

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Mecanismo de inmovilización de metales pesados en suelos agrícolas mediante enmiendas orgánicas (Compost y Biochar) y Microorganismos Benéficos (MOBs)

Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental

Autor:

Noemi Luz Carranza Gallardo
Claudia Beatriz Rejano García

Asesor:

Lic. Gina Marita Tito Tolentino

Lima, diciembre de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Gina Marita Tito Tolentino, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: “**Mecanismo de inmovilización de metales pesados en suelos agrícolas mediante enmiendas orgánicas (Compost y Biochar) y Microorganismos Benéficos (MOBs)**” constituye la memoria que presenta los estudiantes Carranza Gallardo, Noemi Luz; Rejano García, Claudia Beatriz para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 23 días del mes de diciembre del año 2020



Nombres y apellidos del asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a..... 23..... día(s) del mes de..... diciembre.....del año 2020.... siendo las... 08:30....horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

..... Ing. Nancy Curasi Rafael....., el (la) secretario(a): ... Ing. Cesar Asbel Aranda Castillo.....

..... y los demás miembros:Ing. Jocelyn Dianella Torres Guerra.....

.....y el (la) asesor(a)

..... con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de

investigación titulado: Mecanismo de inmovilización de metales pesados en suelos agrícolas mediante enmiendas

orgánicas (Compost y Biochar) y Microorganismos Benéficos (MOBs)

..... de los (las) candidato (as): a) Noemi Luz Carranza Gallardo.....

.....b) Claudia Beatriz Rejano Garcia.....

..... c)

.....conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en:

.....Ingeniería Ambiental.....

(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): Noemi Luz Carranza Gallardo

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	16	B	Bueno	Muy bueno

Candidato/a (b): Claudia Beatriz Rejano Garcia

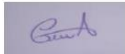
CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	16	B	Bueno	Muy bueno

Candidato/a (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

() Ver parte posterior*

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

_____		
Presidente/a		Secretario/a
_____	_____	_____
Asesor/a	Miembro	Miembro
_____	_____	_____
Candidato/a (a)	Candidato/a (b)	Candidato/a (c)

Mecanismo de inmovilización de metales pesados en suelos agrícolas mediante enmiendas orgánicas (Compost y Biochar) y Microorganismos Benéficos (MOBs)

Carranza Gallardo, Noemi; Rejano García, Claudia
noemicarranzag@upeu.edu.pe; claudiarejano@upeu.edu.pe

EP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

Resumen

Las actividades antropogénicas vienen causando daños en el suelo destinados al cultivo, uno de los contaminantes más frecuentes son los metales pesados, por lo que, el desarrollo de técnicas de inmovilización ecoamigables se consolidan como rentables y eficientes. El objetivo de este artículo de revisión es realizar una compilación sobre los mecanismos de inmovilización de metales pesados mediante enmiendas orgánicas (compost y biochar) y microorganismos benéficos de suelos agrícolas contaminados. Tras la compilación de investigaciones obtenidas en base de datos científicas, se precisa que las enmiendas orgánicas, utilizan el mecanismo de adsorción, intercambio iónico y precipitación; mientras que, los microorganismos benéficos favorecen la detoxificación de sustancias peligrosas gracias a sus reacciones metabólicas. El compost puede inmovilizar Pb, Cd y Cr; el biochar y los MOBs, un 100% y 70% de Pb respectivamente. Por ello, es preciso aprovechar estas propiedades, mecanismos y aplicarlos sobre suelos agrícolas contaminados.

Palabras Clave: Inmovilización, Metales Pesados, Enmiendas Orgánicas, Microorganismos Benéficos

Abstract

Anthropogenic activities have been causing damage to the soil destined for cultivation, one of the most frequent pollutants is heavy metals, therefore, the development of eco-friendly immobilization techniques is consolidated as profitable and efficient. The objective of this review article is to compile a compilation on the mechanisms of immobilization of heavy metals by organic amendments (compost and biochar) and beneficial microorganisms from contaminated agricultural soils. After the compilation of research obtained from scientific data, it is specified that organic amendments use the mechanism of adsorption, ion exchange and precipitation; while, beneficial microorganisms favor the detoxification of dangerous substances thanks to their metabolic reactions. Compost can immobilize Pb, Cd and Cr; biochar and MOBs, 100% and 70% of Pb respectively. Therefore, it is necessary to take advantage of these properties and mechanisms and apply them on contaminated agricultural soils.

Key Words: Immobilization, Heavy Metals, Organic Amendments, Beneficial Microorganisms

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente esencial del ecosistema, base para la agricultura y medio donde se desarrollan las plantas para alimentar a los seres vivos (FAO, 2015), este brinda diferentes servicios ecosistémicos, ya sean ecológicos, agronómicos, económicos, culturales, arqueológicas y recreacionales, siendo uno de los más importantes la función de producción primaria o soporte a la vegetación terrestre (Haygarth y Ritz, 2009).

La calidad y salud del suelo se determina por sus propiedades y procesos para utilizarlos como bioindicadores, además de su capacidad para mantener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover el crecimiento de las plantas y salud animal (Bünemann et al., 2018). Un suelo está contaminado cuando hay presencia de sustancias químicas en concentraciones superiores a la tolerable, que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo no objetivo (FAO y ITPS, 2015).

Las principales fuentes de contaminación del suelo son antropogénicas, generados por las industrias, la minería y expansión urbana, resultando en la acumulación de sustancias que alteran sus propiedades llegando a alcanzar niveles elevados, como la presencia de metales pesados: mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr) y arsénico (As), etc., los cuales presentan alto grado de toxicidad biológica (Su, Jiang y Zhang, 2014; Tomassoni, Ferreira, Samways, Carpinsk y Da Silveira, 2014; Kasassi et al., 2008).

Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2007) existen diferentes métodos para la remediación de suelos contaminados, que se clasifican de acuerdo a la estrategia de remediación, tipo de tratamiento y lugar en que se realice el proceso. Dentro de las estrategias de remediación se encuentra el aislamiento o inmovilización del contaminante, el cual es estabilizado, o contenido con el uso de otros tipos de tratamiento, como métodos fisicoquímicos, que se valen de las propiedades de los contaminantes o del medio contaminado; y biológicos, que utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos, incluidas las bacterias, para degradar, transformar o remover los contaminantes (INECC, 2007).

La remediación de suelos contaminados por metales pesados, con enmiendas naturales y microorganismos benéficos es una solución potencial, puesto que no hay alteración en el medio local, porque son métodos amigables con el medio ambiente y de bajo costo (Chávez, 2014). El objetivo de este artículo de revisión es realizar una compilación sobre los mecanismos de

inmovilización de metales pesados mediante enmiendas orgánicas (compost y biochar) y microorganismos benéficos de suelos agrícolas contaminados.

2. DESARROLLO

2.1 Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados

Los metales pesados son considerados como uno de los grupos más peligrosos debido a su baja biodegradabilidad, su alta toxicidad a bajas concentraciones y su fácil capacidad para acumularse en diferentes organismos (A. Cardona, Cabañas, y Zepeda, 2013), pueden ser disueltos por agentes físicos, químicos y ser lixiviados; algunos metales pueden formar complejos solubles, ser transportados y distribuidos a los ecosistemas hasta llegar a incorporarse a una cadena trófica (Londoño, Londoño, y Muñoz, 2016).

Los metales pesados ingresan a los suelos por deposición de partículas arrastradas por el viento, contacto con las aguas residuales industriales, el riego de cultivos con aguas que contengan pequeñas fracciones de este metal, y aguas de escorrentía procedentes de relaves mineros (Cordero, 2015). Los metales como iones libres, pueden ser retenidos en el suelo y también pueden ser movilizados en la solución suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos, llegando a contaminar los suelos destinados a cultivos (Madueño, 2017). Actualmente, investigaciones referentes al tema, muestran el efecto de consumir cultivos que están expuestos a niveles altos de metales pesados depositados en los suelos agrícolas, llegando a tener intoxicaciones y adquiriendo enfermedades crónicas, también causa problemas de aspecto cognitivo generando cambios de comportamiento y menor rendimiento académico (Corzo y Velásquez, 2014). La inmovilización de los metales permitirá que se reduzca su acumulación en los suelos agrícolas y los cultivos respectivamente, lo cual favorece de manera directa a la salud de los consumidores, por ende, esto se verá reflejado en la sostenibilidad de los sistemas de salud y una mejor calidad de vida (OMS, 2019).

2.2 Enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas son sustancias orgánicas que se aplican a los suelos con objetivo de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (F. Cabrera, 2007). La incorporación al suelo de estos materiales son prácticas de manejo agrícola realizadas por los productores para hacer más eficiente el sistema de producción porque aportan materia orgánica y nutrientes, lo que favorece la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas (J. Álvarez, Díaz, León, y Guillén, 2010).

2.3 Compost

El compost es la degradación de material orgánico por acción de microorganismos aerobios que alteran su estructura molecular, de este modo se puede aprovechar toda clase de residuos biodegradables en condiciones controladas (V. Cabrera y Rossi, 2016; Suaña, 2013), el compost es obtenido a partir de diversos residuos orgánicos que diferencian su calidad y estabilidad, en consecuencia del tipo de materia prima y su variabilidad (López et al., 2015).

La aplicación de compost es una práctica sostenible y utilizada en cada uno de los sistemas asociados a la agricultura, el cual posibilita la transformación de manera segura de los residuos orgánicos en insumos para la producción agrícola (FAO, 2013), en este proceso se busca constituir un adecuado ecosistema de diversas poblaciones microbianas formadas por hongos, actinomicetos y bacterias encargadas de degradar secuencialmente la materia orgánica en presencia de oxígeno por la influencia de determinados factores, produciendo temperaturas altas, reduciendo el peso y volumen de los residuos ocasionando su humificación y oscurecimiento (Bueno, Díaz, y Cabrera, s.f.), esto genera un producto estable unificado con gases, agua y calor como residuos del metabolismo microbiano, es decir, se consolida como una compleja interacción entre los restos orgánicos y los microorganismos con la aireación y el calor (Cabrera y Rossi, 2016).

Estos microorganismos cambiarán a medida que avanza el compostaje, debido a que el pH, la temperatura, el contenido de humedad, la cantidad y calidad del material orgánico también cambia; hay una clara incidencia de sucesión microbiana de mesófilos a termófilos durante las primeras etapas del compostaje, y viceversa, durante las etapas tardías, esto indica que uno de los factores más resaltantes para el desarrollo de microorganismos compostadores es la temperatura (Nakasaki, Nag, y Karita, 2005). Asimismo, el pH también tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos, siendo el pH neutro, síntoma de una buena actividad microbiana (Ramos y Zúñiga, 2008).

Además, el compostaje mejora la fertilidad y estructura del suelo, y lo protege de la erosión sin dañar su equilibrio; su efecto es progresivo y acumulativo, consiguiendo una mayor retención de humedad, y aumentando los niveles de material orgánico para la obtención de plantas más sanas y de mayor producción (SIRSD-S, 2017).

2.4 Biochar

El biochar también conocido como biocarbón, es un tipo de carbón vegetal utilizado como técnica de enriquecimiento de nutrientes para el suelo que se viene desarrollando en varios

países, dado que mejora las propiedades físicas y biológicas de los suelos, como la capacidad de retención de agua y favorecer el crecimiento de las plantas (Olavide, 2012), este producto de origen orgánico rico en carbono, se obtiene de la combustión de biomasa conformada por residuos de cultivos agrícolas, residuos forestales, desechos de madera, porción orgánica de residuos sólidos urbanos y estiércol de animal (Duku, Gu y Hagan, 2011), es decir, se trata de un carbono predominantemente estable y recalcitrante formado por un proceso termoquímico de biomasa en condiciones bajas de oxígeno llamado pirólisis (Olavide, 2012).

Las condiciones de pirólisis para la producción de biochar y las características de la materia prima o biomasa, controlan en gran medida las propiedades físicas y químicas, como la composición, partículas y distribución del tamaño de los poros, del biocarbón resultante (Tripathi, Sahu y Ganesan, 2016), dichas condiciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Condiciones de funcionamiento para diferentes tipos de pirólisis.

Características	Lenta	Rápido	Destello	Intermedia	Al Vacío	Hidro
Temperatura (°C)	550-950	850-1250	900-1200	500-650	300-600	350-600
Velocidad de calentamiento (°C /s)	0.1-1.0	10-200	> 1000	1.0-10	0.1-1.0	10-300
Tiempo de residencia (s)	300-550	0.5-10	< 1	0.5-20	0.001-1.0	> 15
Presión (Mpa)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01-0.02	5-20
Tamaño de partícula (mm)	5-50	< 1	< 0.5	1-5	-	-

Fuente: Tripathi, Sahu y Ganesan (2016)

El biochar, por lo general, tiene un pH que varía de ácido a alcalino, con un promedio de pH 8.1 y un intervalo de pH entre 6.2 y 13 (Escalante et al., 2016) una microporosidad elevada, la cual le brinda una superficie reactiva donde se adsorben los metales pesados. La aplicación de Biochar, por tener alto contenido de carbono y ser altamente resistente a la descomposición (Balta, 2019), funciona como reservorio de larga duración de carbono recalcitrante, retardando de esta manera su retorno a la atmosfera como CO₂ (Escalante et al., 2016), situación que contribuye a mitigar el cambio climático, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, etc. (Duku, Gu y Hagan, 2011), a la vez que mejora las propiedades del suelo; porque agrega una resistencia química y biológica a la biomasa original (Escalante et al., 2016),

la cual, antes de morir captaba el dióxido de carbono (CO₂) a través de la fotosíntesis, pero al ser sometida al proceso de pirolisis, se transformara en carbón biológico con la misma resistencia de la biomasa original (Lehmann, Gaunt, y Rondon, 2006).

La aplicación del biochar en suelos contaminados ha demostrado incrementar el pH, la retención de agua, la fertilidad, el rendimiento agrícola del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y la retención de NH⁴⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, así como también ayuda a reducir la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados es por ello, que su uso como enmienda orgánica da lugar a una técnica de descontaminación in situ, respetuosa con el medio ambiente (M. L. Álvarez, 2019; Balta, 2019)

2.5 Microorganismos benéficos (MOBs)

Están constituidos por una mezcla de microorganismos cada uno de ellos tienen su campo de actuación pero al pertenecer al mismo ecosistema presentan relaciones sinérgicas, de cooperación y co-metabolismo resultando ser benéficos (Tinín, 2018; J. Cardona, 2008). Por su gran versatilidad bioquímica son intermediarios entre el mundo mineral y el mundo vivo y sus innumerables reacciones metabólicas les permite reestablecer el equilibrio microbiológico en espacios contaminados (Vida Sana, 2012). En la composición de los microorganismos benéficos se encuentran bacterias fotosintéticas (*Rhodospseudomonas spp*), bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus ssp*), levaduras (*Saccharomyces spp*) y por último, los hongos de fermentación (*Aspergillus oryzae*) (Tinín, 2018) que pueden ser aplicados para aumentar la diversidad microbiana de los suelos y plantas (Higa y Parr, 2019).

Los microorganismos, son aplicados en procesos como el compostaje, donde la materia orgánica es utilizada como nutriente para su desarrollo, produciendo una mineralización hasta moléculas orgánicas e inorgánicas más simples, dando paso al proceso de humificación donde se producen nuevas macromoléculas a partir de moléculas más sencillas. En este proceso como producto final se obtiene: calor, CO₂, H₂O y compuestos húmicos (Escobar, Mora, y Romero, 2012).

Los MOBs también pueden ser aplicados de manera directa en suelos contaminados por metales pesados, no porque sean capaces de degradar ni destruir los compuestos inorgánicos, sino porque pueden minimizar la toxicidad, puesto que, son resistentes a elevadas concentraciones de metales pesados, de esta forma los microorganismos pueden llegar a

constituir biofertilizantes, biocontroladores y biotransformadores de metales en el suelo, ayudando a movilizar nutrientes a la planta y reduciendo los contaminantes (L. Álvarez, 2019).

2.6 Mecanismo de inmovilización: compost, biochar y MOBs

El mecanismo para la inmovilización de metales pesados mediante las enmiendas, biochar y compost, incluyen el aumento del pH, el intercambio iónico, la adsorción física y la precipitación (Meddeb et al., 2018).

Los cambios en el contenido de agua del suelo, las desviaciones del estado de equilibrio y los cambios en la actividad de los microorganismos moderan las reacciones de adsorción-desorción, precipitación-disolución y formación de complejos y pares iónicos en relación con el pH, esto influye directamente en las condiciones redox, el contenido de agentes quelantes solubles y en la composición tanto del material sólido como de la solución del suelo (Naidu, Kookana, Oliver, Rogers y McLaughlin, 2012).

Obregón (2012), menciona que el proceso de adsorción abarca la transferencia de masa del adsorbato a la superficie del adsorbente, la cual tiene lugar en la región interfacial, en tres etapas que se dan de manera sucesiva, como muestra la figura 1. La primera etapa, difusión externa, comprende el acercamiento del adsorbato a la superficie externa del sólido adsorbente, venciendo la resistencia acumulada de la película fina localizada alrededor del adsorbente. Durante la segunda etapa, difusión interna, el adsorbato se desplaza a través de la red porosa del sólido para que, en la última etapa, se adhiera a la superficie del adsorbente dándose la adsorción como tal.

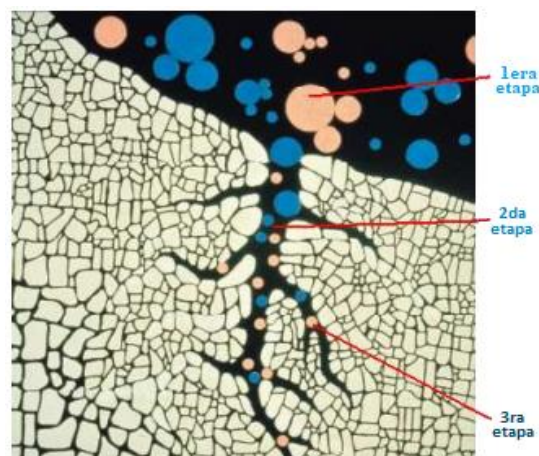


Figura 1: Etapas del proceso de adsorción (Obregón, 2012).

La adsorción puede incluir la atracción electrostática y la formación de complejos con grupos funcionales carboxilo (COOH^-), hidroxilo (OH^-) alcohólico o fenólico (OH^-) en la

superficie de las enmiendas, así como también la coprecipitación (Balta, 2019), la cual consiste sobre un elemento que pueda precipitar a pesar de no encontrarse en una concentración de saturación porque se integra en la estructura de otro compuesto que precipita (Sepúlveda, 2015).

A fin de obtener información sobre el mecanismo planteado se utilizan las isothermas de adsorción, esta herramienta es útil para analizar la adsorción del metal en el suelo en relación a la variación de su concentración. Para construir una isoterma de sorción se deben realizar experimentos y obtener la concentración sorbida de analito (C_{sorb}) en mg/l, es decir, la cantidad retenida en el proceso de remoción, que está dada por la diferencia de la concentración inicial del sorbato y su porción residual en la solución o concentración en equilibrio (C_e) (Monroy, 2019). Una vez hallada la concentración sorbida, se determina la capacidad de adsorción (q_e) mediante la ecuación (1):

$$q_e = \frac{V (C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

Donde:

q_e : Capacidad de adsorción (mg/g)

C_0 : Concentración inicial (mg/l)

C_e : Concentración del adsorbato en equilibrio (mg/l)

V : Volumen de la solución (l)

m : Masa del adsorbente (g).

Los resultados se representan en gráficos que relacionan la diferencia de concentraciones y la capacidad de adsorción y en función de la curva obtenida se clasifican las isothermas de adsorción como se muestra en la figura 2 (Obregón, 2012; Sepúlveda, 2015).

Tipos de Isoterma

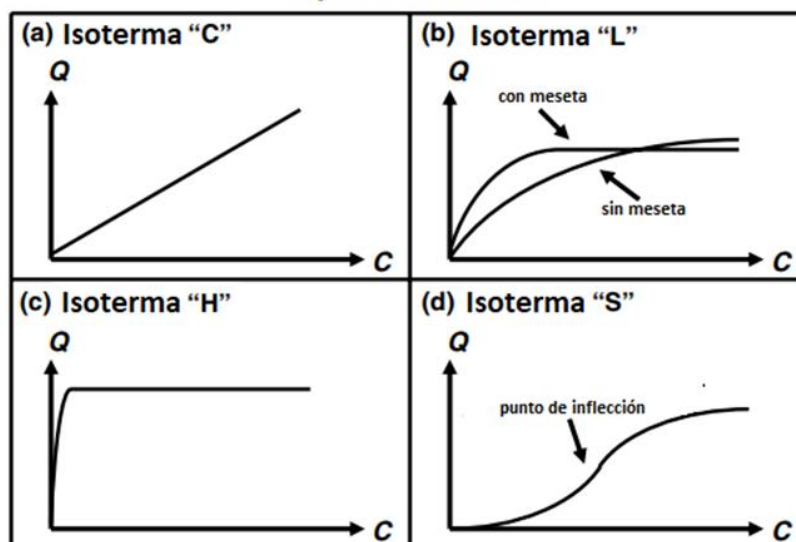


Figura 2: Tipos de Isotermas (Limousin et al., 2007).

En la figura 2, Q representa la capacidad de adsorción del adsorbente (mg/g), mientras C es la concentración residual del adsorbato (mg/l), en este caso el metal, en la solución en el equilibrio (Limousin et al., 2007). Los dos modelos más comunes que describen el proceso de adsorción de metales son las isotermas de Langmuir y Freundlich (Bonilla, Tejada y Del Pino, 2017), que describen la isoterma Tipo L e indican que la relación entre la concentración del adsorbato remanente en la solución y la cantidad adsorbida en el sólido disminuye al aumentar la concentración en el equilibrio de la solución originando una curva cóncava (Obregón, 2012).

Asimismo, De la Cruz (2018), menciona que el pH es un factor importante porque determina el comportamiento del metal en el suelo, un pH bajo se asocia al aumento de la concentración de metales pesados en solución, además algunas investigaciones muestran que la eficiencia de la capacidad de sorción de las enmiendas supera el 85 % con un pH entre 4 y 7, aunque la magnitud del efecto es muy dependiente del metal, material inicial para la elaboración de la enmienda y suelo enmendado (Sepúlveda, 2015).

Otro mecanismo que se da es el intercambio iónico, que consiste en la sustitución de un ion intercambiable de la fase sólida del suelo por otro ion presente en la solución. En el suelo hay dos tipos de carga, la permanente, que se da cuando un catión (+) del mineral del suelo es reemplazado por otro de tamaño similar, pero con carga menor, lo cual, genera una carga negativa neta sobre su superficie; y la carga variable, que depende de las variaciones del pH y la concentración de sales, esta se genera cuando hay adición o reducción de protones. Es decir,

la carga de la superficie de la fase sólida se ve compensada por iones de intercambio como Ca, Mg, K, Na, Cl (Sepúlveda, 2015), como se visualiza en la figura 3.

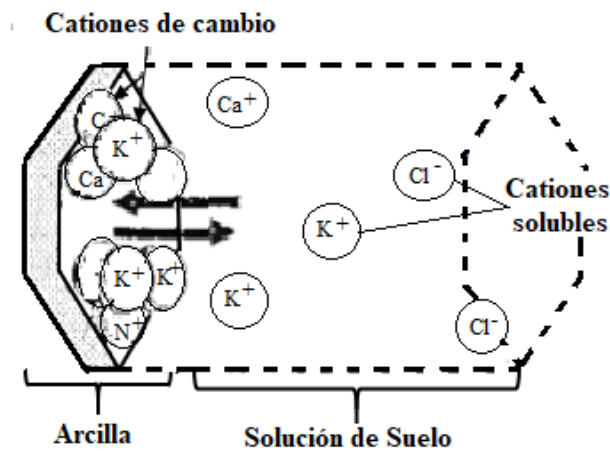


Figura 3: Intercambio iónico entre las partículas del suelo y la solución de suelo (Pellegrini y Vazquez, 2014).

En cuanto a los microorganismos benéficos (MOBs), cuentan con amplias capacidades metabólicas que les permite utilizar diferentes tipos de sustratos con el objetivo de obtener energía y en muchos casos transformarlos; los metales pesados son sustratos que pueden ser inmovilizados o transformados por estos organismos utilizando diversas estrategias, lo cual puede afectar su biodisponibilidad (Casteblanco, 2018). La inmovilización de los MOBs se basa en procesos digestivos microbianos (microremediación) que pueden minimizar la toxicidad y la biodisponibilidad de los metales pesados (Beltrán y Gómez, 2016).

Los metales pesados tienen carga positiva y son atraídos por las cargas negativas de los grupos carboxilos, fosforilos y aminos que se encuentran en las paredes celulares, membranas y material extracelular de bacterias y hongos, una vez que se adhieren a la superficie celular los metales pesados se internalizan en la célula, donde los iones positivos metálicos se pueden precipitar dentro de vacuolas u otras estructuras para disminuir su toxicidad; los hongos filamentosos también pueden adsorber metales pesados en soluciones acuosas, pero su capacidad de biosorción depende del pH, los metales presentes en la solución y la concentración de biomasa (Abraham, García y Peña, 2015).

Valiéndose de las características mencionadas, los microorganismos pueden ser utilizados para limpiar y remediar ambientes contaminados, entre las cuales se encuentra la fermentación de materia orgánica sin liberación de malos olores, y su capacidad de convertir los desechos tóxicos en sustancias no tóxicas, por ello, los microorganismos juegan un rol vital en la

transformación de elementos traza incluidos los metales (Beltrán y Gómez, 2016). Las propiedades desionizantes que favorecen la detoxificación de sustancias peligrosas, quelación de metales pesados y producciones de enzimas como la lignina peroxidasa, también cuentan con mecanismos de sobrevivencia y desintoxicación que les permite tolerar y acumular los metales pesados (Muñoz, Olivera, Santillán, y Tamariz, 2019).

3. RESULTADOS

Chen, Zeng, Tu, Huang, y Chen (2005), mencionan que el uso de compost como biosorbente de metales pesados como Plomo, Cadmio y Cromo tiene una elevada capacidad de sorción en soluciones acuosas con un pH en condiciones ácidas, entre 4,8 y 7. Los autores atribuyeron la capacidad de sorción de esta enmienda a la capacidad de formar enlaces y su electronegatividad.

Cao y Harris (2010), indican que el biochar mostró una capacidad de adsorción de Plomo y Atrazina (herbicida), de una solución acuosa, con una eliminación de hasta 100% y 77% respectivamente, asimismo, Romero (2017), señala que el biochar puede lograr reducir la biodisponibilidad de metal plomo, alcanzando una eficiencia máxima de inmovilización de 81.89% en el suelo.

Por su parte, Muñoz et al. (2019), aluden que entre las bacterias, los hongos son los microorganismos que poseen la mayor capacidad para inmovilizar hasta a un 70% de plomo en el suelo, siendo este uno de los metales mas tóxicos porque causa problemas a la salud y al ambiente.

4. CONCLUSIÓN

En conclusión, tras compilar las investigaciones obtenidas de base de datos como ScienceDirect, SciELO, Redalyc, EBSCO, entre otras, se precisa que los mecanismos para la inmovilización de metales pesados en el suelo agrícola mediante enmiendas orgánicas son intercambio iónico y adsorción mediante difusión externa e interna, complementados con el proceso de precipitación que facilita el proceso, mientras que los MOBs acumulan los metales pesados dentro de sus organismos mediante su proceso digestivo. Los microorganismos benéficos y las enmiendas orgánicas son muy importantes para lograr la remediación de suelos agrícolas contaminados por metales pesados.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, S., García, J., y Peña, J. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25, 40–45. <https://doi.org/10.15174/au.2015.907>
- Álvarez, J., Díaz, E., León, N., y Guillén, J. (2010). Organic Amendments and Soil Metabolic Activity in Corn Yield. *Terra Latinoamericana*, 28, 239–245. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/573/57316064006.pdf>
- Álvarez, L. (2019). *Tratamiento de suelos contaminados por metales mediante combustión de técnicas de fitorremediación con adición de biochar*.
- Balta, R. (2019). *El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (Solaneum lycopersicum L.) bajo el invernadero*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Beltrán, M., y Gómez, A. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Bonilla, H., Tejada, C., y Del Pino, J. (2017). Obtención de Isotermas de Adsorción del Plomo (II) del efluente minero Río Anticona – Cerro de Pasco utilizando el Carbón Activado de cáscara de naranja. *Ciencia & Desarrollo*, 16(2), 29–36.
- Bueno, P., Díaz, M., y Cabrera, F. (n.d.). Factores que afectan al proceso de Compostaje. Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica. Universidad de Huelva. <https://doi.org/10.1002/adma.201604105>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R., De Deyn, G., De Goede, R., ... Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(January), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cabrera, F. (2007). Materia orgánica del suelo: papel de las enmiendas orgánicas. *Real Academia Sevillana de Ciencias*, 3, 275–291. Retrieved from [http://digital.csic.es/bitstream/10261/28751/3/Materia orgánica.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/28751/3/Materia%20org%C3%A1nica.pdf)
- Cabrera, V., y Rossi, M. (2016). *Propuesta para la elaboración de compost a partir de los residuos vegetales provenientes del mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito de Miraflores*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cao, X., y Harris, W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology*, 101(14), 5222–5228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>
- Cardona, A., Cabañas, D., y Zepeda, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1), 1–9.
- Cardona, J. (2008). *Evaluación de efectos de los microorganismos eficaces (EM) sobre la calidad de aguas residuales doméstica*. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad De Ciencias.
- Castebianco, J. A. (2018). Técnicas de Remediación de Metales Pesados con Potencial aplicación en el cultivo de cacao. *La Granja*, 27(1), 21–35. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>
- Chávez, L. (2014). *Fitorremediación con Especies Nativas en Suelos Contaminados por Plomo*. Universidad Nacional Agraria la Molina.

- Chen, G., Zeng, G., Tu, X., Huang, G., y Chen, Y. (2005). A Novel Biosorbent: Characterization of the Spent Mushroom Compost and Its Application for Removal of Heavy Metals. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 17, 756–760.
- Cordero, J. (2015). Fitorremediación in Situ para la Recuperación de Suelos Contaminados por Metales Pesados (Plomo y Cadmio) y Evaluación de Selenio en la Finca Furatena Alta en el Municipio de Útica (Cundinamarca), 13–43.
- Corzo, I., y Velásquez, M. (2014). El plomo y sus efectos en la salud. *Acta Médica Del Centro*, 8(3), 141–148.
- De la Cruz, L. (2018). *Eficiencia del biochar a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo a nivel laboratorio*. Universidad César Vallejo. Retrieved from <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/20520>
- Duku, M. H., Gu, S., y Hagan, E. Ben. (2011). Biochar production potential in Ghana - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3539–3551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.010>
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., y Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Escobar, N., Mora, J., y Romero, N. (2012). Identificación de Poblaciones Microbianas en Compost de Residuos Orgánicos de Fincas Cafeteras de Cundinamarca. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 16(1), 75–88.
- FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*.
- FAO. (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4405s.pdf>
- FAO y ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report*. Rome, Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- Haygarth, P., y Ritz, K. (2009). The future of soils and land use in the UK : Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26(1), 187–197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.016>
- Higa, T., y Parr, J. (2019). Microorganismos benéficos y Efectivos para una Agricultura y Medio Ambiente Sostenible. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INECC. (2007). Tecnologías de remediación. Retrieved from [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html#:~:text=Entre las tecnologías fisicoquímicas para,estabilización \(S%2FE\)](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html#:~:text=Entre las tecnologías fisicoquímicas para,estabilización (S%2FE))
- Kasassi, A., Rakimbei, P., Karagiannidis, A., Zabaniotou, A., Tsiouvaras, K., Nastis, A., y Tzafeiropoulou, K. (2008). Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill. *Bioresource Technology*, 99(18), 8578–8584. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.010>
- Lehmann, J., Gaunt, J., y Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A

- review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427.
<https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- Limousin, G., Gaudet, J. P., Charlet, L., Szenknect, S., Barthès, V., y Krimissa, M. (2007). Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*, 22(2), 249–275. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.09.010>
- Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. <https://doi.org/10.18684/BSAA>
- López, X., Robles, C., Velasco, V., Ruiz, J., Enriquez, J., y Rodríguez, G. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas de tres residuos agrícolas compostados. *Ciencia Ergo Sum*, 22(2), 145–152.
- Madueño, F. (2017). *Determinación de metales pesados (plomo y cadmio) en lechuga (Lactuca sativa) en mercados del Cono Norte, Centro y Cono Sur de Lima Metropolitana. Universidad Nacional Mayor De San Marcos Facultad De Farmacia Y Bioquímica E.a.P. De Toxicología.*
- Meddeb, S., Hassine, H., Tangour, D., Aichi, H., Álvarez, M. de la R., y López, R. (2018). Efectos de biochar y compost en un suelo de huerto urbano moderadamente contaminado por metales pesados, 335–338.
- Monroy, R. (2019). *Remoción de Plomo Pb (II) de soluciones acuosas y aguas residuales de mina, por adsorción, floculación – sedimentación de flujo ascendente batch utilizando Chacko (Hidralgiritita) Y Cal (CaO).* Universidad Nacional del Altiplano. Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11856>
- Muñoz, L., Olivera, P., Santillán, M., y Tamariz, C. (2019). Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa Rosa, Jangas (Perú). *Revista Peruana de Biología*, 26(1), 109–118. <https://doi.org/10.15381/rpb.v26i1.15914>
- Naidu, R., Kookana, R. ., Oliver, D., Rogers, S., y McLaughlin, M. (2012). *Contaminants and the Soil Environment in the Australasia-Pacific Region.*
- Nakasaki, K., Nag, K., y Karita, S. (2005). Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Management and Research*, 23(1), 48–56. <https://doi.org/10.1177/0734242X05049771>
- Obregón, D. (2012). *Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Retrieved from http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6097/ACOSTA_CARLOS_DISEÑO_MAQUINA_REBANADORA.pdf?sequence=1
- Olavide, U. (2012). Biocarbón como sumidero de carbono y fertilizante agrícola.
- Pellegrini, A., y Vazquez, M. (2014). Capacidad de Intercambio (CI).
- Ramos, E., y Zúñiga, D. (2008). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*, 7, 123–130. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:>
- Romero, J. (2017). *Eficiencia en la Inmovilización de Plomo en el Suelo Mediante la Aplicación de*

Cantidades de Biocarbón en el Distrito San Mateo, Lima.

- Sepúlveda, A. (2015). *Evaluación de la adición de materiales de origen orgánico para la remediación de suelos contaminados con metales pesados*. Universidad de Barcelona.
- SIRSD-S, P. (2017). Pauta técnica para la aplicación de compost.
- Su, C., Jiang, L., y Zhang, W. (2014). A review on heavy metal contamination in the soil worldwide : Situation , impact and remediation techniques, 3(2), 24–38.
- Suaña, M. (2013). *Compostaje de residuos orgánicos y de Lenteja de Agua (Lemna sp.) con aplicación de microorganismos eficientes*. Universidad Nacional Del Altiplano.
- Tinín, V. (2018). *Aplicación de microorganismos benéficos (MOBs) para la depuración de aguas residuales del hato ganadero de la granja experimental Paute - Universidad Politécnica Salesiana*.
- Tomassoni, F., Ferreira, R., Samways, F., Carpinski, M., y Da Silveira, L. (2014). Técnica de biorremediação do solo, 46–56.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., y Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Vida Sana. (2012). Microorganismos del suelo y biofertilización. *Crops for Better Soil*.