A. y Páez-Hernández, M.E., *Estudio de las Interacciones Ácido Húmico-Metales Pesados y Determinación de sus Constantes de Estabilidad por Electroforesis Capilar*, <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000300007>, *Información Tecnológica*, 22(3), 45–54 (2011).
- Pan, L., Ma, J., Wang, X. y Hou, H., *Heavy Metals in Soils from a Typical County in Shanxi Province, China: Levels, Sources and Spatial Distribution*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.049>, *Chemosphere*, 148, 248–254 (2016).
- Pandey, D., Daverey, A., y Arunachalam, K., *Biochar: Production, Properties and Emerging role as a Support for Enzyme Immobilization*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120267>, *Journal of Cleaner Production*, 255, 120267(2020).
- Park, J.H., Lamb, D. y otros cuatro autores, *Role of Organic Amendments on enhanced Bioremediation of Heavy Metal Contaminated Soils*, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082>, *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 549–574 (2011).
- Rehman, M.Z., Zafar, M. y otros cinco autores, *Residual Effects of Frequently Available Organic Amendments on Cadmium Bioavailability and Accumulation in Wheat*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125548>, *Chemosphere*, 244, 125548 (2019).
- Roberts, T.L., *Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science*, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.012>, *Procedia Engineering*, 83, 52–59 (2014).
- Salmanzadeh, M., Hartland, A. y otros cinco autores, *Isotope Tracing of Long-Term Cadmium Fluxes in an Agricultural Soil*, doi: 10.1021/acs.est.7b00858, *Environmental Science & Technology*, 51(13), 7369–7377 (2017).
- Sarwar, N., Saifullah, S.S. y otros cuatro autores, *Role of Mineral Nutrition in Minimizing Cadmium Accumulation by Plants*, <https://doi.org/10.1002/jsfa.3916>, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 925–937 (2010).
- Sebastian, A. y Prasad, M.N.V., *Cadmium Minimization in Rice. A review*, <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0152-y>, *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 155–173 (2013).
- Shaheen, S.M., Rinklebe, J. y Selim, M.H., *Impact of Various Amendments on Immobilization and Phytoavailability of nickel and zinc in a contaminated floodplain soil*, <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0713-x>, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 2765–2776 (2014).
- Shen, B., Wang, X. y otros cinco autores, *The Optimum pH and Eh for Simultaneously Minimizing Bioavailable Cadmium and Arsenic Contents in Soils under the Organic Fertilizer Application*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135229>, *Science of The Total Environment*, 711, 135229 (2019).
- Singh, A. y Prasad, S.M., *Effect of Agro-industrial Waste Amendment on Cd Uptake in Amaranthus caudatus grown under Contaminated soil: An Oxidative Biomarker Response*, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.005>, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100, 105–113 (2014).
- Sun, Y., Xu, Y. y otros cuatro autores, *Reliability and Stability of Immobilization Remediation of Cd Polluted Soils using Sepiolite under Pot and Field Trials*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.10.054>, *Environmental Pollution*, 208, 739–746 (2016).
- Tajudin, S.A., Azmi, M.A. y Nabila, A.T., *Stabilization/Solidification Remediation Method for Contaminated Soil: A Review*, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/136/1/012043>, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 136, 1-6 (2016).
- Tang, W., Zhong, H. y otros cuatro autores, *Inhibitory Effects of Rice Residues Amendment on Cd Phytoavailability: A Matter of Cd-organic Matter Interactions?*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.152>, *Chemosphere*, 186, 227–234 (2017).

Wei, S., Li, Y. y otros cinco autores, *Effect of Fertilizer Amendments on Phytoremediation of Cd-contaminated Soil by a Newly Discovered hyperaccumulator Solanum nigrum L.*, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.023>, Journal of Hazardous Materials, 176(1-3), 269–273 (2010).

Xie, Y., Xiao, K. y otros cuatro autores, *Effects of Amendments on Heavy Metal Immobilization and Uptake by Rhizoma Chuanxiong on Copper and Cadmium Contaminated Soil*, <https://doi.org/10.1098/rsos.181138>, Royal Society Open Science, 5(8), 1-12 (2018).

Yang, Y., Chen, J. y otros cinco autores, *Can Liming reduce Cadmium (Cd) Accumulation in Rice (Oryza sativa) in Slightly Acidic Soils? A Contradictory Dynamic Equilibrium between Cd Uptake Capacity of Roots and Cd Immobilization in Soils*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.061>, Chemosphere, 193, 547-556 (2017).

Yousaf, B., Liu, G. y otros cinco autores, *Investigating the Potential Influence of Biochar and Traditional Organic Amendments on the Bioavailability and Transfer of Cd in the Soil-plant System*, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5285-2>, Environmental Earth Sciences, 75(5), 1-10 (2016).

Yu, Y., Wan, Y., Camara, AY y Li, H., *Effects of the Addition and Aging of Humic Acid-based Amendments on the Solubility of Cd in Soil Solution and its Accumulation in Rice*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.002>, Chemosphere, 196, 303–310 (2018).



Página en blanco