

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis¹

Correo: alexisz@ula.ve

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-6422-2780>

Rondón, Carlos²

Correo: 19enricar59@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-8737-3572>

Qasem, Vivihan³

Correo: liaqia2000@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-6712-2228>

Hernández, Eduylson⁴

Correo: eduylson@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-006-6232-3173>

Binchi, Guillermo⁵

Correo: gbianchip@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8307-4472>

Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela

Dugarte, Satfel⁶

Correo: sjucacao@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-0734-5118>

Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Mérida, Venezuela

Resumen

La materia orgánica del suelo es un complejo sistema de sustancias en estado dinámico y continuo, producto de la descomposición de los restos de animales y vegetales, siendo de vital importancia para el desarrollo de las plantas, mediante sus efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y ocupa un

¹ Lcdo. Químico. MSc. Ciencias del Suelo. Dr. Biotecnología de microrganismos. Prof. Dpto. Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

² Lcdo. Químico. MSc. Química Analítica. Dr. Química Analítica. Prof. Dpto. Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

³ Lcdo. Químico. Dpto. Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

⁴ Lcdo. Químico. Investigador del Dpto. Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

⁵ Lcdo. en Biología. MSc. Estadística. Prof. Dpto. Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

⁶ Ing. Agrónomo. MSc. Agroecología. Investigador del INIA-Mérida, Venezuela.



Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

papel fundamental en la migración y transformación de metales pesados en el suelo. Su composición es rica en grupos funcionales con cargas negativas, lo que le confiere alta capacidad de absorción de grandes cantidades de cationes de metales pesados y actúan como un portador natural migratorio de metales. Los residuos postcosecha de cacao son un posible agente remediador de suelos contaminados con metales pesados. En ese sentido, el cadmio ha sido objeto de discusión en los últimos años, debido a las progresivas regulaciones de la Comunidad Europea, que establece un límite máximo al contenido permisible de este metal en el cacao y sus derivados, comercializados en Europa y el resto del mundo. En esta investigación se evaluó el comportamiento remediador del compost de postcosecha de cacao en un suelo enriquecido con cadmio, realizando ensayos a nivel de laboratorio, caracterizando la enmienda orgánica mediante la determinación de propiedades fisicoquímicas y biológicas. Además, se realizaron pruebas de germinación para estudiar la fitotoxicidad de la enmienda en cuestión. Los resultados obtenidos bajo el criterio de trabajo establecido permitieron obtener información sobre la dinámica del Cd en dicha enmienda. Donde se consiguió un efecto residual de las enmiendas orgánicas sobre la solubilidad de los metales pesados debido a que la materia orgánica puede sufrir transformaciones a lo largo del tiempo y la extracción de cadmio del suelo, depende, además de factores como pH, CIC y CE a lo largo del tiempo.

Palabras clave: Ácidos húmicos, materia orgánica del suelo, metales pesados, cadmio, cacao.

Evaluation of an organic amendment as a remediation agent in a cadmium-enriched soil

Abstract

Soil organic matter is a complex system of substances in a dynamic and continuous state, a product of the decomposition of animal and plant remains. It is vital for plant development through its effects on the soil's physical, chemical, and biological properties and plays a fundamental role in the migration and transformation of heavy metals in the soil. Its composition is rich in functional groups with negative charges, which gives it a high capacity for absorbing large quantities of heavy metal cations, acting as a natural migratory carrier of metals. Post-harvest cocoa residues are a potential remediation agent for soils contaminated with heavy metals. In this regard, cadmium has been the subject of

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

discussion in recent years due to progressive regulations from the European Union, which establish a maximum limit on the permissible content of this metal in cocoa and its derivatives marketed in Europe and the rest of the world. This research evaluated the remediation behavior of post-harvest cocoa compost in cadmium-enriched soil. Laboratory tests were conducted, characterizing the organic amendment by determining its physicochemical and biological properties. Germination tests were also performed to study the phytotoxicity of the amendment. The results obtained under the established working criteria provided information on the dynamics of cadmium in the amendment. A residual effect of the organic amendments on the solubility of heavy metals was observed, as organic matter can undergo transformations over time, and cadmium extraction from the soil depends on factors such as pH, cation exchange capacity (CEC), and electrical conductivity (EC) over time.

Keywords: Humic acids, soil organic matter, heavy metals, cadmium, cocoa.

Introducción

Los componentes orgánicos del suelo se dividen en dos clases de material: el no-húmico (ejemplo: proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y pequeñas moléculas de azúcar y aminoácidos) y las sustancias húmicas (SHs). Estas últimas son consideradas como polielectrolitos biogénicos que poseen una estructura macromolecular con un gran número de grupos -OH y -COOH, y con amplio rango de pesos moleculares. Las sustancias húmicas son ligandos orgánicos que juegan un rol primordial en la especiación, transporte y deposición de una gran variedad de compuestos que van desde iones metálicos hasta compuestos lipofílicos. De acuerdo a su solubilidad en medio acuoso, las SHs pueden separarse en Ácidos Fúlvicos (AF) (solubles), Huminas (Hu, insolubles) y Ácidos Húmicos (AH, solubles en medio alcalino e insolubles a pH ácido menor a 2).

Cada una de estas sustancias juega un papel particular en el medio ambiente. Así, mientras los AF forman complejos metálicos solubles, biodisponibles y

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

móviles debido a su menor tamaño molecular y gran contenido de grupos funcionales ácidos, los AH tienden a inmovilizar y a acumular metales en la fase sólida del suelo por lo que se considera que controlan la absorción radicular de metales por las plantas. De esta forma, los AH son utilizados en descontaminación en suelos y lagos, siendo su capacidad complejante ampliamente estudiada para metales pesados, elementos radioactivos e incluso halógenos, ácidos orgánicos y biocidas (Nieto et al., 2011).

1. Ácidos húmicos y fúlvicos

La Materia Orgánica del Suelo (MOS) está constituida por dos grupos voluminosos de estructuras moleculares de bajo y alto peso molecular. En el grupo de alto peso molecular se encuentran los Ácidos Húmicos (AH), cuyos valores de peso difieren de manera significativa según la metodología empleada para su determinación. En el grupo correspondiente a moléculas de bajo peso molecular se ubican los Ácidos Fúlvicos (AF), constituidos principalmente por C, H, O, N, S y P, en las proporciones de la Tabla 1 (Rivero, 1999).

Los **Ácidos Húmicos (AH)** constituyen la mayor fracción posible de extraer de las sustancias húmicas; son menos ácidas (de 400 - 870 meq/100 g). Su color varía en tonos oscuros hasta negro. Por lo general son compuestos de mayor peso molecular que los ácidos fúlvicos. Son compuestos aromáticos (20 - 60%) de estructuras alquílicas lineales (10 - 40%). Suelen ser de carácter anfótero. Constituidos por grupos carboxilo, hidroxilo y quinonas, generalmente estables.

Por otra parte, los **Ácidos Fúlvicos (AF)** representan la fracción de sustancias húmicas soluble, pueden ser extraídos luego de haber removido los ácidos húmicos mediante acidificación. Constituyen una mezcla de ácidos

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

orgánicos alifáticos débiles y aromáticos con pesos moleculares que van desde 1000 a 10000 Da. Su contenido de oxígeno es el doble de los ácidos húmicos, al igual que su contenido de ácidos carboxílicos e hidroxilos (fenólicos), lo cual genera un compuesto químicamente más reactivo, con doble capacidad de intercambio catiónico (CIC). Debido a su mayor reactividad química, y menor peso molecular en comparación con ácidos húmicos. Son de menor agregación y estabilidad (Ron, 2004).

Los ácidos húmicos y fúlvicos tienen una particular habilidad para formar complejos estables con iones metálicos debido a su alto contenido de grupos funcionales con capacidad de donar electrones, especialmente, -COOH, y -OH fenólicos. También está dentro de estos grupos donadores de electrones, -OCH₃, -NH₂, =N, -SH y -C=O. Los AH tienen un papel primordial en la retención de metales pesados como el Cd, formando enlaces fuertes en sus grupos carboxílicos y fenólicos, con mayor capacidad y fuerza de retención que el resto de fases absorbentes; mientras que los ácidos fenólicos movilizan los metales por fenómenos de complejación y solubilización (Bravo et al., 2014).

La adición de materia orgánica al suelo puede resultar en un incremento o disminución del pH, dependiendo de la influencia que tenga ésta adición en el balance de protones de la CNA_t (capacidad neutralizante de la acidez del suelo). La adición de materia orgánica a suelos alcalinos produce una disminución del pH debido a: 1) la mineralización del nitrógeno, del azufre y del fósforo orgánicos, 2) disociación de ligandos orgánicos y 3) hidratación del CO₂ producido en la descomposición de la materia orgánica (Zapata, 2004).

El cacao, *Theobroma cacao L.*, es un importante cultivo, proveniente de un árbol de las regiones húmedas tropicales del norte de América del Sur y Centro

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

América. Es un producto cotizado mundialmente ya que, con sus granos, se elabora chocolate y otros productos de interés comercial (Chacón et al., 2007). Con la producción de este cultivo, luego que los granos son extraídos, grandes cantidades de cáscaras de mazorcas quedan sin utilizar en las zonas agrícolas productoras. En consecuencia, continúa la carga mundial de residuos de postcosecha de cacao que se estima puede ser mayor a 40 millones de toneladas métricas (Vriesmann et al., 2012). La valorización de los residuos de la mazorca de cacao se ha intentado a través del reciclaje de este producto, mediante su transformación a compost (Fidelis y Rajashekhar, 2017) con el propósito de mejorar la fertilidad de los suelos, promover el hábito del reciclaje, sustituir parcialmente el requerimiento de fertilizantes minerales, mejorar la existencia de materia orgánica del suelo y ayudar a combatir la contaminación por nitrógeno (Vitinaqailevu y Rajashekhar, 2019).

En Venezuela, las zonas del país que se caracterizan por la producción comercial de este rubro se ubican en la región Oriental, Centro-Norte Costera y en la Sur Occidental. La zona Sur del Lago de Maracaibo en el estado Zulia (región Sur Occidental) ocupa el tercer lugar en la producción nacional de cacao (Chacón et al., 2007). Aunque actualmente, en esta zona se ha incrementado sustancialmente la producción.

Debido a la importancia comercial del cacao, diversos países productores y exportadores, incluyendo Venezuela, se muestran interesados en conocer los niveles de metales pesados presentes en el rango de contaminantes en las zonas de cultivo. En este sentido, el cadmio (Cd) ha sido objeto de discusión en los últimos años, debido a las progresivas regulaciones de la Comunidad Europea, que establece un límite máximo al contenido permisible de este metal en el chocolate

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

y otros derivados del cacao comercializados en Europa, según los reglamentos CE 1881/2006 y CE 488/2014 (FAO/WHO, 2014; Lanza et al., 2016).

En ese sentido, es necesario tomar en cuenta el concepto de contaminantes metálicos del cacao según el Codex Alimentarius, el cual lo define como aquellos metales, no añadidos intencionalmente, que se encuentran presentes en el cacao como resultado de la producción, fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, empaquetado, transporte, almacenamiento o como producto de contaminaciones ambientales con potencialidad de presentar riesgos sobre la salud de las personas (Codex Alimentarius, 1995). Estos metales pueden hallarse en los suelos de forma natural o como resultado de la actividad antropogénica, ser absorbidos por las plantas, concentrados en las semillas y tomados de ellas por el ser humano, lo cual constituye un riesgo potencial para la salud (Prieto et al., 2009).

Por esa razón, es fundamental para el estado venezolano contar con datos de referencia sobre el contenido de cadmio en los cultivos de cacao que permitan fijar una posición clara ante las regulaciones internacionales que podrían representar un riesgo para las exportaciones del producto nacional al bloque comunitario.

El intercambio de iones se considera un mecanismo importante en el sistema del suelo y la materia orgánica del mismo. En el intercambio de iones, los iones disueltos se reemplazan con otros iones que tienen carga eléctrica similar. El mecanismo de intercambio de iones implica el reemplazo selectivo de iones cargados con la especie de interés. La eficacia del proceso de intercambio iónico depende de la concentración de metales y la presencia de los denominados grupos funcionales en la superficie del material (arcilla o la micela coloidal del suelo). Además, la actividad de los cationes metálicos en suelos naturalmente ácidos con

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

un pH del suelo en aumento, tiende a disminuir debido a un cambio en la CIC (Hamid et al., 2020). En general, en los suelos la CIC está relacionada con la cantidad y el tipo de arcillas del que está compuesto. La materia orgánica, descompuesta y transformada en humus, entra a asociarse con las arcillas y determinan un incremento en la CIC de los suelos.

Las fracciones de arcilla coloidal y de humus del suelo se encuentran cargadas negativamente y, en consecuencia, atraen y absorben iones positivos (cationes) hacia las posiciones de intercambio. Éstos pueden ser los comúnmente llamados cationes básicos o cationes ácidos tales como los H^+ y Al^{3+} . Éstos cationes no son solubles en agua al encontrarse absorbidos, pero pueden intercambiarse con H^+ , que se encuentra en la proximidad ácida del sistema radicular de las plantas, por lo tanto, se encontrará en disolución y será susceptible de ser absorbido por la planta. La carga sobre las partículas de humus y de mineral depende no sólo de la naturaleza de la superficie sino también del pH, aumentando la carga negativa, y por lo tanto la CIC, conforme se incrementa el pH (Faithfull, 2005).

En las enmiendas orgánicas, la CIC aumenta durante el proceso de compostaje debido al aumento de grupos activos y se estabiliza cerca de la quinta semana alrededor de 70 a 80 cmol/kg de materia seca, lo cual caracteriza a un material maduro. En ciertos casos, la CIC puede aumentar como resultado del bloqueo de sitios activos de intercambio por el complejamiento de iones tales como Cu, Fe y Al, debido a interacciones con compuestos de Fe y Al, considerándose un factor que indica biomadurez, independientemente del origen del material que constituye la enmienda. Un compost de buena calidad posee valores de capacidad intercambio catiónico cercanos a 60 cmol/kg (Zambrano,

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

2005). En su mayoría, la CIC de los materiales orgánicos está controlada por la abundancia de grupos funcionales, ya que una alta capacidad de intercambio catiónico es un indicador de una buena capacidad de adsorción de los materiales orgánicos (Harvey et al., 2011).

Los nutrientes esenciales para las plantas como N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cl, Zn, Mn, Cu, B, Mo; presentes en el suelo, son absorbidos mediante el sistema raíz. Esto ocurre a través de mecanismos pasivos como el flujo de transpiración o mediante mecanismos activos, gracias a la acción de las proteínas transportadoras asociadas a la membrana celular. Los elementos son transportados a las plantas a través de dos rutas: el apoplasto y el simplasto. Una vez dentro de la raíz los nutrientes disueltos se transfieren al resto de la planta a través del xilema. Además de nutrientes, las plantas también absorben compuestos inorgánicos no esenciales considerados contaminantes potenciales como los metales pesados (Cristaldi et al., 2017).

Los cultivos que crecen en suelos altamente contaminados con metales pesados por lo general, presentan reducción de transpiración, limitada germinación y crecimiento inhibido, clorosis de las hojas y deformación de las raíces. La influencia de metal sobre la planta se observa de manera pronunciada, especialmente en las primeras etapas del desarrollo vegetal (Wyszkowska et al., 2013). Ciertas plantas tienen ventajas sobre organismos biológicos, en el almacenamiento de metales pesados, en los que se destaca la capacidad de almacenar estos elementos en la semilla (Iannacone y Alvariño, 2005). Las plantas tienen la capacidad de absorber metales del suelo, pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, características y contenido en metales del suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

metales en su entorno, unas basan su resistencia a los metales mediante una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea; otras acumulan el metal en la parte aérea sin ser tóxica para la planta. La exclusión es más característica de especies sensibles y tolerantes a los metales y la acumulación generalmente corresponde a especies que aparecen siempre en suelos contaminados (Poschenrieder et al., 2006).

La tolerancia de las plantas a los metales pesados se relaciona directamente con los procesos que reducen la absorción y el transporte de metales y con la desintoxicación de las membranas celulares y el interior de las células. Al aumentar la concentración de metales se induce la síntesis de fitoquelatos, cuya función principal es sostener homeostasis de los metales en la célula. Concentraciones altas de cadmio, cobre y zinc interrumpen la homeostasis del suelo debido a la interferencia en el control genético, inhibiendo la actividad enzimática y microbiana de las proteínas, causando daños metabólicos y en consecuencia la diversidad de microorganismos del suelo es severamente afectada (Wyszkowska et al., 2013). En este sentido, las pruebas de fitotoxicidad representan una de las pruebas biológicas más importantes debido al efecto que evalúa y los resultados inmediatos que ofrece. Su concepto es entendido en un sentido amplio y dinámico referente al efecto de la materia orgánica sobre la planta, ya que existen indefinidos números de sustancias tóxicas que interactúan juntas, pero en cada caso de manera específica. Los cambios dinámicos hacen referencia a que muchas veces, la presencia de sustancias tóxicas de materia orgánica descompuesta no presenta un estado permanente. La sensibilidad de la planta o semillas a las toxinas por lo general resulta ser una condición transitoria (Zambrano, 2005).

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Por otra parte, la evolución de CO₂ también conocido como respiración del suelo, es usada ampliamente para referenciar la actividad biológica general de la biota del suelo, la cual está constituida por microorganismos tales como: bacterias, hongos, actinomicetos, protozoos, además de macroorganismos a saber: lombrices, insectos, nematodos etc., y raíces de plantas, hojarascas etc. Químicamente, la respiración del suelo es la oxidación biológica de la materia orgánica para transformarse en CO₂ (Paz, 2006). Se define como el consumo de O₂, o desprendimiento de CO₂ producto de la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el suelo, así como el intercambio de gases que se origina del metabolismo de organismos aeróbicos y anaeróbicos (Hernández y García, 2003).

Las comunidades microbianas representan las principales fuentes impulsoras responsables de la sostenibilidad a mediano y largo plazo de los ecosistemas debido a su capacidad de regular la formación y descomposición de la materia orgánica del suelo y los residuos vegetales, la disponibilidad de nutrientes esenciales, ciclo y secuestro de carbono, biodegradación de muchas sustancias orgánicas tóxicas y también la biotransformación de metales tóxicos en el suelo (Xu et al., 2019). Los microorganismos y enzimas del suelo reflejan condiciones que aportan información temprana de cambios ecológicos en la calidad del suelo debido a la perturbación y contaminación producida por la presencia de metales pesados (Alloway, 2012).

Al incrementar la actividad microbiana incluyendo las actividades enzimáticas, en respuesta a la adición de abonos orgánicos, se influye activamente en el contenido de materia orgánica del suelo y, por lo tanto, en la disponibilidad y toxicidad de metales pesados como el cadmio. La adición de abonos orgánicos

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

para mejorar el contenido de carbono orgánico del suelo, puede hacer que el cadmio sea biológicamente menos móvil y menos tóxico para la comunidad microbiana del suelo, posiblemente debido al aumento de la población microbiana resistente al cadmio (Raiesi y Dayani, 2020).

Metal pesado es todo elemento químico metálico de alta densidad (> 5 g/mL), tóxico en concentraciones muy bajas. Generalmente se encuentran como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Prieto et al., 2009). Ubicándose en este grupo el Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Fe, Mn, Pb, Ni, Mo, Sn, V, Zn; la toxicidad de estos metales está sujeta a las características físicas y forma química en las que se encuentre en el medio y de las características fisicoquímicas del medio receptor (Venegas, 2015).

El conjunto de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo lo hacen un sistema clave, especialmente importante en los ciclos biogeoquímicos, en los que es capaz de realizar funciones de filtración, descomposición, neutralización, inactivación, almacenamiento, etc. Por todo ello, el suelo actúa como una barrera protectora de otros medios más sensibles, como los hidrológicos y los biológicos. Sin embargo, cuando se superan ciertos umbrales de concentración de sustancias contaminantes y se alteran las funciones reguladoras del suelo, es cuando se habla de contaminación (Larios, 2014).

Los metales y compuestos presentes en las diferentes fracciones del suelo, varían en el grado de movilidad, es decir, su biodisponibilidad es dependiente de procesos e interacciones físicas, químicas y biológicas. Los enlaces a metales pesados y su biodisponibilidad dependen de propiedades del suelo;

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

granulométrica, contenido de materia orgánica, presencia y forma de cationes, capacidad de sorción, pH, contenido de nutrientes, potencial de óxido reducción, actividad microbiana, resistencia del suelo entre otros (Fijalkowski et al., 2012).

La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo hacia aguas subterráneas y difiere de su origen (natural o antrópico) y dentro de este último, al tipo de fuente antrópica. Los procesos de acumulación de metales pesados en el suelo representan riesgos significativos para los seres vivos, por tal razón, se han realizado diferentes estudios para evaluar la dinámica y solubilidad de los metales pesados en el suelo y así remediar el problema, restaurando y mejorando los suelos, especialmente agrícolas. En el caso particular del cadmio, éste es un metal presente en el suelo a concentraciones relativamente bajas. Sin embargo, supone un riesgo para la salud pública y el medio ambiente debido a que se caracteriza por ser bioacumulable en diferentes cultivos, persistente y tóxico. La Unión Europea establece que el valor límite de concentración de cadmio en suelos agrícolas es de 1 a 3 ppm en materia seca de suelo a pH entre 6 y 7. En cuanto a factores de toxicidad, el mercurio y el cadmio tiene factores más altos (40 y 30 respectivamente) comparados a otros metales pesados que tienen factores de 1 a 10 (Wang et al., 2020).

Los suelos con alta capacidad de absorción de cationes, contienen una gran cantidad de minerales arcillosos, contribuyendo a la acumulación de elementos metálicos. Al incrementar el contenido de materia orgánica al suelo, se puede minimizar la absorción de metales pesados por tejidos vegetales (Fijalkowski et al., 2012). Sin embargo, existe mayor biodisponibilidad de metales pesados en suelos con bajo contenido de ácidos húmicos y a medida que aumenta el pH del

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

suelo (entre 6,5 y 7,5), los metales como el zinc y en menor grado, el cobre se vuelven menos tóxicos para las plantas (Wyszkowska et al., 2013).

Estudios señalan que la movilidad, la especiación y distribución puede verse influenciada por la materia orgánica mediante la interacción de metales con grupos funcionales asociados a materia orgánica. Por esta razón, las enmiendas orgánicas como el compost podrían favorecer la fijación y estabilidad de los metales de una manera efectiva debido a su alto contenido de materia orgánica y microorganismos (Clemente y Bernal, 2006). Por otra parte, dada las características de la Materia Orgánica Disuelta (MOD) su papel fundamental en la migración y transformación de metales pesados en el suelo (Zhu et al., 2016), en la absorción de grandes cantidades de cationes de metales pesados y como portador natural migratorio de metales (Zhao et al., 2019). Se ha encontrado que la MOD en el suelo puede afectar de manera directa o indirecta la transformación, biodisponibilidad, migración y toxicidad a través de su influencia sobre la adsorción, desorción, quelación, complejación, intercambio iónico, precipitación y floculación de metales pesados (Liu et al., 2019; He et al., 2018). Esto hace que la MOD, sea el compuesto que determina la dinámica de las diferentes interacciones en el suelo.

El potencial de redox es el responsable, que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido alterando su solubilidad. Por ejemplo, en ambientes reductores como suelos anegados, se reduce la biodisponibilidad del cadmio debido a la formación de sulfuro de cadmio. Cuando los sulfatos se reducen a sulfuros, la tendencia es a producir la precipitación de los metales, bajo la forma de CdS, CuS, MnS, FeS₂, ZnS, HgS (Dávila, 2019). La mayoría de los metales están más disponibles a pH ácido, con excepción de As, Mo, Se y Cr los cuales se movilizan a pH alcalino. El pH afecta el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad,

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

adsorción e intercambio de iones en el suelo, además, altera el proceso de ingreso del metal a las raíces (Lamb et al., 2009). En suelos ácidos, ocurre una competencia de los iones H^+ con los cationes metálicos por los sitios de intercambio. Con pH bajo, se produce la desorción de los metales pesados, aumentando la concentración y biodisponibilidad de los mismos en el suelo y con el aumento de pH, los metales son removidos de la solución del suelo y adsorbidos por los coloides del mismo, disminuyendo su biodisponibilidad (Pinamonti et al., 1997). El potencial de hidrógeno afecta la carga eléctrica de los componentes de la fracción coloidal del suelo (menores a 2 micras), constituida por las arcillas, óxidos y materia orgánica humificada que poseen carga dependiente del pH, la cual se hace más negativa a pH alcalino y más positiva a pH ácido (Dávila, 2019).

El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos vías. En el primer caso, los cationes Na^+ y K^+ pueden reemplazar a metales pesados en la zona de intercambio catiónico. En el segundo caso, el Cl^- y $SO_4^{=}$ forman compuestos estables con metales tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg (Galán, 2000).

Generalmente las arcillas se caracterizan por tener cargas eléctricas negativas principalmente, en su superficie. Estas cargas son responsables de la CIC del suelo, inmovilizan o frenan la dinámica de los cationes metálicos en la solución del suelo, haciendo que los metales permanezcan por mayor tiempo alojados en el suelo, disminuyendo su solubilidad y biodisponibilidad (Kabata, 2000).

Cuando se adiciona nitrógeno y fósforo en diferentes proporciones y formas químicas, la absorción de algunos metales por las plantas como el cadmio, se ve alterada debido a cambios de la CIC y del pH de los suelos. Los cambios de pH

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

como consecuencia de aplicación de los fertilizantes y la continua modificación de la fracción Cd-disponible. Tiller (1989) realizó estudios que demuestran que el añadir pequeñas cantidades de zinc (menor a 10 kg/ha) hace que disminuya el contenido de Cd en ciertos cultivos. Sugiere dos explicaciones: en la primera, la deficiencia de zinc genera una situación de estrés en la planta, que daría lugar a una reducción de la membrana de las raíces facilitando la absorción de Cd. En la segunda, la deficiencia de zinc produce la liberación de agentes quelantes hacia la rizósfera, con el fin de atrapar iones zinc, haciendo que aumente indirectamente la disponibilidad de cadmio.

Existen factores que afectan la solubilidad de metales en el suelo y su biodisponibilidad para las plantas, entre ellos se tiene la actividad microbiana, que puede inmovilizar metales favoreciendo la precipitación de sulfatos y óxidos de hierro hidratados. Las bacterias del suelo afectan la biodisponibilidad al absorber metales a través de grupos funcionales orgánicos en su pared celular o inclusive al acidificar el suelo (Soler et al., 2010). Los metales se unen a la superficie celular de hongos y bacterias a través de mecanismos que incluyen interacciones electrostáticas, fuerzas de Van der Waals, enlace covalente, interacciones redox, precipitación extracelular o la combinación de esos procesos; los grupos cargados negativamente (carboxil, hidroxil, fosforil) de la pared celular bacteriana absorben los iones metálicos y estos son retenidos (Azevedo et al., 2003).

Estudios realizados en China, por Liu et al. (2009), datan el efecto de la aplicación de compost elaborado a base de estiércol de aves mezclado con paja, en la inmovilización y biotoxicidad del Cd en suelos cultivados con trigo (*Triticum aestivum* L.). Los suelos tratados, con varios niveles de cadmio (0 - 50 mg de Cd/kg de suelo) fueron modificados con 0; 30; 60 y 120 g/kg de compost. Los

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

resultados indican una disminución de la fitotoxicidad del cadmio por la acción del compost, además, se atribuyó al aumento del pH del suelo a la formación de complejos de Cd con la materia orgánica y la coprecipitación con fósforo. La adición de compost fue efectiva al dar como resultado un 70% menos de Cd soluble e intercambiable en el suelo, reducir la fitotoxicidad de Cd en más de un 50% la absorción del metal por el tejido y las semillas de trigo mejorando a su vez el rendimiento de los cultivos.

Lora y Bonilla (2010), en Colombia, analizaron muestras de suelo que contenían Cd y Cr, indicando contaminación, realizaron un bioensayo, para conocer el efecto de remediación, empleando lechuga y pasto ryegrass. Las fuentes y las dosis de los materiales remediados corresponden a diferentes dosis de CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y FeSO_4 , y de diatomácea activada (algas microscópicas con caparazón silíceo). Los resultados muestran que el contenido de Cd y Cr de lechuga y de pasto era elevado en el testigo. Para ryegrass, la aplicación de 6000 kg/ha de CaCO_3 o de 600 kg/ha de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ redujo el Cd, a niveles no tóxicos; para lechuga, la aplicación de 6000 kg/ha de CaCO_3 o de 2000 kg/ha de diatomácea activada, hizo que disminuyera considerablemente el Cd en la planta.

En otra investigación Sánchez (2013), modela los procesos químicos asociados a la dinámica del Cd mediante el estudio del proceso de adsorción y fraccionamiento secuencial del metal, en dos suelos venezolanos de uso agrícola identificados como Mariara y El Tigre, mediante ensayos de incubación de estos suelos con una dosis de cadmio a escala de laboratorio e invernadero, con distintos tratamientos de fertilizante fosfatado, en ausencia y presencia de un cultivo de maíz (*Zea mays*). El suelo con mayor contenido de arcilla, materia orgánica y pH ácido, adsorbe más cadmio. En el suelo Mariara, para los distintos tratamientos

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

con fósforo, el 40% del contenido promedio de Cd total se encontró ligado a la fracción intercambiable, materia orgánica e hidrosoluble, mientras que en el suelo El Tigre se obtuvo que 70% del contenido total de Cd en el suelo se encontraba en la fracción intercambiable, de los cuales 16% del cadmio está ligado a la fracción de los oxihidróxidos de Fe y Mn, y el resto en las demás fracciones.

En ambos suelos, los niveles de Cd en el tejido vegetal de plantas de maíz fueron superiores a las establecidas como concentraciones normales en plantas ($\geq 0,1 \text{ mg/kg}$). A los 15 días las plantas cultivadas en el suelo Mariara no mostraron síntomas visibles de fitotoxicidad, sin embargo, se observó necrosis en las plantas cultivadas en el suelo El Tigre, indicando riesgo en la calidad de las plantas de maíz cultivadas.

Cortés et al. (2016) estudiaron el efecto de los ácidos húmicos purificados a diferentes concentraciones, en dos suelos agrícolas colombianos, Andisol y Vertisol, sobre la extracción secuencial de metales pesados después de ser incubados 60 y 90 días. La movilidad de los metales se redujo con la adición de dichos ácidos, reteniendo mayormente Ni, Cu, Zn y Cd en la matriz del suelo. La evaluación del efecto de la adición de ácidos húmicos sobre la extracción secuencial de metales se efectuó mediante la comparación de cada uno de los tratamientos con y sin aplicación de ácidos húmicos y para cada metal por separado. El Cd, presentó un mayor factor de movilidad, el cual disminuyó, con la adición de los ácidos húmicos como consecuencia del incremento de los sitios de intercambio.

El incremento del tiempo de incubación permitió la interacción de los metales con los componentes de los suelos, produciendo disminución de su movilidad debido a la formación de complejos estables y/o al incremento de la

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

capacidad de intercambio catiónico de los suelos. Otro estudio realizado también por Cortés et al. (2017) para determinar la toxicidad de Cu, Ni, Cd, Pb y Zn en dos suelos agrícolas colombianos, Andisol y Vertisol mediante bioensayos con *Lactuca sativa* y *Vibrio fischeri*, se realizaron adicionando los metales individualmente a las muestras de suelo, hasta superar el nivel máximo permitido por la Junta de Andalucía, con 626 mg/kg de Cd a partir de Cd(NO₃)₂. El suelo Vertisol presentó mayor capacidad de inmovilización de los metales, según el contenido de arcillas y pH neutro, reflejándose en menor toxicidad sobre las especies del ensayo, siendo esto indicativo de que el suelo actuó como protector contra la movilidad de contaminantes.

La capacidad de ambos suelos para inhibir la toxicidad se incrementó con el tiempo, debido a la interacción de los metales con los diferentes componentes de los suelos, disminución de su movilidad por la formación de complejos estables y por el incremento del pH. En China, estudiaron las propiedades del estiércol de vaca y sus derivados del vermicompost, incluídos el pH, capacidad de intercambio catiónico, composición elemental y estructural de la superficie, etc., con el objetivo de determinar el potencial de estos productos para eliminar Pb²⁺ y Cd²⁺ en solución acuosa. Quedó demostrado la efectividad de ambas enmiendas para actuar como adsorbentes de dichos metales. Sin embargo, los resultados reflejan que el vermicompost, manteniéndose un control mediante adsorción química, fue mucho más efectivo para eliminar y retener iones de Pb²⁺ y Cd²⁺ que el estiércol de vaca (Zhu et al., 2017).

Munive et al. (2018) observó el efecto de las enmiendas orgánicas ((compost y vermicompost de estevia (*Stevia rebaudiana*)) además de una planta fitorremediadora, maíz (*Zea mays*), a fin de reducir la contaminación por metales

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

pesados en los suelos del centro de Perú. Se emplearon suelos agrícolas de la localidad Mantaro y Muqui del valle del Mantaro, cuyos contenidos de Pb y Cd superan el límite de calidad ambiental permitidos para los suelos en el país. Los resultados indican que los suelos de Muqui, contienen mayor cantidad de Pb y Cd, presentando menor rendimiento agrícola. El maíz absorbe los metales pesados del suelo y acumulando Pb y Cd en la raíz de la planta. Los cálculos del Factor de Bioconcentración y Factor de Translocación, indican que el maíz es una planta exclusora o estabilizadora. La aplicación de las enmiendas orgánicas contribuye a solubilizar el Pb y Cd del suelo. Siendo el vermicompost de estevia más efectivo absorbiendo los metales pesados del suelo.

En Brasil se examinó cómo los diferentes métodos de compostaje (compostaje de hileras, contenedor de malla de alambre para compostaje y el compostaje de pilas estáticas con aire pasivo) afectan el producto final y cómo sus características influyen en su capacidad de adsorción de metales como Pb, Zn y Cd de los desechos mineros. Se estudió las propiedades fisicoquímicas de los compost, así como sus capacidades de adsorción, mediante pruebas de equilibrio de lotes con Pb, Zn y Cd en soluciones de un solo elemento. Todos los compost revelaron características de adsorción, a un pH casi neutro (6,4 - 7,7); presencia considerable de materia orgánica (193,92 - 418,70 g/kg); una variada CIC (29 - 75 cmol/kg). La eliminación del cadmio osciló entre 55,4 y 89,8%. Los resultados indican que los compost comparten características intrínsecas similares, demostrando que los diferentes métodos de compostaje influyeron en las propiedades fisicoquímicas de productos finales (Lima et al, 2018).

En investigaciones similares, se evaluó la contaminación por metales potencialmente tóxicos (PTM) junto con la acidificación del suelo como amenaza

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

para la sostenibilidad agrícola de la región tropical en el mundo. Se aplicó un vermicompost (VC) producido a partir del estiércol de ganado de vermicompostaje en un ambiente tropical para remediar un suelo ácido tropical en Hainan, China. Se evaluó la eficacia de VC en la reducción de PTM disponibles en suelos mediante experimentos de incubación con un suelo enriquecido con Cd, Cr y Ni y un suelo de campo contaminado con Cd. Se determinaron cambios dinámicos de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, después de aplicar la enmienda de VC para comprender los mecanismos de inmovilización de PTM. Los resultados mostraron que el VC redujo las cantidades extraíbles con CaCl_2 de Cd, Ni y Cr en los suelos enriquecidos y el Cd extraíble con CaCl_2 se redujo en un 49,3% cuando se aplicó VC al suelo de campo con Cd.

Los estudios termodinámicos mostraron que VC tenía una alta capacidad de adsorción de Cd, Ni y Cr, con la adsorción máxima (modelo Langmuir) de 33,45; 26,17 y 20,88 mg/g, respectivamente. La reducción en los metales extraíbles con CaCl_2 después de aplicar la enmienda de VC fue consistente con el orden de adsorción máxima de VC para Cd, Ni y Cr. Se consiguió que el VC aumentó el pH del suelo entre 0,7 y 1,5 lo que se relaciona positivamente con la tasa de aplicación de VC, pero negativamente con la disminución de los metales extraíbles. Los resultados indican que la adsorción de metales con VC y un aumento en el pH del suelo después de aplicar la enmienda de VC, probablemente sean responsables de la menor disponibilidad de Cd, Ni y Cr en el suelo contaminado, la adición de sustancias orgánicas estables y posterior formación de agregados estables al agua, puede ser beneficiosa para inmovilizar PTM y mejorar la calidad del suelo tropical estudiado (Liu et al., 2019).

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

Martínez y Marrugo (2021) desarrollaron un trabajo para evaluar el efecto de la adición de diferentes enmiendas (biochar, vermicompost y cal) sobre la inmovilización de Hg, Pb, Cd y As en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia; se caracterizó el suelo y las enmiendas empleadas, estableciendo un sistema en envases de dos litros de capacidad y estabilizado durante 30 días. Las concentraciones de metales pesados en los distintos tratamientos fueron ligeramente menores a las encontradas en el suelo control, y la enmienda que mostró mayor reducción de la biodisponibilidad de Pb, Cd y Hg fue el biochar con reducciones entre 54-84% con respecto al control. Con el vermicompost se observó reducciones significativas de los metales evaluados ($p<0,05$), especialmente Pb y una ligera disminución en la biodisponibilidad al aumentar el nivel de dosis de la enmienda para el Cd y el Pb con biochar y para el As con cal; sin embargo, estas diferencias no fueron significativas ($p > 0,05$).

Irfan et al. (2021), interesados en inmovilizar metales pesados en suelos contaminados principalmente con Pb, Cd y Cr, mediante el uso de biochar y compost, investigaron el efecto comparativo del biocarbón y el compost sobre suelos enriquecidos con Pb, Cd y Cr en concentraciones de 20, 10, 20 mg/kg respectivamente. Los tratamientos de biocarbón y compost incluidos 0; 0,05; 1,2 y 4% se aplicaron por separado al suelo, recogiendo las cosechas de las macetas luego de 60 días de tratamiento. Sus resultados muestran reducción de Pb, Cd y Cr extraíbles con AB-DTPA en el suelo siendo de 79, 61 y 78% con 4% de biocarbón, seguido de 61; 43 y 60% con 4% de compost en comparación con el control, respectivamente. Donde el biochar y el compost disminuyeron la disponibilidad de metales pesados en el suelo. Siendo el biocarbón más eficaz en la reducción de metales pesados.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

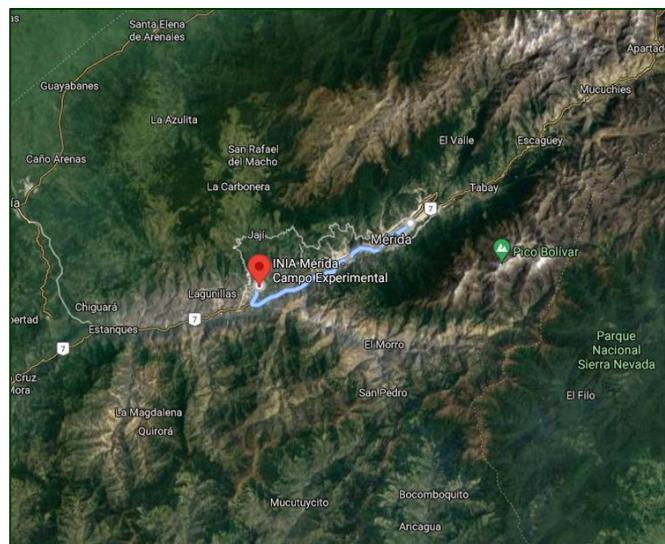
Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

2. Materiales y métodos

2.1. Selección y muestreo de la enmienda orgánica y el suelo utilizado

El área seleccionada para la muestra de compost de cacao y suelo fue el Campo Experimental San Juan de Lagunillas del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), en la población de San Juan de Lagunillas, municipio Sucre del estado Mérida - Venezuela (Figura 1). Con coordenadas: Latitud 08°30'55,7'' N, Longitud 71°20'24,8'' W. Altitud 1077 msnm.

Figura 1. Ubicación relativa del Campo Experimental San Juan de Lagunillas del INIA-Mérida



Fuente: GM75+VM9, San Juan de Lagunillas, San Juan, Mérida.
<https://maps.app.goo.gl/zyYisdofK4hyzaZy5>. Fecha de consulta 06/11/2023

La enmienda orgánica usada es un compost a base de restos de postcosecha procedente de diferentes pilas de almacenamiento, sometido a un proceso de compostaje bajo condiciones de humedad y temperatura controladas. Una vez

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

transcurrido el tiempo de compostaje (seis meses), el material se evaluó. La muestra se secó al aire, triturada y tamizada a 2 mm.

El suelo seleccionado para el estudio es procedente de dicho Campo Experimental que ocupa una extensión de dos hectáreas y se encuentra dividido en seis áreas denominadas parcela 1; parcela 2; parcela 3; parcela 4; parcela 5 y parcela 6. De cada parcela se procedió a realizar una toma de muestra sistemática. Sus características fisicoquímicas ya evaluadas por Carrero (2014), se encuentran en la Tabla 1 a manera de información preliminar.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo seleccionado

Suelo	Textura	C.E (dS/m)	C.O (%)	pH Relación 1:2,5	Ca (ppm)	Mg (ppm)	K (ppm)	P (ppm)
San Juan	FA	1,953	3,25-4,36	8,5-8,6	5282-4958	550-384	78-181	5,82-6,68

FA: franco-arcilloso

C.E: conductividad eléctrica

C.O: carbono orgánico

2.2. Propiedades fisicoquímicas y biológicas evaluadas del compost de cacao

a) Propiedades físicas

Retención hídrica: Se determinó siguiendo el método de Trautmann y Krasny (1998) conocido como método del cilindro, considerando el drenaje de la enmienda orgánica por efecto de la gravedad, al hacer pasar un volumen determinado de agua destilada a través de la porción del material previamente pesado, el cual se dejó sobre un embudo para luego recoger en un cilindro graduado el líquido remanente que no fue retenido por la enmienda orgánica. Por diferencia de volumen de líquido agregado menos el líquido colectado en el

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

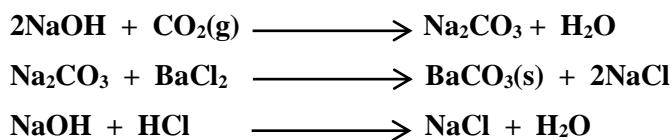
cilindro, se obtuvo el valor de la capacidad de retención hídrica de material orgánico.

Densidad: Siguiendo el método de Inbar et al. (1989), se agregó en un cilindro graduado, una cantidad determinada de agua destilada, luego se agregó una cantidad previamente pesada de enmienda orgánica. Se observó el desplazamiento del líquido dentro del recipiente, tomando la lectura del volumen recorrido.

Conductividad eléctrica (CE): Siguiendo el método de Rhoades (1996), con el cual se determinó la CE del compost en una relación 1:5 enmienda orgánica y agua destilada.

b) Propiedades biológicas

Respiración microbiana o desprendimiento de CO₂: Se utilizó el método de Stotzky (1965), para medir el contenido de CO₂ desprendido por la respiración de los microorganismos, incubando 10 g de enmienda orgánica dentro de un recipiente de 500 mL de capacidad, cerrado herméticamente luego de suspender un vial en su interior, el cuál contenía 20 mL de NaOH 0,1 N. El CO₂ desprendido se determinó mediante la titulación del exceso de NaOH con HCl 0,1 N en presencia de fenolftaleína, previamente precipitando carbonatos con BaCl₂, como se indica en la siguiente reacción:



Fitotoxicidad: Para evaluar la toxicidad generada por el cadmio en la enmienda orgánica, se realizaron pruebas de germinación de semillas de acuerdo al método propuesto por Zucconi et al. (1981a, 1981b). Para ello se hizo el seguimiento de

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

la fitotoxicidad a través de la germinación de semillas de Lechuga Batavia (*Lactuca Sativa L.*) variedad longifolia en diferentes extractos cuya relación enmienda:agua fue de 1:1; 1:5 y 1:10 respectivamente.

El ensayo se preparó con 10 réplicas, de 10 semillas en placas de Petri agregando 1 mL de extracto líquido correspondiente a cada muestra de compost y el blanco respectivamente y se llevaron a una incubadora a $24 \pm 0,1$ °C durante 48 horas, en dos series (una muestra de compost con y sin Cd. El índice de germinación (IG), se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IG = \bar{LM} \times \frac{\% G}{\bar{LM}_{Blanco} \times \% G_{Blanco}}$$

dónde:

\bar{LM} es la longitud media de la raíz para una muestra determinada.

\bar{LM}_{Blanco} es la longitud media de la raíz en el blanco

%G es el porcentaje de germinación de la muestra

% G_{Blanco} es el porcentaje de germinación del blanco.

c) Propiedades químicas

Potencial de hidrógeno (pH): Según el valor obtenido de la capacidad de retención hídrica y densidad de la enmienda orgánica, se determinó el pH mediante el método potenciométrico según Gilabert et al. (1990). Para ello se preparó una mezcla con una relación 1:2,5 de enmienda: agua destilada respectivamente. La mezcla se agitó durante 30 minutos y luego se dejó en reposo, para posteriormente ser medida con el pHmetro previamente calibrado.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Según el método de Harada e Inoko (1980), se pesó 200 mg de enmienda orgánica y se agregó 25 mL de HCl 0,05 N

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

se agitando por 10 min, se dejó reposar por 20 min, filtrando al vacío. Se agregó nuevamente 25 mL de HCl 0,05 N y se filtró. Se agregó 25 mL de solución de Ba(OAc)₂ 1 N ajustando el pH a 7. Se dejó en reposo por 12 h, se filtró por gravedad. Se agregó nuevamente 25 mL Ba(OAc)₂ 1 N y se filtró. Se combinaron los lavados y filtrados, titulando la solución con NaOH 0,05 N.

Contenido de cadmio: La determinación de Cd se llevó a cabo en un equipo de espectroscopia de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 600 con atomización electrotérmica. Usando un corrector de fondo Zeeman, con calentamiento longitudinal en horno de grafito calentado transversalmente. Una fuente con lámpara de cátodo hueco con una corriente de la lámpara de 7 mA a una longitud de onda de 228,8 nm. El volumen de inyección de la muestra fue de 20 µL, utilizando como modificador de matriz 10 µg de paladio (Pd) y un volumen de inyección de 10 µL. En la Tabla 2, se presenta el programa de calentamiento para la determinación de cadmio.

Tabla 2. Programa de calentamiento optimizado

Etapa	Temperatura (°C)	Tiempo de rampa (s)	Tiempo de espera (s)	Flujo de gas (mL/min)
Secado	110	1	30	250
Secado	130	15	30	250
Pirólisis	400	10	30	250
Atomización	1400	0	5	0
Limpieza	2450	1	3	250

Cadmio hidrosoluble: La extracción y determinación del cadmio hidrosoluble se realizó según el método propuesto por Duley et al. (1988). Se prepararon mezclas de enmienda orgánica y suelo enriquecido con una concentración determinada de cadmio (5 mg/kg), a diferentes proporciones respectivamente (1:10; 2:10; 3:10).

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Luego se realizó la extracción de cadmio hidrosoluble en una relación 1:50 muestra incubada (enmienda/suelo) y agua, a temperatura ambiente. Dicha extracción se realizó de manera secuencial y sistemática para evaluar el comportamiento de la enmienda orgánica sobre el suelo al cabo de 7; 15; 30; 60 y 240 días de enriquecido el material.

Cadmio total: Se realizó de acuerdo al método de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, 1996. Method 3050B). El cual consiste en la digestión de una muestra de materia orgánica representativa de 1 gramo (peso húmedo) con adiciones repetidas de HNO₃ concentrado y H₂O₂ al 30%. El material digerido, resultante se redujo en volumen mientras se calentó en reflujo a 95 °C. Se disolvió y filtró en papel de filtro Whatman N.º 41. Se diluyó a un volumen final de 100 mL, y se determinó por espectroscopia de absorción atómica con atomización electrotérmica, siguiendo el protocolo conforme al manual de metodologías para análisis de metales (Perkin, 2003).

3. Resultados, discusión

A continuación, en la Tabla 3, se muestra los resultados promedio obtenidos para los parámetros: densidad relativa, conductividad eléctrica (C.E), potencial de hidrógeno (pH) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Tabla 3. Resultados de las propiedades físicas y químicas de la enmienda orgánica

Variable	Compost de Cacao	Compost de Cacao-Cd
Densidad (g/cm ³)	0,1668	0,1669
Desviación estándar (S)	0,06	0,06
C.V. (%)	0,03	0,03
C.E (Relación 1:5) dS/m	10,45	8,68
DESV.ST	0,02	0,01
C.V. (%)	0,15	0,07
pH (Relación 1:2,5)	8,45	9,00

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Variable	Compost de Cacao	Compost de Cacao-Cd
Desviación estándar (S)	0,05	0,02
C.V. (%)	0,59	0,22
CIC (meq/100 g)	943,2751	824,7546
Desviación estándar (S)	0,6248	0,8579
C.V. (%)	0,0662	0,1040

La comercialización del compost se realiza en volúmenes grandes, por lo que resulta necesario tener en cuenta el valor de la densidad aparente, relación entre peso del material y el volumen. La densidad aparente, se ve afectada por la distribución del tamaño de partículas, el contenido en materia orgánica y su grado de descomposición, debido a la humedad de los materiales orgánicos. La densidad se incrementa dependiendo del tiempo de compostaje, en consecuencia, de la reducción del tamaño de partícula y la completa descomposición del material (Salazar, 2019). El valor promedio obtenido de la densidad aparente del compost de cacao enriquecido con cadmio y en ausencia del metal es de 0,1669 y 0,1668 g/cm³ respectivamente como se observa en la Tabla 2, cuyos resultados presentan desviación estándar menor a 0,05 y coeficiente de variación menor a uno, cumpliendo con el rango aceptable estadísticamente bajo condiciones de repetibilidad (Hurtado et al., 2017). Aunque estos resultados, como era de esperarse no muestran ningún tipo de interacción con los propósitos de esta investigación, la densidad aparente, no deja de ser una variable importante en los materiales orgánicos, como ya se discutió anteriormente.

Según Jara et al. (2017), valores alrededor o menores a 0,2 g/cm³ para un material compostado, representan un valor adecuado, lo que indica que el compost de cacao alcanzó valores cercanos a los generalmente considerados óptimos para su uso. Valores similares de densidad aparente obtuvieron Chang et al. (2019) en

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

un compost de paja de maíz ($0,20 \text{ g/cm}^3$) luego de 30 días de compostaje. Los resultados confirman que la densidad aparente es una característica determinada por el origen del material orgánico. Otro parámetro de calidad de enmiendas orgánica es la C.E., cuyos resultados y análisis se discuten a continuación.

La C.E. es una medida del contenido de sales disueltas en el compost y representa una medida significativa debido a que refleja la salinidad del material y proporciona una medida de su potencial agronómico como enmienda orgánica (Huang et al., 2017). El valor promedio obtenido de la C.E. medida para el compost de cacao sin cadmio y enriquecido con 5 mg/kg de cadmio fue de 10,45 y 8,68 dS/m respectivamente (Tabla 2). Estos resultados indican que el compost presenta alto contenido en sales, posiblemente como consecuencia del material de origen y restos de suelo incorporados al compost durante su elaboración.

Según algunos autores, éstos valores exceden el valor crítico requerido para el uso adecuado de enmiendas orgánicas, que se encuentra alrededor de 0,04 dS/cm (Awasthi et al., 2014; Jara et al., 2017) principalmente considerándose materiales compostados. Sin embargo, hay estudios que contradicen el valor crítico de C.E. para enmiendas orgánicas compostadas, afirmando que valores menores a 5 o mayores a 8 dS/m no es un indicativo de falta de madurez y estabilidad de un compost; tal es el caso de Beloso (1991), en su estudio para evaluar las propiedades físicas y químicas de diferentes materiales compostados, afirma que un intervalo de C.E. entre 5 y 8 dS/m no implica que el compost esté inmaduro, porque éste parámetro está estrechamente relacionado con el origen del material.

Por otra parte, Siles et al. (2020) obtuvieron valores altos de conductividad eléctrica para un compost a base de restos postcosecha de tomates (13 dS/m)

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

resultado que atribuyen al origen del material, por el previo estudio de la conductividad de los residuos (sin compostar) de las plantas de tomate, cuyo contenido de sal era elevado, sin embargo, el alto nivel de salinidad del material, no representó un inconveniente para ser utilizado como agente remediador de suelos y plantas contaminados con metales pesados. No obstante, Nicholson et al. (2003) consideran que existen riesgos al utilizar este tipo de enmiendas con alta C.E., creando impactos ambientales negativos por el uso prolongado de estos materiales, debido a la posible presencia de patógenos, altos niveles de sales disueltas (KCl y NaCl), e inclusive pueden propiciar la introducción de nuevas fuentes de metales pesados a la solución del suelo.

Por otra parte, es notoria la influencia del metal en el valor de conductividad obtenido para el compost de cacao enriquecido con cadmio ya que ésta muestra presentó una disminución de la C.E. comparada al compost de cacao sin enriquecer con cadmio, lo que pudiera atribuirse a la presencia de cargas en los sitios de intercambio, por ejemplo, grupos $-COO^-$ de las sustancias húmicas cuya capacidad de formación de quelatos es alta, reteniendo cationes en formas no activas. Por ejemplo, Ouni et al. (2014) en su revisión sobre la influencia de los ácidos húmicos en los efectos directos e indirectos sobre la mejora de las propiedades de suelos salinos. El cual coincide con lo argumentado en los resultados de Rady et al. (2016), de la C.E. de un suelo contaminado con metales pesados, enmendado con una mezcla de compost de diferentes materiales agrícolas. El valor de la C.E. del suelo sin la enmienda fue de 6,73 dS/m y luego de ser tratada con el compost disminuyó a 5,83 dS/m.

Otro hallazgo se observa en las investigaciones de Semida et al., (2014) al emplear una mezcla de compost de residuos verdes, azufre y ácidos húmicos; en

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

distintas proporciones para disminuir el estrés de salinidad de suelos calcáreos provistos de metales pesados. Se observó un decrecimiento en la C.E. conforme se incrementó la dosis de tratamiento con la enmienda orgánica (10; 20; 30 g/kg). La C.E. del suelo inicial fue 6,47 dS/m y al aplicarse la enmienda su valor disminuyó a 6,21; 5,89; y 5,72 dS/m respectivamente. Los resultados se atribuyen a la acumulación de ácidos orgánicos activos en el suelo y la CIC de los ácidos húmicos. Así como la C.E. es una propiedad que refleja la calidad de un material orgánico compostado, el pH representa un factor importante para dar a conocer la capacidad de uso de una enmienda orgánica, por ello se expresa a continuación el análisis y discusión de los resultados obtenidos para la determinación de los valores de pH del compost en estudio.

Potencial de hidrógeno (pH): El pH es una de los parámetros más importantes para comprender la dinámica de los metales pesados en la solución del suelo. En la Tabla 1 se observa el valor del potencial de hidrógeno de la muestra de suelo empleada, cuyo parámetro se encuentra entre 8,5 y 8,6 ubicándose en la clasificación de moderadamente alcalino según la clasificación de Casas (2011). Carrero (2014) atribuye el valor del pH del suelo en estudio a los procesos de formación de estos suelos y factores como la textura y baja precipitación.

El pH es considerado un parámetro indicativo de la madurez de una enmienda orgánica. Rivero (1999) afirma que una enmienda con pH 6,0 representa un material inmaduro, mientras que con pH entre 6,0 - 7,6 el material está en su fase de estabilización, y a pH 7,6 se ha alcanzado un alto grado de estabilización; sin embargo, Siles et al. (2020) indica que un material orgánico estable presenta un pH entre 7 - 8. Los valores promedios de pH del compost de cacao con y sin Cd se encuentran entre 8,43 y 8,45 respectivamente, valores que se observan en la

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Tabla 2. Los resultados presentan desviaciones estándar y coeficiente de variación ($< 0,05$ y < 1 respectivamente) aceptables estadísticamente bajo condiciones de repetibilidad. Los resultados obtenidos para el valor de pH del compost de cacao, aunque ligeramente más altos, son cercanos a los valores obtenidos por Huang et al. (2017) para diferentes enmiendas orgánicas como compost de estiércol de cerdo 7,83; abonos de estiércol de ganado 7,52; y abono de estiércol de pollo 8,73 cuyo resultado presentó mayor semejanza.

Siles et al. (2020) obtuvieron valores cercanos para diferentes enmiendas orgánicas como compost de poda de palmeras 7,52 y compost de estiércol de pollo y paja 7,04. Asimismo, Vitinaqaillevu y Rajashekhar (2019) obtuvieron valores de pH para compost de residuos de mazorca de cacao (7,2) y compost de estiércol de cabra (9,9). Para Zambrano (2005) el pH (entre otras variables) depende fundamentalmente del origen del material a compostar. En este sentido, el compost de cacao clasifica para considerarse una enmienda orgánica madura y estable, aunque éste es sólo una de las múltiples variables utilizadas con este fin. Por otra parte, la CIC es considerada una variable importante al momento de fijar criterios para el uso de un material orgánico compostado para fijar criterios de remediación ante la presencia de elementos potencialmente tóxicos en suelos de uso agrícola.

Considerando la influencia de un pH alcalino y la alta capacidad de intercambio catiónico del compost de cacao, es posible deducir que los valores obtenidos en la determinación de estos parámetros, contribuyeron a la disociación de complejos, producto de la unión del metal a ligandos orgánicos de la sustancias húmicas que constituyen la materia orgánica de la enmienda, provocando la movilidad y disponibilidad del metal independientemente del criterio de relación de compost de cacao:suelo que se haya aplicado. Según Poulin et al. (2017) a pH

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

alto, las propiedades de la MDO y las del complejo formado entre el metal pesado y MOD (peso molecular, aromaticidad, hidrofilicidad, hidrofobicidad) podría reemplazar el efecto protón en el control de las cantidades de metales pesados absorbidos.

Existen hallazgos que muestra cómo el efecto del pH sobre la MOD marca efectos amortiguadores ácido-base debido a la gran cantidad de grupos activos complejos en la MOD. Asimismo, Bogusz et al. (2017) manifiestan que dichos grupos activos proporcionan muchos sitios de unión, lo que se esclarece con el fraccionamiento y caracterización de la materia orgánica, esto significa que la cantidad de una especie que podría absorberse en la MOD no varía considerablemente a medida que cambia el pH. Esto explica el hecho de que las diferencias entre los valores de pH del suelo y del compost siendo ambos débilmente alcalinos, no representan un impedimento para que el cadmio se encuentre disponible.

La influencia del pH también supone una relación estrecha a la naturaleza del metal, debido a la existencia de un rango crítico de pH para diferentes metales. Estudios realizados por Yi et al. (2019) para evaluar el efecto de la bioturbación y bioirrigación para removilizar materia orgánica y metales pesados como talio, cadmio, cobre y zinc; previamente enterrados en sedimentos, encontraron que los compuestos hidrófilos de bajo peso molecular forman fácilmente complejos con metales pesados, como ocurre en el caso de la interacción entre la MOD de carácter hidrofílica de bajo peso molecular y metales pesados en el suelo, haciendo que los metales pesados sean más solubles y móviles. Estos compuestos podrían formar complejos solubles con los metales pesados y estos a su vez compiten con partículas por los puntos de unión en la superficie de los suelos, disminuyendo la

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

capacidad de adsorción del suelo para elementos potencialmente tóxicos como el Cd y Hg, produciendo el aumento migratorio de estos metales pesados. Algo similar a lo que puede estar ocurriendo en el compost de cacao y el suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas.

El estudio realizado por Wang et al. (2020) para evaluar el efecto de la MOD sobre el comportamiento de adsorción-desorción y biodisponibilidad de Cd y Hg en un sistema planta-suelo empleando diferentes enmiendas orgánicas sobre suelos incubados con dichos metales pesados determinaron que el Cd era más biodisponible en el sistema planta-suelo a través de la fracción intercambiable dependiendo del material orgánico empleado, ya que el resultado obtenido se atribuye a la presencia dominante de componentes de bajo peso molecular y menos carácter aromático en los compost de paja y estiércol de cerdo.

Huang et al. (2017) destacan que los sorbentes orgánicos modifican el pH y la CIC del suelo influyendo sobre la movilidad de los metales pesados. Asimismo manifiestan Amoah et al. (2020) en su investigación para evaluar la eficacia del biocarbón de virutas de madera y los residuos de carbón marrón como absorbentes estables para la reducción de Cd, Pb y Zn biodisponibles en el suelo, observaron que los sorbentes orgánicos modificaron el pH y la CIC del suelo influyendo en la movilidad de los metales pesados, destacando que la transferencia de los cationes de la solución a la fase sólida del suelo se relacionó a procesos como adsorción física, coprecipitación superficial (con carbonatos, fosfatos o silicatos), intercambio iónico y formación compleja con grupos funcionales. Infirieron en un consenso gradual de que el uso de la notación de pH no proporciona una evaluación cuantitativa adecuada de la actividad de los iones de hidrógeno en el suelo. Por ende, en cada tratamiento, la concentración de iones de hidrógeno se

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

convirtió a pH y se utilizó para establecer correlaciones entre el estado ácido-base y la concentración de metales pesados biodisponible en las fracciones del suelo. Queda claro que el pH del suelo determina la interacción entre los metales pesados, los coloides del suelo y la materia orgánica.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Generalmente el valor de CIC del suelo se expresa como miliequivalente (meq) por 100 g de materia. Los resultados obtenidos en la determinación de la CIC tanto para el compost de cacao sin enriquecer con cadmio como para el que sí fue enriquecido con el elemento metálico de estudio, corresponde a 943 y 825 meq por cada 100 g de enmienda, valores señalados en la Tabla 2. Dichos valores presentan desviaciones estándar y coeficiente de variación ($< 0,05$ y < 1 respectivamente) aceptable estadísticamente bajo condiciones de repetibilidad.

Harada e Inoko (1986) señalan que la capacidad de intercambio catiónico de materia orgánica se ve afectado por condiciones tales como tiempo de reposo para la saturación, concentración de la solución y especies de cationes. Melgarejo et al. (1997) en el estudio que realizaron para evaluar algunos parámetros fisicoquímicos y nutricionales en humus de lombriz y compost derivados de diferentes sustratos, resaltan que la CIC se ve afectada por un proceso de compostaje incompleto, derivado de una limitada actividad microbiana causada por el alto valor de pH del material orgánico. Para Lwin et al. (2018) la descomposición de la materia orgánica se asocia con el aumento de carbono orgánico disponible, hecho que se correlaciona de manera positiva con la liberación de metales pesados, haciendo que disminuya el área superficial y la capacidad de intercambio catiónico, lo que produce un aumento en la disponibilidad y movilidad de metales en función del tiempo. En este sentido, es

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

importante resaltar que el papel principal de las enmiendas inmovilizadoras es alterar las fases originales del metal (fracciones biodisponibles) a fases más geoquímicamente estables (formación de minerales metálicos estables) y/o precipitaciones) a través de los mecanismos combinados de adsorción, complejación y precipitación.

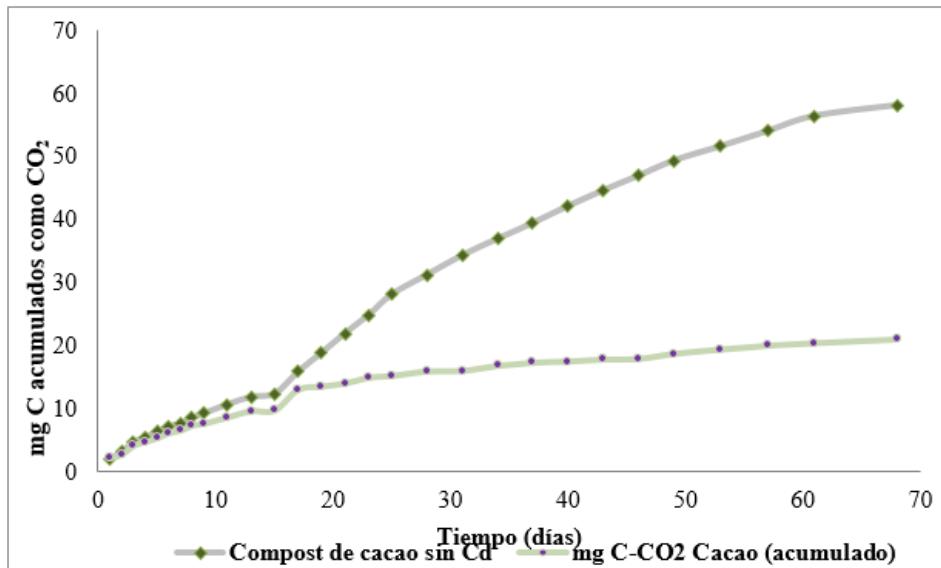
Los resultados obtenidos señalan que el compost de cacao presenta alta capacidad de intercambio catiónico, posiblemente debido a la naturaleza del material seleccionado, especie de cationes que lo constituyen y/o a la falta de madurez y estabilidad de la enmienda durante su proceso de compostaje. Esta propiedad, junto con el pH antes discutido, están comúnmente asociadas con estabilización de metales pesados en los coloides de la materia orgánica (Beesley y Marmiroli, 2011). Los resultados reflejan un decrecimiento en la CIC del compost de cacao enriquecido con cadmio, lo que podría interpretarse como una disminución de los sitios de intercambio, ocupados por el metal en estudiado.

Respiración microbiana: En la Figura 2, se aprecia que la cantidad de carbono liberado en forma de dióxido de carbono (CO_2) se incrementó rápidamente los primeros 10 días del experimento, y luego se percibe un crecimiento paulatino que se mantuvo constante a lo largo de todo el ensayo. Éste comportamiento puede ser un indicativo de que el material empleado no se encontraba totalmente en óptimas condiciones de estabilidad y madurez o la activación de algunos microorganismos que se encontraban en estado de latencia al momento de la incubación respiratoria. No obstante, las concentraciones de carbono como CO_2 son muy cercanas a la de materiales orgánicos estables (Zambrano, 2005).

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

Figura 2. Contenido de carbono desprendido como dióxido de carbono a través de la respiración microbiana del compost de cacao y del compost de cacao enriquecido con Cd.



Los resultados del compost de cacao en ausencia y presencia de Cd, muestran la influencia del mismo sobre la respiración de los microorganismos en el compost de cacao enriquecido con el metal, debido al aumento exponencial del contenido de carbono, en comparación al ambiente en el que respiran los microorganismos en ausencia del metal. Esto indica la posibilidad de interacción entre los microorganismos y el Cd, por intermedio de la materia orgánica. Estudios revelan la capacidad de los microorganismos para asimilar metales pesados, hecho que se explica por el desarrollo de bacterias tolerantes a los metales pesados y con gran capacidad de degradación del material orgánico. Fritze et al. (2000) al evaluar el efecto de la ceniza de madera que contiene Cd, en la microflora de humus de coníferas de bosque, observaron que los actinomicetos se benefician de la adición de Cd. Asimismo, Díaz y Baath (1996) añadieron Cd en forma de sulfato de

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

cadmio, en un suelo agrícola entre seis a ocho meses. Sus resultados indican que la incorporación de 896 mg Cd/kg de suelo seco propiciaron el desarrollo de una comunidad de bacterias tolerantes al metal pesado, mientras que concentraciones menores de Cd revelaron menores diferencias comparadas con el suelo control. Por tanto, la comunidad microbiana asimila los sustratos en presencia de Cd con gran eficacia, aun cuando éste elemento es considerado tóxico en concentraciones muy bajas.

Para evaluar el efecto tóxico del compost de cacao en su forma original y enriquecida con Cd, sobre la germinación y crecimiento de cultivos, a continuación, se dará a conocer los resultados y análisis de las pruebas de fitotoxicidad realizada en ésta investigación.

Fitotoxicidad: Los resultados de la fitotoxicidad del compost de cacao junto a la presencia de metales pesados como Cd, se presentan en las Tablas 4 y 5. El análisis estadístico demuestra que no hay una distribución normal y los resultados del índice de germinación (IG) para el compost de cacao sólo y enriquecido con 5 mg/kg de Cd son diferentes entre sí, dada la naturaleza del ensayo. Los resultados del IG presentan variabilidad, lo que indica mayor sensibilidad a cambios en la composición del extracto de saturación. En cualquiera de los extractos la fitotoxicidad presenta inhibición de germinación de las semillas.

Los resultados indican que el coeficiente de variación es fuertemente sensible ante cambios de origen en la variable, lo que indica que la homogeneidad o heterogeneidad del conjunto de datos, muestra una interpretación relativa del grado de variabilidad. En este sentido, el coeficiente de variación no aporta información relevante al análisis antes presentado. Priac et al. (2017) concluyen a través de un estudio de fitotoxicidad en cuatro cultivares distintos de lechuga

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

(Appia, Batavia Dorée de Printemps, Grosse Blonde Paresseuse y Kinemontepas) donde mostraron respuestas significativas cuando se regaron con la misma y diferente agua de descarga industrial cargada con metales, dejando en claro que se produce una escala de sensibilidad diferencial no sólo entre especies sino también entre cultivares.

Tabla 4. Resultados del Índice de Germinación (IG) de semillas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) como planta indicadora. Prueba de fitotoxicidad del compost de cacao

Compost de cacao					
Extracto	Semillas germinadas (%)	LMR (mm)	IG (%)	S	Fitotoxicidad
1:1	12	0,7	10	0,09	Severa
1:5	28	1,6	20	0,11	Severa
1:10	28	2,9	50	0,17	Fuerte
Blanco	32	5,7	N/A	N/A	N/A

N/A: No Aplica

Longitud Media Radicular: LMR

Índice de Germinación: IG

Desviación estandar: (S)

Tabla 5. Índice de Germinación (IG) de semillas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) como planta indicadora. Prueba de fitotoxicidad del compost de cacao enriquecido con 5 mg/kg de Cd.

Compost de Cacao enriquecido con 5 mg/kg de Cd					
Extracto	Semillas germinadas (%)	LMR (mm)	IG (%)	S	Fitotoxicidad
1:1	5	0,2	0	0,03	Severa
1:5	39	1,2	20	0,10	Severa
1:10	64	1,2	40	0,08	Fuerte
Blanco	32	5,7	N/A	N/A	N/A

N/A: No Aplica

Longitud Media Radicular: LMR

Índice de Germinación: IG

Desviación Estándar: (S)

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Siguiendo la clasificación de toxicidad de acuerdo al IG propuesto por Trautmann y Krasny (1998), que se observan en la Tabla 6, éste, presenta valores que son indicativos que el material puede inhibir fuertemente el crecimiento de los cultivos, indiferentemente si el compost se encuentra enriquecido o no con Cd, lo que conlleva a inferir que el compost no completó el proceso de compostaje para considerarse maduro y estable, aunque en este caso la toxicidad generada por el metal pesado, es independiente de la madurez o estabilidad del compost. También se puede atribuir a la presencia de diversos compuestos en el material compostado (no evaluados en este estudio), los cuales interfieren en el desarrollo y crecimiento radicular de las semillas. Tal como lo expresa Awasthi et al. (2017) en sus investigaciones, donde asocian la presencia de ácidos orgánicos volátiles y amoníaco, con la germinación de las semillas y el desarrollo de las raíces.

Tabla 6. Clasificación de toxicidad de acuerdo al índice de germinación (adaptado de Trautmann y Krasny 1998).

Índice de germinación	Clasificación
1,0 - 0,8	No inhibe el crecimiento de la especie
0,8 - 0,6	Inhibición moderada
0,6 – 0,4	Fuerte inhibición
< 0,4	Inhibición severa

Tam y Tiquia (1994) señalan que la tasa e índice de germinación son usados generalmente para evaluar la fitotoxicidad de una enmienda orgánica como compost debido a que la fitotoxicidad es un problema asociado con los compost inmaduros, ya que pueden contener metales pesados, amoniaco y/o compuestos orgánicos de bajo peso molecular que pueden reducir la germinación de semillas además de inhibir el desarrollo y crecimiento de la raíz.

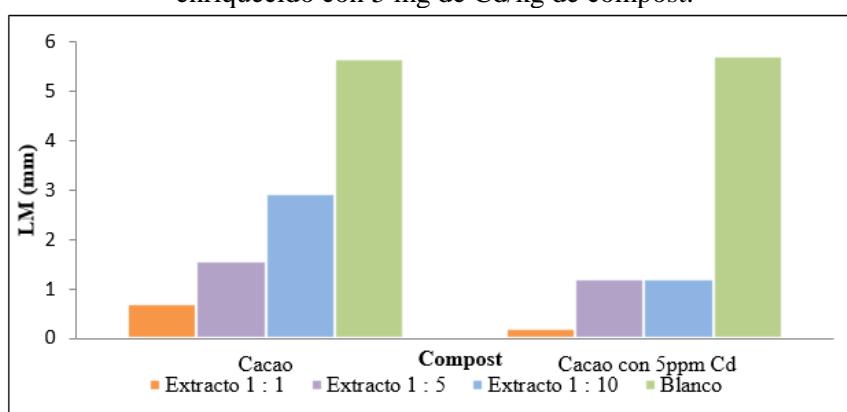
Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Tang et al. (2006) afirman que un compost con valores de IG superiores al 80 % se encuentra libre de fitotoxinas considerando que ya se ha alcanzado su completa madurez. Sin embargo, el uso del valor de IG debe ser interpretado con precaución debido que su resultado se ve afectado por el tipo de semilla empleada y la tasa de extracción aplicada.

Por otra parte, el crecimiento de la raíz de las semillas germinadas se puede analizar a través del estudio de la longitud media radicular, la cual ofrece información del crecimiento y desarrollo en presencia y ausencia del Cd, cuyo comportamiento se observa en la Figura 3, en el que se expone mayor crecimiento de la semilla en el ambiente del compost de cacao sin Cd, aumentando proporcionalmente la concentración del extracto utilizado. Contrario a esto, ocurre en el caso del crecimiento de las semillas incubadas con diferentes proporciones de extractos de compost de cacao enriquecido con Cd, resultados que indican un menor crecimiento en el extracto más diluido comparado a los extractos de mayor concentración de la enmienda (1:5 y 1:10), los cuales no presentaron diferencias entre sí.

Figura 3. Longitud Media de la Radícula (LM) obtenido mediante pruebas de germinación. Análisis comparativo entre el compost de cacao y compost de cacao enriquecido con 5 mg de Cd/kg de compost.



Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Un comportamiento similar obtuvo Bagur et al. (2011) al evaluar la fitotoxicidad de metaloides (As, Cu, Mn, Pb y Zn) mediante bioensayos con semillas de Lechuga (*Lactuca sativa L.*) como planta indicadora, en extractos de suelos saturados en agua de un sitio minero abandonado, obtuvieron distribución asimétrica y gran variabilidad entre los resultados del índice de germinación y la medida de longitud de las raíces, atribuido a un “efecto barrera”, que actúa acumulando formas de metales solubles a través de los procesos de transporte posteriores, concluyendo que para evaluar la fitotoxicidad moderada/baja de suelos contaminados con metales pesados, resulta más eficaz y preciso si se basa en las medidas del alargamiento de la raíz germinada en lugar de la cantidad de semillas germinadas.

La germinación se considera exitosa cuando la longitud de las raíces alcanza 3 mm, sin embargo, Zucconi et al. (1981b), destaca que tanto la germinación como el desarrollo radicular de un cultivo son influenciados por cualquier sustancia tóxica, siendo generalmente más sensible el desarrollo de las raíces que la germinación de la semilla. Este comportamiento quedó demostrado por Charles et al. (2011) al evaluar el impacto de efluentes industriales de cuatro empresas de tratamiento distintas, sobre la actividad agrícola. Para ello realizaron ensayos de germinación utilizando semillas de lechuga (*Lactuca Sativa L.*) concluyendo que las mezclas de metales son más tóxicas que los metales considerados individualmente, por separado, y que el efluente industrial real que contenían varios elementos metálicos, era más tóxico que las soluciones sintéticas utilizadas para realizar un análisis comparativo. Dicho estudio demostró cómo afecta el crecimiento y desarrollo radicular de vegetales, especialmente lechuga, la presencia de diferentes elementos tóxicos actuando conjuntamente en un mismo recinto.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Tomando en cuenta la especie y genotipo de planta, hay estudios que revelan la influencia de la capacidad de absorción de metales pesados por vegetales en suelos con diferentes pH, contenidos de arcilla y materia orgánica. Existe una estrecha relación entre la germinación y el crecimiento radicular con los valores de propiedades físicas y químicas como el pH y la conductividad ya que un material compostado con altos valores de pH y C.E. a menudo, pueden ser un indicativo de la presencia de patógenos y altos niveles de sales disueltas que pueden representar un riesgo para el desarrollo de los cultivos.

Los resultados de las pruebas de fitotoxicidad y los valores de pH y C.E. (Tabla 2), indican que existe una relación entre la concentración de sales y el grado de germinación, el cual se reduce por efecto de dilución en ambos casos (compost de cacao con cadmio y sin cadmio). En el siguiente apartado, el análisis de la determinación de la concentración de Cd mediante la técnica espectroscópica de absorción atómica con atomización electrotérmica en horno de grafito, de las muestras compuestas de compost de cacao y suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas (antes descrito) incubado por 240 días.

Determinación de cadmio: En la Tabla 7, se presentan los resultados del estudio de control estadístico a través de las diferentes curvas de calibración en condiciones variadas, tales como preparación ascendente, descendente y al azar. Para ello se ha evaluado los parámetros estadísticos más relevantes y de uso práctico con fines analítico, tales como promedio, Desviación Estándar (S) y Coeficiente de Variación (CV).

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

Tabla 7. Curvas de calibración analizadas

Concentración de Cd (ppb)	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	Media	S	CV
0	0,018	0,0176	0,0180	0,0180	0,0179	0,0002	1,1173
0,5	0,0482	0,0487	0,0489	0,0490	0,0487	0,0004	0,7212
1	0,0755	0,0759	0,0769	0,0759	0,0761	0,0006	0,7853
2	0,1330	0,1277	0,1300	0,1310	0,1304	0,0022	1,6895
4	0,2409	0,2453	0,2469	0,2455	0,2447	0,0026	1,0625
8	0,4752	0,4670	0,4690	0,4700	0,4703	0,0035	0,7435
R ²	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999		
m	0,0569	0,0561	0,0563	0,0564	0,0564		
b	0,0182	0,0188	0,0196	0,0193	0,0189		

El CV obtenido presentó valores menores a 2%, lo que indica que el método y técnica aplicado para la determinación de cadmio está bajo control estadístico, siguiendo el análisis estadístico de Romero et al. (2017) y de SERNAPESCA (2018).

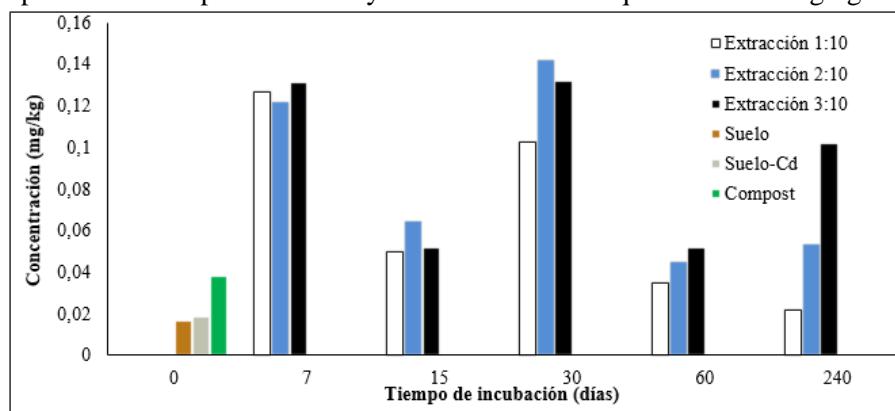
El análisis secuencial para la determinación de concentraciones de Cd residual disponible en el suelo tratado con compost de cacao tuvo gran variabilidad a lo largo de 240 días de incubación de la muestra. Como se observa en la Figura 4, a los primeros 7 días de incubación, el cadmio hidrosoluble tuvo un comportamiento similar en el suelo aun cuando la relación compost y suelo era distinta. Transcurrido 15 días de incubación, la concentración de cadmio disponible disminuyó a la mitad de la obtenida inicialmente. Sin embargo a los 30 días de incubación, la concentración del metal hidrosoluble en todas las relaciones de enmienda:suelo se incrementó significativamente, observando un comportamiento muy variable entre sí y resaltando el aumento de la disponibilidad de cadmio en la extracción 2:10, la cual superó la concentración obtenida a los 7 días de incubación. Completado los 60 días de incubación la disponibilidad de cadmio disminuyó nuevamente.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Finalmente, a los 240 días de incubación se incrementa la disponibilidad de cadmio con un comportamiento creciente con respecto de las extracciones 1:10; 2:10 y 3:10 respectivamente. El comportamiento discontinuo y variable, de la absorción del elemento metálico puede ser atribuido a los procesos complejos que ocurre en la solución del suelo y materia orgánica, aunado a la presencia de un agente externo como el cadmio.

Figura 4. Determinación de cadmio hidrosoluble en distintas extracciones de muestra compuestas de compost de cacao y suelo San Juan enriquecido con 5 mg/kg de Cd.



Cabe destacar que no hay hallazgos sobre el efecto del compost de cacao contaminado con metales pesados en suelos, con los cuales hacer un análisis comparativo. Sin embargo, hay evidencia de un comportamiento similar con materiales y fertilizantes orgánicos de otro origen y naturaleza los cuales dependen de factores asociados al pH y C.E, agentes biológicos, tiempo de contacto, entre otros, de los cuales se hace mención más adelante.

Por otra parte, la respuesta obtenida por la concentración de Cd disponible en el suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas en su estado natural

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

(no intervenido) y enriquecido con Cd, cuyos resultados no marcan una diferencia entre sí, se infiere que, debido a las características del suelo antes discutidas, este contribuye por sí solo, a la absorción de cadmio, inmovilizándolo y haciendo que esté menos disponible para las plantas. Sin embargo, el comportamiento del suelo en presencia del compost de cacao es contrario, debido a que las concentraciones del metal hidrosoluble en cada extracción, a lo largo de 240 días de incubación, son considerablemente mayores, lo cual indica que existen interacciones entre el cadmio y la materia orgánica suministrada al suelo, bajo condiciones de laboratorio.

Bravo et al. (2014) obtuvieron una respuesta parecida en suelos altoandinos con diferentes usos agrícolas, que presentaron alta capacidad de adsorción de Cd, siendo superior el suelo cultivado con papa (98,66%), hecho que atribuyeron a altos porcentajes de materia orgánica humificada y la relación de humificación, ya que la mayor parte del carbono orgánico en el suelo está representada por sustancias húmicas con gran capacidad para absorber este elemento, formando complejos estables. Estos suelos presentaron pH alcalino, alto contenido de arena y bajo en arcillas y alta capacidad de intercambio catiónico.

Para Loftis et al. (2005), suelos con características parecidas a las del suelo en estudio, la composición de la materia orgánica y la fase mineral del suelo, al igual que el pH, tienen efectos significativos en la adsorción de Cd, suelos con altos contenidos de materia orgánica u óxidos de hierro adsorben más Cd que los que tienen grandes cantidades de arcillas tipo 2:1, no obstante, presentan alta CIC.

Las concentraciones de Cd hidrosoluble en cada una de las muestras se observan con mayor claridad mediante una perspectiva individual de cada

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

extracción (1:10; 2:10 y 3:10) correspondiente a la determinación de Cd hidrosoluble, en las Figuras 5; 6 y 7 respectivamente.

Figura 5. Contenido de Cd hidrosoluble a los 7; 15; 30; 60; y 240 días de incubación de la muestra compuesta de compost de cacao y suelo de San Juan en una relación 1:10.

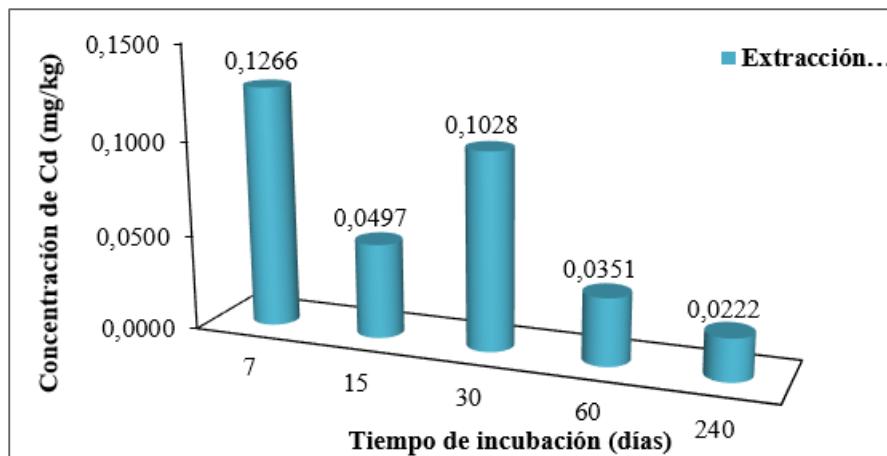
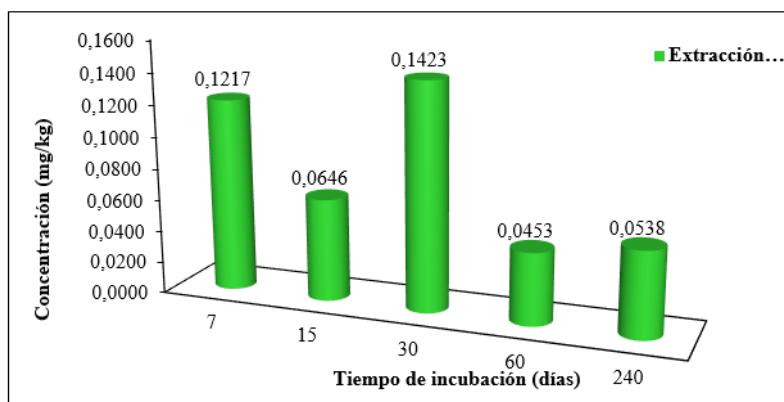


Figura 6. Contenido de Cd hidrosoluble a los 7; 15; 30; 60 y 240 días de incubación de la muestra compuesta de compost de cacao y suelo de San Juan en una relación 2:10.

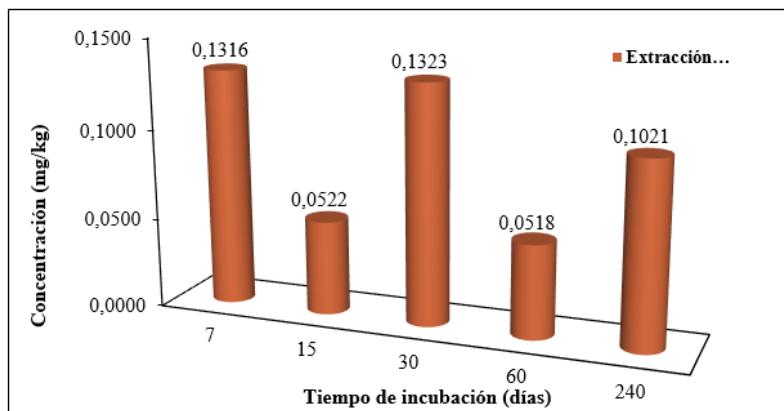


Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Como se puede ver en todos los casos, la determinación a los 30 días de incubación, no sigue la tendencia, la cual indica que es una reducción de la concentración de cadmio hidrosoluble, excepto el caso de la muestra a 240 día en el extracto 3:10 (Figura 7), donde se ha conseguido una concentración de cadmio superior a la tendencia. Dado que el estudio es bajo un protocolo de incubación, no se puede aplicar algún estudio estadístico que permita evaluar estos resultados en este punto (30 días).

Figura 7. Contenido de Cd hidrosoluble a los 7; 15; 30; 60 y 240 días de incubación de la muestra compuesta de compost de cacao y suelo de San Juan en una relación 3:10.



Comparando la concentración de Cd en el compost de cacao sin enriquecer con dicho metal, con el valor obtenido del mismo compost enriquecido con 5 mg de Cd /kg de muestra se observa que se logró recuperar el total de la concentración de cadmio más lo que contenía inicialmente la enmienda compostada con 110 % de recuperación (Tabla 8).

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Tabla 8. Contenido de Cd hidrosoluble por digestión ácida, del suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas y del compost de cacao, enriquecidas y no enriquecidas con 5 mg/kg de Cd.

Matriz	Cd mg/kg Hidrosoluble	% R	Cd mg/kg Digestión ácida	% R
Suelo	0,0171	N/A	0,5250	N/A
Suelo-Cd	0,0189	0,3784	3,3096	66,1929
Compost	0,0385	N/A	0,6826	N/A
Compost-Cd	N/A	N/A	5,5152	110,3048

% R: porcentaje de recuperación

En cuanto al suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas, de acuerdo a los resultados expuestos en la Tabla 8, se tiene que hay una concentración importante de Cd en el mismo, la cual debe ser estudiada con fines de toxicidad, además de las posibles interacciones con otros elementos como Zn y Cu, por ejemplo. Se ha conseguido que después del enriquecimiento del suelo con 5 mg/kg de cadmio, el bajo porcentaje de recuperación del elemento en la digestión ácida, indica que existe interacción entre el suelo y el Cd (al menos en condiciones de laboratorio, caso particular de esta investigación). Esto indica que la fracción mineral del suelo inmoviliza el Cd agregado, puesto que el proceso de digestión no permite la disponibilidad del mismo. Por lo que la interacción entre el Cd y la materia orgánica, se debe exclusivamente a la materia orgánica del suelo.

En este sentido, Clemente y Bernal (2006) señalan que la fracción orgánica más estable, a la vez más resistente a la mineralización, en general puede retener los metales pesados y en particular el Cd, en formas no disponibles, sin embargo, la materia orgánica del suelo puede tener efectos opuestos sobre la adsorción de

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

este elemento, la fracción soluble logra acomplejarlo, facilita su movilidad en el suelo y al mineralizarse permite mayor disponibilidad para las plantas. Destacan el potencial de remediación de los ácidos húmicos extraídos de materiales orgánicos, sobre dos tipos de suelos contaminados con metales pesados y observaron que el ácido húmico podría aumentar la concentración disponible de metales pesados como el Cu por presentar mayor movilidad, debido a su interacción con los ácidos húmicos en el compost. Dicha actividad es de sumo interés y tema de estudio de futuras investigaciones.

Con respecto de los resultados obtenidos en la determinación de Cd mediante digestión ácida en el suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas, enriquecidos y no enriquecidos con Cd, el porcentaje de recuperación representó sólo un 66% del total, lo que pone en manifiesto las formas extraíbles de metales pesados como el Cd en matrices tan complejas como el suelo. Asimismo, Borggaard et al. (2019) explican que los metales pesados totales del suelo son a menudo considerados pseudo totales determinados por extracción con ácidos fuertes como ácido nítrico, que disuelve los metales pesados presentes principalmente en carbonatos, óxidos y humus. Sin embargo, los metales pesados extraíbles y no extraíbles no es clara del todo, como lo indica la disolución parcial (meteorización) de los silicatos del suelo incluso por la materia orgánica disuelta. Por ésta razón, se debe considerar que los metales pesados del suelo existen en una forma continua de solubilidad que va desde formas fácilmente extraíbles a no extraíbles. Esta afirmación también puede aplicarse al suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas, dada las características que presenta de pH, C.E y CIC, entre otras. Es posible inferir que existe una relación estrecha entre los resultados obtenidos tanto en la caracterización del compost de cacao a través de la determinación de sus propiedades físicoquímicas y biológicas; como de los

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

resultados obtenidos de la concentración de Cd hidrosoluble extraído de las muestras incubadas de compost – suelo.

Influencia de la materia orgánica y su transformación

La extracción de los metales como contaminantes del suelo, depende, del pH, CIC, CE, contenido inicial de materia orgánica, tipo de suelo y tasa de transformación de la materia orgánica a lo largo del tiempo. Haciendo énfasis en lo último, la producción de muchas sustancias orgánicas diferentes puede dar como resultado la adición de una única enmienda orgánica, debido a la descomposición de la materia orgánica con el tiempo, lo que puede conllevar a la liberación de ácidos orgánicos que alteran la disponibilidad de los metales. Asimismo, lo consideran Lwin et al. (2018), destacando que la descomposición de la materia orgánica se asocia con el aumento de carbono orgánico disponible, acción que se correlaciona positivamente con la liberación de metales.

Para Owsianik et al. (2015) los metales pesados absorbidos por sólidos del suelo, tienen una estrecha relación con el tiempo de contacto, considerándose un factor importante para la extractabilidad de éstos elementos tóxicos. Ésta dependencia la observaron Borggaard et al. (2019) al evaluar la efectividad de plantas fitorremediadoras y enmiendas orgánicas en la extracción de múltiples elementos metálicos altamente tóxicos, en el que las cantidades de Cu, Ni, y Zn extraídos de muestras de suelos enriquecidos con dichos elementos, permanecieron en contacto con el suelo durante 1; 12 y 24 meses, obteniendo disminución de la concentración acorde transcurría el tiempo de incubación.

Amoah et al. (2020) utilizaron diferentes enmiendas orgánicas para tratar suelos contaminados con metales pesados y obtuvieron resultados distintos en los materiales seleccionados durante el tiempo de incubación. Haciendo particular

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

referencia a la enmienda de estiércol de corral, se liberó metales pesados a la solución del suelo luego de un período inicial de inmovilización, respuesta que fue atribuida a una mayor tasa de descomposición de MO y la formación de complejos organometálicos solubles influenciada por el agotamiento de oxígeno y las condiciones redox del suelo.

Aziz et al. (2017) evaluaron el efecto del uso de enmiendas orgánicas como estiércol de corral para la retención de metales pesados en suelos contaminados, destacan que el pH del suelo se vio afectado por la naturaleza del material y el tiempo durante el estudio. El pH disminuyó con la aplicación de la enmienda debido a la descomposición de la materia orgánica en ácidos húmicos y fúlvicos. Deduciendo que, al disminuir el pH del suelo, los metales Ni y Zn deben competir con los iones H^{+1} y Al^{+3} en los sitios de intercambio, aumentando la solubilidad de estos metales en la solución del suelo y en consecuencia aumenta la proporción de iones metálicos libres de alta disponibilidad en la solución del suelo.

Influencia del tiempo de contacto del Cd con el suelo y la materia orgánica

El tiempo de exposición del metal en el sistema suelo – planta se encuentra estrechamente relacionado a todos los factores antes descritos, por lo que se hace difícil separarlos. Sin embargo, el reporte de algunos autores aborda este factor de manera individual.

Kim et al. (2003) evaluaron los factores que afectan la extracción de Pb con fertilizantes orgánicos e inorgánicos como EDTA en suelos contaminados con PB. Señalan que la influencia del tiempo de incubación del agente remediador con el suelo en la fijación del metal pesado y en consecuencia sobre la extractabilidad, se debe a la recristalización del metal pesado por la precipitación, coprecipitación y/o difusión del metal pesado en sólidos del suelo. Sánchez et al. (2017) en su

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

estudio de la evolución del contenido de Hg en suelos agrícolas debido a la aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales, señalan que la aplicación a largo plazo de fertilizantes orgánicos puede aumentar las actividades de metales pesados en el suelo, promoviendo su movilidad y biodisponibilidad.

Por otra parte, con la descomposición de la materia orgánica se produce una disminución del área superficial y la capacidad de intercambio catiónico lo que se traduce en un aumento en la liberación de metales pesados. Así lo describe Lwin et al. (2018), al destacar que la descomposición de la materia orgánica afecta el área superficial en los sitios de intercambio, por tal razón la estabilidad y naturaleza de las enmiendas orgánicas son importantes para determinar la extracción a largo plazo de metales pesados entre la solución y la fase sólida del suelo, resaltando, la importancia de evaluar la naturaleza y estabilidad de los absorbentes orgánicos y la necesidad de ser críticos al momento de seleccionar criterios para su aplicación durante tiempo prolongado sobre suelos contaminados con elementos metálicos potencialmente tóxicos. En este sentido, el periodo de contacto de Cd en el compost de desechos de cacao bajo condiciones de laboratorio, es un parámetro importante a considerar, una vez el material este estable y maduro, a fin de evaluar la interacción de la materia orgánica y el metal y posteriormente extender esta evaluación a campo.

Otros factores que afectan las interacciones del Cd con el suelo

Existen otros factores que influyen sobre la disponibilidad de metales pasados y se relacionan a la presencia de microorganismos del suelo debido a la capacidad que tienen algunos para coexistir en presencia de agentes externos como metales potencialmente tóxicos. Crowther et al. (2019) indican que los microorganismos son capaces de contribuir con la materia orgánica disuelta que

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

afecta la migración y transformación de metales pesados. Por otra parte, la influencia del efecto de las propiedades intrínsecas del metal sobre la absorción o desorción del cadmio se relaciona a las especies químicas en que se presenta en el suelo y la materia orgánica del mismo. Boggard et al. (2019) enfatizaron el efecto de la naturaleza del metal sobre la absorción y desorción de cadmio, atribuyendo éste fenómeno a que generalmente el metal ingresa al suelo principalmente como compuestos solubles de Cd^{+2} y forma compuestos iónicos como $CdOH^-$, $CdHCO_3^+$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{-2}$ y $CdSO_4$ en sedimentos o suelos. Los enlaces de estos tipos de compuestos son débiles lo que permite que el Cd pueda migrar fácilmente. También resaltan que los metales pesados pueden absorberse al suelo mediante sorción no específica través de complejación de enlaces coordinado de esfera exterior y mediante sorción específica a través de complejación de enlaces coordinado de esfera interna.

Tomando en consideración lo antes expuesto, fundamentado en los hallazgos y experiencias científicas de otros investigadores, resulta imperativo, realizar un estudio más profundo del compost de cacao para su utilización en diferentes tipos de suelos y de esa manera ampliar la ventana de posibilidades para el uso y aplicación de esta enmienda orgánica.

Conclusiones

Los valores obtenidos en la caracterización del compost a través de sus propiedades fisicoquímicas y biológicas permitieron establecer una línea base de estudio de la dinámica del cadmio en la enmienda, obteniéndose una estrecha relación con los resultados de la determinación de cadmio hidrosoluble en las muestras compuestas de suelo – compost.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

El compost de cacao contribuyó a la disociación de complejos, que son producto de la unión del metal a ligandos orgánicos de las sustancias húmicas que constituyen la materia orgánica de la enmienda y del suelo, provocando la movilidad y disponibilidad del metal independientemente del criterio de relación de compost de cacao – suelo aplicado.

El compost de cacao inhibe fuertemente el crecimiento de cultivos de lechuga (*Lactuca sativa L.*) independientemente del criterio de proporcionalidad que se emplee de extractante para su aplicación; debido a la presencia de diversos compuestos en el material compostado interfiriendo en el desarrollo y crecimiento radicular de las semillas.

En la determinación de Cd hidrosoluble de la muestra de suelo-compost de cacao incubada durante 240 días se observó un comportamiento discontinuo y variable de la absorción del elemento metálico, atribuido a los procesos complejos que ocurren en la solución del suelo – materia orgánica, aunado a la presencia de agentes interferentes en el material compostado.

El suelo del Campo Experimental San Juan de Lagunillas del INIA-Mérida, contribuye por sí solo, a la absorción de cadmio, inmovilizándolo y haciendo que esté menos disponible para las plantas, debido a las características físicas y químicas propias de éste suelo.

El efecto residual de las enmiendas orgánicas debe tomarse en consideración sobre la solubilidad de los metales pesados debido a que la materia orgánica puede sufrir transformaciones a lo largo del tiempo.

La extracción de los metales como contaminantes del suelo, depende, además de factores como pH, CIC y CE a lo largo del tiempo.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

Emplear materia orgánica para enmendar suelos contaminados con metales pesados es un proceso complejo, debido a que puede depender de numerosos factores y variables tales como concentración, composición de la materia orgánica, características de la absorción del suelo, química de los metales pesados y varios factores y condiciones ambientales externas.

Referencias

- Alloway, B. (2012). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. *Heavy Metals in Soils*, 11-50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Amoah, C., Kwiatkowska, J., Szara, E., Thornton, S., Fenton, O., y Malina, G. (2020). Efficacy of Woodchip Biochar and Brown Coal Waste as Stable Sorbents for Abatement of Bioavailable Cadmium, Lead and Zinc in Soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(10), 515. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04885-4>.
- Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Bundela, P.S., Wong, J.W.C., Selvam, A., (2014). Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal soil waste composting. *Bioresour. Technology*, 168, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.048>
- Awasthi, M. K., Selvam, A., Lai, K. M., y Wong, J. W. C. (2017). Critical evaluation of post-consumption food waste composting employing thermophilic bacterial consortium. *Bioresource Technology*, 245, 665–672. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.014>
- Azevedo, M., Ferraciú, L. y Guimaraes, G. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60(4), 793-806.
- Aziz, M., Ahmad, H., Corwin, D., Sabir, M., Hakeem, K., y Öztürk, M. (2017). Influence of farmyard manure on retention and availability of nickel, zinc, and lead in metal-contaminated calcareous loam soils. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(3), 289-296. <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1254639>

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

- Bagur, M., Estepa, C., Martín, F y Morales, S. (2011). Toxicity assessment using *Lactuca sativa L.* bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 281–289. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0285-4>
- Beesley, L. y Marmiroli, M. 2011. The immobilization and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environ. Pollut.* 159, 474-480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>
- Beloso, M. (1991). *Estudio de la Gallinaza como fertilizante agrícola*. Universidad de Santiago de Compostela. 313 p.
- Bogusz, A., Oleszczuk, P. y Dobrowolski, R. (2017). Adsorption and desorption of heavy metals by the sewage sludge and biochar-amended soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 41, 1663-1674. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0036-1>.
- Borggaard, O., Holm, P., y Strobel, B. (2019). Potential of dissolved organic matter (DOM) to extract As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn from polluted soils: A review. *Geoderma*, 343, 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.041>
- Bravo, R., Arboleda, P., y Martín, P. 2014. Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*, 63(2), 159-169. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>
- Carrero, A. (2014). *Fraccionamiento de fósforo en un suelo cultivado con cacao, en la localidad de San Juan de Lagunillas, municipio Sucre del estado Mérida*. Universidad de Los Andes. 63 p.
- Casas, R. (2011). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas*. Ediciones Paraninfo. 20 p.
- CODEX Alimentarius (1995). *Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos*. CODEX STAN 193-1995. <https://goo.gl/XqGcyo>.
- Chang, R., Guo, Q., Chen, Q., Bernal, M. P., Wang, Q., y Li, Y. (2019). Effect of initial material bulk density and easily-degraded organic matter content on temperature changes during composting of cucumber stalk. *Journal of Environmental Sciences*, 80, 306-315 <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.10.004>

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Chacón, I., Gómez, C., y Márquez, V. (2007). Caracterización morfológica de frutos y almendras de plantas de cacao (*Theobroma cacao L.*) en la región suroccidental de Venezuela. *Rev. Fav. Agron. (LUZ)*, 24(1), 202-207. https://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/supl_mayo_2007/v24supl35.pdf

Charles, J., Sancey, B., Morin, N., Badot, P., Degiorgi, F., Trunfio, G., y Crini, G. (2011). Evaluation of the phytotoxicity of polycontaminated industrial effluents using the lettuce plant (*Lactuca sativa*) as a bioindicator. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(7), 2057-2064. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.025>

Clemente, R. y Bernal, B. (2006). Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids. *Chemosphere*, 64(8), 1264 – 1273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.058>

Cortés, L., Bravo, I., Martin, F. y Menjivar, J. (2016). Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agronómica*, 65(3), 232-238. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>

Cortés, L., Martin, F. y Sarria, M. (2017). Evaluación de la toxicidad de metales pesados en dos suelos agrícolas de Colombia mediante bioensayos. *Temas Agrarios*, 22(2), 43-53. <https://core.ac.uk/reader/231232580>

Cristaldi, A., Conti, C., Jho, E., Zucarello, P., Grasso, A., Copat, C., y Ferrante, M. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 309-326. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.002>

Crowther, T., Van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M., Keiser, A., Mo, L., Averill, C., y Maynard, D. (2019). The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science*, 365, 6445. <https://doi.org/10.1126/science.aav0550>

Dávila, E. (2019). *Uso de enmiendas en la reducción del contenido de cadmio en el suelo y en los granos del cacao (*Theobroma cacao L.*) Clon CCN-51* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1623>

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Safel

- Díaz, M., y Baath, E. (1996). Development of metal tolerance in soil bacterial communities exposed to experimentally increased metal levels. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(8), 2970-2977. <https://doi.org/10.1128/aem.62.8.2970-2977.1996>
- Duley, L., Mclean, J., Sims, R. y Jurinak, K. (1988). Sortion of copper and cadmium from the water-soluble fraction of an acid mine waste by two calcareous soils. *Soil. Sci.*, 145, 207-214.
- FAO/WHO. (2014). *Anteproyecto de niveles máximos para el cadmio en el chocolate y productos derivados de cacao*. Comisión del Codex Alimentarius. <https://goo.gl/5MeHzF>.
- Faithfull, N. (2005). *Métodos de análisis químico agrícola. Manual Práctico*. Editorial ACRIBIA. 318p.
- Fijalkowski, K., Kacprzak, M., y Grobelak, A. (2012). The influence of selected soil parameters on the mobility of heavy metals in soils. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 15(1), 81-92. https://ios.is.pcz.pl/images/ios_repo/2012/zeszyt1/2012_1_7-FIALKOWSKI.pdf
- Fidelis, C., y Rajashekhar, R. (2017). Enriched cocoa pod composts and their fertilizing effects on hybrid cocoa seedlings. *International Journal of Organic Waste in Agriculture*, 6, 99-106. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0156-8>
- Fritze, H., Perkiomäki, J., Saarela, U., Katainen, R., Tikka, P., Yrjälä, K., Karp, M., Haimi, J., y Romantschuk, M. (2000). Effect of Cd-containing wood ash on the microflora of coniferous forest humus. *FEMS Microbiology Ecology*, 32, 43-51. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2000.tb00697.x>
- Galán, E. (2000). The role of clay minerals in removing and immobilizing heavy metals from contaminated soils en C. Gomes (Ed), *In Proceedings of the 1st Latin American Clay Conference* (Vol.1, pp. 351-361). Funchal.
- Gilabert, J., López, I., y Pérez, R. (1990). *Manual de Métodos y Procedimientos de Referencia*. Fondo Nacional de investigaciones Agropecuarias.
- Hamid, Y., Tang, L., Hussain, B., Usman, M., Lin, Q., Rashid, M., Yang, X. (2020). Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: A review. *Science of The Total Environment*, 707, 136121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136121>.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

- Harada, Y., Inoko, A. (1980). The measurement of the cation-exchange capacity of compost for the estimation of the degree of maturity. *Soil. Sci. Plant. Nutr.*, 26(1), 127-134.
- Harvey, O., Herbert, B., Rhue, R., & Kuo, L. (2011). Metal Interactions at the Biochar-Water Interface: Energetics and Structure-Sorption Relationships Elucidated by Flow Adsorption Microcalorimetry. *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5550-5556. <https://doi.org/10.1021/es104401h>
- Hernández, T., García, C. (2003). *Estimación de la respiración microbiana del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Huang, J., Yu, Z., Gao, H., Yan, X., Chang, J., Wang, C., Hu, J., Zhang, L., (2017). Chemical structures and characteristics of animal manures and composts during composting and assessment of maturity indices. *PLoS ONE* 12, e0178110. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178110>
- Hurtado, A., Caldera, A., Milano, B., Ibarra, C., Díaz, A., Camacho, J., Villamizar, J., y Verde, O. (2017). Notas Técnicas: Análisis de datos bajo condiciones de repetibilidad. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 36(2). http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0798-02642017000200002&script=sci_arttext&tlang=en
- Iannacone, J. y Alvariño, L. (2005). Efecto ecotoxicológico de tres metales pesados sobre el crecimiento radicular de cuatro plantas vasculares. *Agricultura Técnica (Chile)*, 65(2), 198-203. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-6538000000200003>
- Inbar, Y., Chen, Y. y Hadar, Y. (1989). Solid-state-carbon-13 nuclear magnetic resonance and infrared spectroscopy of compost organic matter. *Soil Science Society of America Journal Abstract*, 53(6), 1695-1701.
- Irfan, M., Mudassir, M., Khan, M., Dawar, K., Muhammad, D., Mian, I., Waqas, A., Fahad, S., Saud, S., Hayat, Z., Nawaz, T., Khan, S., Alam, S., Ali, B., Banout, J., Ahmed, S., Mubeen, S., Danish, Datta, R., Dewil, R. (2021). Heavy metals immobilization and improvement in maize (*Zea mays* L.) growth amended with biochar and compost. *Scientific Reports*, 11, 18416. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97525-8>

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Sael

- Jara, J., Pérez, M., Bustamante, M., Pérez, A., Paredes, C., López, M., y Moral, R. (2017). Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1349–1358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.178>
- Kabata, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. (3a ed). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039900>
- Kim, C., Lee, Y., y Ong, S. (2003). Factors affecting EDTA extraction of lead from lead-contaminated soils. *Chemosphere*, 51(9), 845-853. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(03\)00155-3](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(03)00155-3).
- Lamb, D., Ming, H., Megharaj, M. y Naidu, R. (2009). Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) partitioning and bioaccessibility in uncontaminated and long-term contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 1150-1158.
- Lanza, J., Churión, P., Liendo, N., y López, V. (2016). Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (*Theobroma cacao L.*) de Santa Brábara del Zulia, Venezuela. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*, 28 (1), 106-115.
- Larios, B. (2014). *Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del río Turia* [Tesis de maestría]. Universidad Pública de Navarra. 173 p.
- Lima, J., Raimondi, I., Schalch, V. y Rodrigues, V. (2018). Assessment of the use of organic composts derived from municipal solid waste for the adsorption of Pb, Zn y Cd. *Journal of Environmental Management*, 226, 386-399.
- Liu, L., Chen, H., Cai, P., Lian, W., Huang, Q. (2009). Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 563-567.
- Liu, P., Ptacek, C. J., y Blowes, D. W. (2019). Mercury Complexation with Dissolved Organic Matter Released from Thirty-Six Types of Biochar. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 103, 175-180. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2397-2>
- Lofts, S.; Spurgeon, D. y Svendsen, C. (2005). Fractions affected and probabilistic risk assessment of Cu, Zn, Cd, and Pb in soils using the free ion approach. *Environmental Science and Technology*, 39(21), 8533-8540.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

- Lora, R., y Bonilla, H. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 61–70. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n2.2010.730>
- Lwin, C., Seo, B., Kim, H., Owens, G., y Kim, K. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality-a critical review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(2), 156-167. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1440938>
- Martínez, D. y Marrugo, J. (2021). Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(2), e2272. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:2272
- Melgarejo, M., Ballesteros G., y Bendeck, M. (1997). Evaluación de algunos parámetros fisicoquímicos y nutricionales en humus de lombriz y composts derivados de diferentes sustratos. *Revista Colombiana de Química*, 26 (2). <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rkolquim/article/view/16360>
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., Gamarra, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea mays L.*) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-560.
- Nieto, S., Pacheco, L., Galán, C., y Páez, M. (2011). Estudio de las Interacciones Ácido Húmico-Metales Pesados y Determinación de sus Constantes de Estabilidad por Electroforesis Capilar. *Información Tecnológica*, 22 (3), 45-54. DOI: 10.4067/S0718-07642011000300007.
- Nicholson, F. A., Smith, S. R., Alloway, B. J., Carlton-Smith, C., & Chambers, B. J. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of The Total Environment*, 311(1-3), 205–219. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00139-6).
- Ouni, Y., Ghnaya, T., Montemurro, F., Abdellya, C., y Lakhdara, A. (2014). The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production* 8 (3), 1735-6814.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Sael

- Owsianiaik, M., Holm, P., Fantke, P., Christiansen, K., Borggaard, O., y Hauschild, M. (2015). Assessing comparative terrestrial ecotoxicity of Cd, Co, Cu, Ni, Pb, and Zn: The influence of aging and emission source. *Environmental Pollution*, 206, 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.025>
- Paz, J. (2006). *Propiedades bioquímicas de suelos de Prado de Galicia* [Tesis de doctorado Universidad de Santiago de Compostela]. <http://hdl.handle.net/10347/2269>
- Perkin Elmer. (2003). *AAnalyst 600/700/800 Manual de servicio*. <https://www.perkinelmer.com/es/Perkin-Elmer-AAnalyst-600-Service-Manual-And-Support-Files-/133326493602>.
- Pinamonti, F., Stringari, G., Gasperi, F. y Zorzi, G. (1997). The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 129-13.
- Poschenrieder, C., Tolrà, R., & Barceló, J. (2006). Can metals defend plants against biotic stress? *Trends in Plant Science*, 11(6), 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.04.007>
- Poulin, B., Gerbig, C., Kim, C., Stegemeier, J., Ryan, J., y Aiken, G. (2017). Effects of Sulfide Concentration and Dissolved Organic Matter Characteristics on the Structure of Nanocolloidal Metacinnabar. *Environmental Science & Technology*, 51(22), 13133-13142. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02687>
- Prieto, J., González, C., Román, A. y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Priac, A., Badot, P.M., y Crini, G. (2017). Treated wastewater phytotoxicity assessment using Lactuca sativa: Focus on germination and root elongation test parameters. *Comptes Rendus Biologies*, 340(3), 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2017.01.002>
- Raiesi, F., y Dayani, L. (2020). Compost application increases the ecological dose values in a non-calcareous agricultural soil contaminated with cadmium. *Ecotoxicology*, 30, 17–30. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02286-1>
- Rivero, C. (1999). *Materia orgánica del suelo*. Revista Alcance 57. Universidad central de Venezuela. 211 p.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids en D. L Sparks, A. L Page, P.A Helmke, R. H Loepert, P.N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, M. E. Summer (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Book series N.º 5* (417-434). Soil Science Society of American Society of Agronomy (SSSA). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>

Romero, H., Acaro, J., Camacho, A., y Castillo, A. (2017). Confiabilidad de un método para la determinación de CO₂ por cromatografía de gases. *Cumbres*, 3(1), 4-46.

Ron, A. (2004). *Ácidos húmicos y fúlvicos de origen orgánico en el crecimiento de plántula de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en invernadero*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 53 p.

Salazar, H. (2019). *Evaluación de la capacidad de retención de humedad y densidad de compost obtenido por los métodos aerotérmico y aerotérmico con aireación extendida, Juliaca 2017*. [Tesis de pregrado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. Repositorio de Tesis-Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.

Sánchez, N. (2013). *Modelización de los procesos químicos relacionados con la dinámica del cadmio en dos suelos agrícolas de Venezuela*. Universidad de Carabobo.

Sánchez, M., Rengifo, J. (2017). Evaluación del contenido de metales pesados (Cd y Pb) en diferentes edades y etapas fenológicas del cultivo de cacao en dos zonas del Alto Huallaga, Huánuco (Perú). *Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable*, 1(1), 87-94. <http://dx.doi.org/10.25127/aps.20171.356>

Semida, W. M., Abd El-Mageed, T. A., y Howladar, S. M. (2014). A novel organo-mineral fertilizer can alleviate negative effects of salinity stress for eggplant production on reclaimed saline calcareous soil. *Acta Horticulturae*, (1034), 493-499. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1034.61>

Sernapesca. (2018). *Guía de Validación de Métodos Analíticos. Manual de Inocuidad y Certificación*. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. http://www.sernapesca.cl/sites/default/files/f59_guia_de_validaciones_de_métodos_analíticos_08.02.18.pdf.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

- Siles, A. B., López, M. J., Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., López-González, J. A., Estrella-González, M. J., & Moreno, J. (2020). Industrial composting of low carbon/nitrogen ratio mixtures of agri-food waste and impact on compost quality. *Bioresource Technology*, 316, 123946. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123946>
- Soler, P., Madejón, E., Madejón, P. y Plaza, C. (2010). In situ remediation of metal-contaminated soils with organic amendments: Role of humic acids in copper bioavailability. *Chemosphere*, 79, 844-849.
- Stotzky, G. 1965. Microbial respiration. En: C.A. Black, D.D. Evans, J.L. White, I.E. Ensminger, y F.E. Clark, (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy 9* (pp. 1550-1572). American Society of Agronomy
- Tam, N., y Tiquia, S. (1994). Assessing toxicity of spent pig litter using a seed germination technique. *Resources, Conservation and Recycling*, 11(1-4), 261-274. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90094-9)
- Tang, J., Maie, N., Tada, Y., y Katayama, A. (2006). Characterization of the maturing process of cattle manure compost. *Process Biochemistry*, 41(2), 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.06.022>
- Tiller, K. (1989). Heavy Metals in Soils and Their Environmental Significance. *Advances in Soil Science*, 113-142.
- Trautmann, N., y Krasny, M. (1998). *Composting in the classroom*. Kendall/Hunt Publishing Company. <https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/3338/?sequence=1>
- U.S. EPA. 1996. "Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils," Revision 2. Washington, DC. 197 K, 12.12. <https://epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3051a.pdf>
- Venegas, A. (2015). *Evaluación de la adición de materiales de origen orgánico para la remediación de suelos contaminados con metales pesados* [Tesis de doctorado]. Universidad de Barcelona. 241 p.
- Vitinaqailevu, R., y Rajashekhar, R. (2019). The role of chemical amendments on modulating ammonia loss and quality parameters of co-composts from waste cocoa pods. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 153-160. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0285-3>.

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Saifel

- Vriesmann, L., Teo'flo R., y Petkowic C. (2012) Extraction and characterization of pectin from cacao pod husks (*Theobroma cacao L.*) with citric acid. *LWT Food Sci Technol*, 49(1), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.04.018>
- Wang, P., Peng, H., Liu, J., Zhu, Z., Bi, X., Yu, Q., y Zhang, J. (2020). Effects of exogenous dissolved organic matter on the adsorption–desorption behaviors and bioavailabilities of Cd and Hg in a plant–soil system. *Science of The Total Environment*, 728, 138252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138252>.
- Wyszkowska, J., Borowik, A., Kucharski, M., y Kucharski, J. (2013). Effect of cadmium, copper and zinc on plants, soil microorganisms and soil enzymes. *Journal of Elementology*, 18(4), 769-796. <http://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.455>.
- Xu, Y., Seshadri, B., Bolan, N., Sarkar, B., Ok, Y., Zhang, W., Rumpel, C., Sparks, D., Farrell, M., Hall, T., y Dong, Z. (2019). Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals. *Environment International*, 125, 478-488. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.071>.
- Yi, H., Men, B., Yang, X., Li, Y., Hui, X., Wang, D. (2019). Relationship between heavy metals and dissolved organic matter released from sediment by bioturbation/bioirrigation. *J. Environ. Sci.* 75 (S1001074217334794). <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.03.031>.
- Zambrano, A. (2005). *Caracterización química de enmiendas orgánicas* [Tesis de maestría]. Universidad Central de Venezuela. 153 p.
- Zapata, Raúl. (2004). Química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3280>.
- Zhao, C., Gao, S., Zhou, L., Li, X., Chen, X., y Wang, C. (2019). Dissolved organic matter in urban forestland soil and its interactions with typical heavy metals: a case of Daxing District, Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 2960-2973 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3860-7>

Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio

Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel

Zhu, W., Yao, W. y Du, W. (2016). Heavy metal variation and characterization change of dissolved organic matter (DOM) obtained from composting or vermicomposting pig manure amended with maize Straw. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(12), 2128-12139. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6364-3>

Zhu, W., Du, W., Shen, X., Zhang, H., Ding, Yin. (2017) Comparative adsorption of Pb²⁺ and Cd²⁺ by cow manure its vermicompost. *Environmental Pollution*, 227, 89-97.

Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. y De Bertoldi, M. (1981a). Evaluating toxicity of in nature compost. *BioCycle*, 22, 54-57.

Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. y De Bertoldi, M. (1981b). Evaluating toxicity of in nature compost. *BioCycle*, 22, 54-57.

Declaración de conflicto de interés y originalidad

Conforme a lo estipulado en el Código de ética y buenas prácticas publicado en *Revista Ceres*, los autores Zambrano García, Alexis; Rondón, Carlos; Qasem, Vivihan; Hernández, Eduylson; Binchi, Guillermo y Dugarte, Satifel, declaran al Comité Editorial que no tienen situaciones que representen conflicto de interés real, potencial o evidente, de carácter académico, financiero, intelectual o con derechos de propiedad intelectual relacionados con el contenido del artículo: *Evaluación de una enmienda orgánica como agente de remediación en un suelo enriquecido con cadmio*, en relación con su publicación. De igual manera, declaran que el trabajo es original, no ha sido publicado parcial ni totalmente en otro medio de difusión, no se utilizaron ideas, formulaciones, citas o ilustraciones diversas, extraídas de distintas fuentes, sin mencionar de forma clara y estricta su origen y sin ser referenciadas debidamente en la bibliografía correspondiente. Consienten que el Comité Editorial aplique cualquier sistema de detección de plagio para verificar su originalidad.

Los autores declaran que en la preparación de este manuscrito no utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa para la redacción de textos o interpretación de datos.