



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS
MEDIANTE ESPECIES DEL GÉNERO BRASSICA”

Trabajo de Investigación para optar el grado de:
BACHILLER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Karen Briguit Huiza Acosta

Asesor:

Armando Jesús Edilberto Vélez Azañero

Lima – Perú

2019



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°188-2019-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 27 de noviembre de 2019

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Remediación de suelos contaminados con metales pesados mediante especies del género Brassica**, presentado por:

- **Karen Briguit Huiza Acosta**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Remediación de suelos contaminados con metales pesados mediante especies del género Brassica** con N° de registro de la carrera: **033-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Armando Jesús Edilberto Vélez Azañero** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

**REMEDIACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS MEDIANTE ESPECIES
DEL GÉNERO BRASSICA**Karen Huiza-Acosta^{1*} y Armando Vélez-Azañero¹*¹Universidad Científica del Sur. Facultad de Ciencias Ambientales. Carrera de Ingeniería Ambiental. Panamericana Sur Km19. Lima 42.**karenbriquithuizacosta@gmail.com***RESUMEN**

La evolución de empresas industriales tecnológicas, agropecuarias, especialmente las actividades de agricultura y minería constituyen una fuente de contaminación que afecta la calidad del suelo y disminuye el potencial de producción de tierras agrícolas. Ante ello, se ha buscado diferentes tecnologías de recuperación de suelos; donde la remediación de suelos contaminados mediante el uso de plantas ha demostrado ser alternativas ecoamigables con el ambiente. La fitorremediación de suelos afectados por metales pesados es una alternativa eficiente para la disminución y extracción de metales. Actualmente se han identificado más de 400 taxones de plantas hiperacumuladoras capaces de concentrar metales cien veces más que las especies no acumuladoras. La familia Brassicaceae cuenta con el mayor número de especies clasificadas como hiperacumuladoras metálicas contando con 87 especies en 11 géneros. En el transcurso de los años se ha mejorado la eficiencia de remediación mediante la aplicación de enmiendas, agentes quelantes y prácticas de cultivo. Las especies del género Brassica concentran metales, contribuyen a la formación de biomasa y al aprovechamiento del aceite a partir de las semillas, representando disminución en los costos de fitorremediación al ser una especie caracterizada por su capacidad de adaptación a ambientes extremos.

Palabras clave: Metales pesados, contaminación de suelos, fitorremediación, Brassica.

ABSTRACT

The evolution of industrial technology, agricultural companies, especially agriculture and mining activities, is a source of pollution that affects soil quality and decreases the production potential of agricultural land. In the face of this, different soil recovery technologies have been sought; where the remediation of contaminated soils through the use of plants has proven to be eco-friendly alternatives to the environment. Fireto remediation of soils affected by heavy metals is an efficient alternative for metal reduction and extraction. More than 400 taxa from hyperaccumulating plants capable of concentrating metals a hundred times more than non-accumulating species have now been identified. The Brassicaceae family has the highest number of species classified as metal hyperaccumulators with 87 species in 11 genera. Over the years, remediation efficiency has been improved through the implementation of amendments, chelating agents and cultivation practices. Species of the genus *Brassica* concentrate metals, contribute to the formation of biomass and the use of oil from seeds, representing decrease in the costs of phytoremediation as it is a species characterized by its capacity to adaptation to extreme environments.

Keywords: Heavy metals, soil contamination, phytoremediation, *Brassica*.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por metales pesados es uno de los problemas ambientales más importantes a nivel mundial (Tafesse, 2014); debido al desarrollo industrial (filtraciones de vertederos, vertidos de aceite y combustible) (Ibáñez, 2015), tecnológico, agropecuario y el uso de fertilizantes químicos; que proyectan un aumento en los niveles de contaminación en un 50 % para el año 2050 (Rodríguez-Eugenio *et al.*,

2018). Las principales actividades que provocan contaminación química y cambios físicos en el suelo son la agricultura y la minería (Guerrero & Pineda, 2016); a nivel mundial 2500 exportaciones mineras corresponden a minería metálica (Parejo & Parejo, 2012) generando daños irreversibles (Nolasco, 2011) e impactos significativos en el suelo (Rosique, 2016), por sobrecarga de sedimentos contaminantes que en su mayoría corresponden a metales pesados (Trujillo-González & Torres-Mora, 2015).

Naturalmente, los metales pesados se concentran en cantidades muy bajas, conocidos como elementos trazas (Galán & Romero, 2008), en la corteza terrestre, estos se encuentran por debajo del 0,1 % y casi siempre menor del 0,01 % (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007); sin embargo, cuando la movilidad de metales pesados en el suelo es lenta, se acumulan en los primeros diez centímetros y el resto es lixiviado a los horizontes subsuperficiales (Clarkson, 1993). El alto porcentaje de metales pesados en el ambiente es una importante fuente de contaminación de suelos (Londoño-Franco *et al.*, 2016); por ejemplo, los suelos de Europa contienen 60% de contaminantes inorgánicos, siendo los más comunes los aceites minerales y metales pesados como plomo, arsénico, cadmio y mercurio (Ibáñez, 2015); en China, el 19,4 % de las tierras agrícolas están contaminadas con cadmio, níquel y arsénico (FAO, 2015); y en el Perú, las regiones con mayor exposición a metales en el humano son Pasco (51,8 %), Junín (28 %); y el resto de regiones (20,7 %) (MINSA, 2016).

El interés en las plantas hiperacumuladoras de metales se ha intensificado en los últimos 20 años (Rascio & Navari-Izzo, 2011). La familia Brassicaceae representa uno de los grupos más importantes con 87 especies en 11 géneros con alta eficiencia en la descontaminación de suelos (Farooq *et al.*, 2016), siendo las especies más destacadas

Brassica juncea, Brassica napus y Brassica oleracea (Chaney & Baklanov, 2017) por sus mecanismos internos de decodificación (Delgadillo-López *et al.*, 2011) y su crecimiento acelerado (Angelova & Ivanok, 2009).

El objetivo de la investigación fue identificar la información disponible sobre la capacidad de remediación de suelos contaminados con metales pesados de las especies del género Brassica, por su importancia en la gestión ambiental contribuyendo con la mejora de la eficiencia del suelo por la alta producción de biomasa de esta especie.

MARCO TEÓRICO

1. Contaminación del suelo

El suelo es el receptor final de las sustancias liberadas al ambiente por el desarrollo de las actividades humanas (Shayler *et al.*, 2009) como la minería, la expansión urbana y el inadecuado manejo de residuos sólidos (Parent, 2013), que generan contaminantes orgánicos e inorgánicos, y provocan efectos adversos a la salud humana y al ambiente (Shayler *et al.*, 2009). El suelo como un ente vivo es altamente vulnerable así como de difícil recuperación (Silva & Correa, 2009; Kavamura & Esposito, 2010), debido a que la peligrosidad de los contaminantes no está representada únicamente por su cantidad total, sino por la disponibilidad (Galán & Romero, 2008).

Por ejemplo, en China el 16 % de los suelos excede los límites generales de contaminación, de los cuales el 83 % se encuentran con contaminantes inorgánicos químicos tales como cadmio (7 %), níquel (4,8 %), arsénico (2,7 %), cobre (2,1 %), mercurio (1,6 %), entre otros y el 17 % se encuentran con contaminantes orgánicos (1,9 % con DDT, 1,4 % con HAP y otros) (CCICED, 2015). Por otro lado, el 14 % de los suelos del Espacio Económico Europeo (EEE) conformados por 28 países Europeos se

encuentran contaminados, donde el 38,1 % son causados por eliminación y el tratamiento de residuos, 34 % por actividades comerciales e industriales y el 27,9 % por otras actividades (EEA, 2014). Mientras que en Australia se estiman 160 000 sitios contaminados, que contienen hasta 75 000 contaminantes diferentes (CRC CARE, 2014). En Cuba, la contaminación se debe a los suelos ultramáficos naturales, los cuales son ricos en metales pesados, siendo un factor limitante para el crecimiento de las plantas (Batista & Sánchez, 2009).

En países de Sudamérica como el Perú, los suelos de la Oroya presentan metales como arsénico, cadmio, plomo, mercurio y antimonio que superan los estándares internacionales (Díaz, 2016). El lago de Junín presenta una clara evidencia de contaminación de sus aguas y suelos debido a pasivos mineros (Chávez, 2014); en Colombia, también hay casos de contaminación por metales pesados como hierro y cobre que superan los máximos permisibles en todas las normas internacionales (Martínez & González, 2017), como es el caso del Corredor Vial Bogotá-Soacha con altas concentraciones de plomo y zinc (Zafra *et al.*, 2013). En México, los suelos urbano-industrial tienen concentraciones de arsénico que exceden los valores máximos establecidos por la Norma (González *et al.*, 2012).

1.1. Contaminantes Orgánicos

Estos tipos de contaminantes se introducen en el suelo (Manahan, 2006), mediante descargas industriales, prácticas agrícolas tradicionales y prácticas inadecuadas para la eliminación de residuos (Cristaldi *et al.*, 2017); estos contaminantes incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), hidrocarburos de petróleo (HTP), compuestos aromáticos, dioxinas, disolventes clorados, productos farmacéuticos,

plaguicidas, entre otros (Delgadillo *et al.*, 2011). En general, los contaminantes orgánicos a comparación de los contaminantes inorgánicos son menos reactivos para las plantas (Cherian & Oliveira, 2005), debido a que no contienen sustancias químicas altamente peligrosas, así como la acumulación de éstos son en menor proporción (Amaya *et al.*, 2015).

1.2. Contaminantes Inorgánicos

En estos contaminantes se incluyen los metales pesados, los cuales a altas concentraciones son tóxicos (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016). Estos metales son sustancias de la naturaleza con elevado peso molecular y con algunas utilidades, especialmente para el desarrollo de las plantas (Romero, 2009). Los metales pesados no son biodegradables por lo que son capaces de circular en diversos ecosistemas y acumularse en cualquier lugar (Baudhd *et al.*, 2015); es por ello que su persistencia afecta negativamente al ecosistema, productos agrícolas, calidad del agua, microorganismos presentes en el suelo y por ende a la salud humana (Kidd *et al.*, 2007). Por ejemplo, los suelos luego de una explotación minera contienen diferentes tipos de compuestos tóxicos (Puga *et al.*, 2006), además, existe un límite de metales pesados de acuerdo al tipo de suelo, ya sea agrícola, residencial o industrial (Tabla 1).

Tabla 1. Asociación de minerales a metales pesados en el suelo y su estándar máximo

Metales Pesados	ECA para suelos agrícolas (mg.Kg-1)	ECA para suelos residenciales (mg.Kg-1)	ECA para suelos industriales (mg.Kg-1)	Minerales asociados
Arsénico	50	50	140	Aluminio (Al)
Cadmio	1,4	10	22	Calcio (Ca)
Cromo	-	400	400	Hierro (Fe)
Cobre	-	-	-	Magnesio (Mg)

Mercurio	6,6	6,6	24	Potasio (K)
Níquel	-	-	-	Silicio (Si)
Zinc	-	-	-	Sodio (Na)
Plomo	70	140	800	
Manganeso	0,9	0,9	8	

Adaptado de Estándar de Calidad Ambiental para suelo (2017) y la asociación de minerales a los metales pesados en la investigación realizada por Galán y Romero (2008). NE: No especifica en ECA

2. Remediación de suelos contaminados con metales pesados

Las técnicas de remediación representan una solución a la disposición de desechos peligrosos al suelo, los cuales no han sido tratados (Trejo, 2002). Las técnicas tradicionales para la remediación de suelos contaminados con sustancias potencialmente tóxicas (INECC, 2007) utilizan métodos de ingeniería y tratamientos físico-químicos (González-Chávez, 2005), el primero incluye la excavación y gestión para tratamiento y eliminación, desorción térmica, lavado de suelos y biopilas (INERCO, 2018); y el segundo, involucra la adición de fosfatos, encalado y agentes quelantes (Vangronsveld & Cunningham, 1998). Mientras que las técnicas biológicas consisten en el uso de microorganismos y plantas (Cunningham *et al.*, 1995), generando un gran interés por ser más económicas en comparación de las otras técnicas (González-Chávez, 2005). Un ejemplo de remediación son los territorios de los estados europeos, donde se remedió el 15% de 342 000 sitios contaminados (EEA, 2014).

Hasta la fecha, se han identificado más de 400 taxones de plantas en todo el mundo de al menos 45 familias acumuladoras de metales (Baker *et al.*, 2000) que representan menos del 0,2 % de todas las especies conocidas (Rascio & Navari-Izzo, 2011; Sarma, 2011). Estas plantas tienen la capacidad de hiperacumular ciertas sustancias (Avelino,

2013); es decir, fitoextracción natural (Kidd *et al.*, 2007), siendo las familias de plantas con mayor abundancia en suelos con metales y metaloides las Asteraceae, Cyperaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae (Gratão *et al.*, 2005), Brassicaceae y Fabaceae (Anjum *et al.*, 2014). El cultivo de estas especies permite la extracción del metal pesado del suelo por absorción vegetal y la cosecha de su biomasa aérea (Kidd *et al.*, 2007).

Las plantas hiperacumuladoras son capaces de concentrar metales en sus tejidos en niveles cien veces más altas que las especies no acumuladoras (Tabla 2) (Lasat, 2000; Llugany *et al.*, 2007). Tres características básicas de las hiperacumuladoras son la tasa de captación de metales fuertemente mejorada, la translocación acelerada de raíz a brote y la gran capacidad para desintoxicar y capturar los metales en las hojas (Diez, 2008; Rascio & Navari-Izzo, 2011). Por ejemplo, Cuba tiene la isla de mayor desarrollo de la flora serpentínica, por lo que posee gran cantidad de plantas hiperacumuladoras y microorganismos rizosféricos, representando una gran estrategia de saneamiento ambiental factible (Marrero-Coto *et al.*, 2012).

Tabla 2. *Concentración de absorción de metales en plantas hiperacumuladoras y no acumuladoras*

Metales Pesados	Plantas Hiperacumuladoras (mg.Kg-1)	Plantas no acumuladoras (mg.Kg-1)
Arsénico (As)	≥ 1 000	≤ 1 000
Cadmio (Cd)	≥ 100	≤ 100
Cobre (Cu)	≥ 1 000	≤ 300
Manganeso (Mn)	≥ 10 000	≤ 10 000
Plomo (Pb)	≥ 1 000	≤ 1 000
Zinc (Zn)	≥ 10 000	≤ 3 000
Níquel	≥ 1 000	≤ 1 000
Cromo (Cr)	≥ 1 000	≤ 300
Cobalto (Co)	≥ 1 000	≤ 300

Selenio (Se)	≥ 100	≤ 100
--------------	------------	------------

Adaptado de Baker y Brooks (1989), Lasat (2002) y Chaney (2007).

2.1. Fitorremediación de metales pesados

La palabra fitorremediación del latín "phytoremedium" compuesto por "phyto" que significa planta y el sufijo "remedium" que significa limpiar o restaurar (Cunningham *et al.*, 1995), se refiere a una variedad de tecnologías basadas en el uso de plantas naturales y genéticamente modificadas para limpiar los ambientes contaminados (Ali, 2013; León, 2017); la fitorremediación forma parte de la biorremediación (Miranda-Martínez *et al.*, 2007), ésta se aplica a contaminantes inorgánicos y orgánicos presentes en sustratos sólidos, líquidos o en el aire mediante la fitotecnología (Chan-Quijano *et al.*, 2015). A diferencia de los tratamientos físicos y químicos que alteran irreversiblemente las propiedades del suelo, la fitorremediación generalmente mejora su calidad física, química y biológica (Liu *et al.*, 2018), siendo una alternativa respetuosa y favorable al medio ambiente (Van *et al.*, 2007).

2.1.1. Fitoestabilización

La fitoestabilización consiste en la inmovilización de los metales pesados en el suelo (Tabla 3) (Paredes, 2017), por plantas que a través de la raíz realizan absorción, complejación de exudado y precipitación, la reducción rizosférica y estabilización de suelos (Liu *et al.*, 2018) reduciendo la contaminación de los medios de comunicación cercanos y la inactivación del secuestro de estos contaminantes metálicos (Mahar *et al.*, 2016), ello también depende de los metales, debido a que algunos son más propensos a fitoestabilización que otros (Gomes *et al.*, 2006); sin embargo, la fitoestabilización tiene como ventaja la remediación de grandes extensiones de tierras contaminadas (Weyens *et al.*, 2009); Por ejemplo, el uso de leguminosas (Fabaceae) ha tenido

resultados prometedores, dada su capacidad para tolerar elementos potencialmente tóxicos, al mismo tiempo fijar nitrógeno atmosférico (Noquez-Inesta *et al.*, 2017).

2.1.2. Fitovolatilización

La fitovolatilización también conocido como fitoevaporación, consiste en la absorción de contaminantes del suelo (Tabla 3) (Carpena & Pilar, 2007; Ying *et al.*, 2016), por medio de las raíces de las plantas, conversión a la forma volátil (Mahar *et al.*, 2016) y finalmente son excretados por transpiración (Cabrera, 2005); por años esta técnica se ha utilizado para la eliminación de metales pesados como el mercurio, siendo transformado en su forma más elemental que es menos tóxico que la orgánica o inorgánica (Cubillos *et al.*, 2014).

2.1.3. Fitoextracción

La fitoextracción también denominado fitoacumulación, fitoabsorción o fitosequestración (Tabla 3) (Mahar *et al.*, 2016; Paredes, 2017), en el cual las plantas son capaces de acumular metales pesados (Martínez & Vargas, 2017), es así como la fitoextracción logra concentrar contaminantes del suelo en mayor proporción que el propio suelo (Ghaderian & Ghotbi, 2012). Además, dichas plantas pueden cosecharse, descartarse o extraerse (Leyval *et al.*, 2002). Asimismo, el potencial de tolerancia de metal de una planta depende de mecanismos como la unión de metal a la pared celular, el transporte activo del ion metálico en las vacuolas, la quelación de iones metálicos con proteínas (González-Mendoza & Zapata-Pérez, 2008) y péptidos y la formación de complejos (Memon & Schreoder, 2009). En fitoextracción y fitominería, los metales tóxicos acumulados en los tejidos vegetales se cosechan para su recuperación y reutilización (Gratão *et al.*, 2005).

Tabla 3. *Técnicas de fitorremediación para la contaminación de suelos con metales pesados.*

Técnica de remediación	Definición	Metales a remediar	Mecanismo de remediación	Ventajas	Desventajas	Limitaciones
Fitoextracción	Absorción de metales por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos (Weyens <i>et al.</i> , 2009).	Zn, Cd, Pb, Ni, Cu, Cr, Hg (Delgadillo <i>et al.</i> , 2011).	Hiperacumulación	No contamina, preserva el ecosistema y es económica (Cristaldi <i>et al.</i> , 2017). Limpieza de suelos (Mahar <i>et al.</i> , 2016).	No elimina el metal del medio (Llugany <i>et al.</i> , 2007). Los metales son retenidos dentro de las raíces (Cristaldi <i>et al.</i> , 2017)	Profundidad de la raíz de las plantas y disponibilidad de metales en el suelo (Mahar <i>et al.</i> , 2016). Fitotoxicidad de la planta (Weyens <i>et al.</i> , 2009) Crecimiento lento (Lupino <i>et al.</i> , 2005).
Fitoestabilización	Acumular metal pesado en las plantas y en la zona de la raíz (Oyuela <i>et al.</i> , 2017).	Pb, As, Cd, Cr, Cu, Zn (Liu <i>et al.</i> , 2018).	Complejación	Fácil de aplicar y estéticamente agradable (Delgadillo-López <i>et al.</i> , 2011), bajo costo y mejora la restauración (Lupino <i>et al.</i> , 2005)	La eliminación del contaminante en el suelo no se da por completo hasta que se erradique la planta (Peralta-Pérez & Vole-Sepúlveda, 2011).	Suelo y vegetación requieren mantenimiento a largo plazo para evitar la lixiviación y descargas de contaminantes (Oyuela <i>et al.</i> , 2017). El suelo requiere fertilización o uso de enmiendas (Lupino <i>et al.</i> , 2005).
Fitovolatilización	Absorción de contaminantes por la planta, su conversión a la forma volátil y liberación a la atmósfera (Mahar <i>et al.</i> , 2016).	Se, Hg (Wang <i>et al.</i> , 2012).	Volatilización a través de las hojas	El contaminante se puede transformar en una sustancia menos tóxica (Cristaldi <i>et al.</i> , 2017).	El contaminante puede ser liberado a la atmósfera altamente tóxico (Muñoz <i>et al.</i> , 2010).	El proceso a veces no degrada el contaminante en sustancias menos tóxicas (Mahar <i>et al.</i> , 2016). Bajos niveles de metabolismo en el tejido vegetal (Lupino <i>et al.</i> , 2005).

3. Familias de plantas remediadoras

Los fitolitos, cuerpos de sílice, presentes en algunas especies de flora (Monsalve, 2000), como es el caso en especies de la familia Poaceae donde se encuentra en grandes cantidades y se ha demostrado que tienen papeles antiherbivianos que alivian el estrés abiótico y biótico, como el déficit hídrico, temperaturas extremas, toxicidad por metales pesados y salinidad (Katz *et al.*, 2014; Contreras *et al.*, 2016). Por otro lado, las especies de la familia Fabaceae (leguminosas) son plantas capaces de acumular Cr (Khalid *et al.*, 2017), además de ser altamente productoras de biomasa (Martínez & Leyva, 2014) y fitoestabilizadoras, las cuales se pueden aprovechar como forraje y cubierta, con el cual se puede recuperar sitios contaminados (Guefrachi *et al.*, 2013).

La familia Brassicaceae (Cruciferae) (Sánchez *et al.*, 2009; Diego & Calderón, 2004), es la más relevante de todas estas familias, con 87 especies clasificadas como hiperacumuladoras de metales (Martínez-Alcalá *et al.*, 2016). Asimismo, esta familia se ha identificado especialmente como especie acumuladora de cromo (Khalid *et al.*, 2017), así como también mejora en su eficiencia de remediación de metales pesados con la adición de enmiendas orgánicas (Pérez, 2011) y representar un buen factor de translocación de sus raíces para asimilar el metal del suelo (Manchego-Perdomo, 2017). Además, algunas de estas especies como *Brassica nigra* tienen gran potencial de adaptabilidad a diferentes condiciones de clima (López, 2014)

3.1. Aplicaciones de la Familia Brassicaceae

Las especies del género *Brassica* constituyen plantas prometedoras para la fitoextracción de metales pesados (Weerakoon & Somaratne, 2009), demostrando que

son capaces de absorber y acumular mayor concentración de contaminantes (Veer *et al.*, 2015).

La especie *Brassica juncea*, conocida como mostaza india (Sánchez *et al.*, 2009), puede adaptarse a diferentes climas acumulando cantidades significativas de metales (Kumar *et al.*, 1995) y tolerarlos (Ebbs & Kochian, 1997), presentando un desarrollo de sistema radicular positivo y acumulación de Zn, Cu, Cd, Ni y Pb (Ebbs & Kochian, 1997; Peralta & Volke-Sepúlveda, 2011; Nanda *et al.*, 1995; Graziani *et al.*, 2017) y germinar con una buena elongación radicular en jales en concentraciones con alta toxicidad de metales (Camarillo-Ravelo *et al.*, 2014); logrando acumular en promedio 106 mg.Kg⁻¹ de zinc y 9,27 mg.Kg⁻¹ de plomo; asimismo, la aplicación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular triplican esos resultados (Cárdenas, 2010), mientras que la adición de compost de estiércol mejora las propiedades químicas, estabiliza los metales y favorece el crecimiento de esta planta (Pérez, 2011; Ferreyroa, 2016).

Otra especie dentro del mismo género, *Brassica napus*, también conocida como canola, es una planta de cultivo con flores de color amarillo brillante (Sánchez *et al.*, 2009), constituyéndose como fuente de biomasa para la producción de energía (Herrera *et al.*, 2011). Esta especie acumula en promedio 56,2 mg.Kg⁻¹ de Pb, 330,70 mg.Kg⁻¹ de zinc y 14,9 mg.Kg⁻¹ de cadmio; sin embargo, la aplicación de enmiendas orgánicas mejora la formación de biomasa en las raíces siendo 31 veces mayor que la masa del suelo (Lacalle *et al.*, 2018) y aumenta la concentración de acumulación de cromo y lindano (Montero, 2017).

Por otro lado, la adición de meliorates orgánicos ayuda a que esta especie disminuya el contenido de los metales pesados en las semillas y en su aceite, logrando aprovechar

este aceite y reducir el costo de la fitorremediación (Angelova *et al.*, 2017); así también, la biomasa de *Brassica napus* es eficiente para la conversión en azúcar y su uso en producción de bioetanol (Sudha *et al.*, 2016); además, la aplicación de nanopartículas metálicas es una práctica prometedora de remediación; sin embargo, su efectividad y ecotoxicidad deben investigarse más a fondo (Lacalle *et al.*, 2018).

Otra especie del género *Brassica* es *Brassica rapa*, hierba de tallos cilíndricos generalmente glaucos, en algunas partes del mundo se encuentra como especie invasora (Monsalve & Cano, 2003), esta especie logra acumular hasta 758,8 mg.Kg⁻¹ de plomo, 550 mg.Kg⁻¹ de zinc, 4,9 mg.Kg⁻¹ de cadmio y 108.23 mg.Kg⁻¹ de arsénico (Jara-Peña *et al.*, 2014; Delgadillo-Ruiz *et al.*, 2014). Por otro lado, la variedad holandesa es más eficiente para concentrar metales como calcio, magnesio y sodio a comparación de la variedad egipcia, ambas pertenecen a la especie *Brassica rapa* (Ibrahim & Adila, 2013).

Brassica oleracea es considerada como una planta adecuada para evaluar la toxicidad (Casierra-Posada *et al.*, 2010) acumulando 0.304 mg.Kg⁻¹ de mercurio en sus raíces, 127,75 mg.Kg⁻¹ de plomo y 180 mg.Kg⁻¹ de cadmio en la parte superior (Casierra-Posada *et al.*, 2010; Hoyos-Cerna & Guerra-Padilla, 2014; Manchego-Perdomo, 2017), debido a que la parte aérea está muy relacionada con las concentraciones del metal en el suelo (Casierra-Posada *et al.*, 2010).

Brassica nigra es una planta herbácea anual que crece por dispersión de las semillas (López, 2014) capaz de adaptarse a la tolerancia de ciertas cantidades significativas de metales pesados (Veer *et al.*, 2015), cultivándose con éxito en regiones de bajo o moderado nivel de contaminación con metales (Angelova & Inanov, 2009). Por ejemplo,

en Colombia esta especie se encuentra adaptada considerándose como planta con un gran potencial y eficacia para la fitorremediación (López, 2014; Hansda & Kumar, 2016), logrando acumular hasta 111 mg.Kg⁻¹ de mercurio y 77 mg.Kg⁻¹ de mercurio en plántulas germinadas y trasplantadas; 15 mg.Kg⁻¹ de cadmio y 20 mg.Kg⁻¹ de cadmio en plántulas germinadas y trasplantadas (Arenas & Hernández, 2012).

CONCLUSIONES

La contaminación de suelos por metales pesados con el transcurso de los años está contaminando más extensiones de suelos que incluyen áreas de cultivo a nivel mundial provocando impactos al ecosistema, especialmente en zonas adyacentes a las minas e industrias. Ante ello, la fitorremediación se ha desarrollado como una excelente herramienta para remediar los suelos, las especies del género Brassica poseen un alto potencial para la extracción de metales del suelo con la ventaja de adaptarse a los diferentes climas demostrando eficacia y viabilidad económica para realizar procesos de descontaminación; asimismo, mediante la adición de enmiendas y otras prácticas agrícolas se observan mejores beneficios como la mayor producción de biomasa, aprovechamiento en forma de bioenergía. Por otro lado, se espera que las especies de plantas hiperacumuladoras con baja producción de biomasa mejoren con la adición de otras enmiendas y desarrollo de la ingeniería genética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A. 2015. Enhancing agents for phytoremediation of soil contaminated by cyanophos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 117, 124–131.
- Amaya, A.; Lucero, M.; Jiménez, M.; Islas, M.; Cano, C. & Roa, G. 2015. Fitorremediación de contaminantes orgánicos. *Avances en ciencias del agua*, 477-493.

- Angelova, V. & Ivanov, K. 2009. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in black mustard (*Brassica nigra* Koch). *Environmental Monitoring and Assessment*, 153, 449-459.
- Angelova, V. R.; Ivanova, R. I.; Todorov, J. M. & Ivanov, K. I. 2017. Potential of rapeseed (*Brassica napus* L.) for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 18, 468–478.
- Anjum, N. A.; Umar, S. & Iqbal, M. 2014. Assessment of cadmium accumulation, toxicity, and tolerance in Brassicaceae and Fabaceae plants-implications for phytoremediation, *Environ Sci Pollut Res*, 21, 10286-93.
- Arenas, S. & Hernández, S. 2012. Fitotoxicidad del cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) en la especie *Brassica nigra*. *Ing Ambiental*, Universidad de Medellín, Colombia.
- Avelino, C. G. 2013. Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en Villa de Pasco. Maestría en Investigación científica y tecnológica.
- Baker, A. & Brooks, R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metal elements. *Biorecovery*, 1, 81-126.
- Baker, A. J.; McGrath, S. P.; Reeves, R. D.; Smith J.A. 2000. Plantas hiperacumuladoras de metal: una revisión de la ecología y la fisiología de un recurso biológico para la fitorremediación de suelos contaminados con metales. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*, 85 – 107.

- Batista, R. & Sánchez, A. (2009). Fitorremediación de metales pesados y microorganismos. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 16, 1-6.
- Bauidh, K.; Singh, K.; Singh, B. & Singh R. 2015. *Ricinus communis*: A robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil. *Ecological Engineering*, 84, 640–652.
- Beltrán- Pineda, M. E. & Gómez-Rodríguez, A. M. 2016. Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg) mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión, *Revistas Universidad Militar Nueva Granada*, 2, 172-197.
- Bernard, F.; Brulle, F.; Dumez, S.; Lemiere, S.; Platel, A.; Nesslany, F.; Cuny, D.; Deran, A. & Vandebulcke, F. 2015. Antioxidant responses of Annelids, Brassicaceae and Fabaceae to pollutants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 114, 273–303.
- Cabrera, F. 2005. Estabilización de suelos contaminados. El caso de Aznalcóllar. *Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología- CSIC Sevilla*, 219- 239.
- Camarillo-Ravelo, D.; Barajas-Aceves M. & Rodríguez-Vázquez, R. 2014. Evaluación de la fitotoxicidad de jales mineros en cuatro especies empleadas como bioindicadoras de metales pesados. *Revista Int. Contam. Ambie*, 31, 133-143.
- Cárdenas, I. 2010. Efecto de la aplicación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular en la biodisponibilidad de Pb y Zn en un sistema usando *Brassica juncea*. Maestría

en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Carpena, R.O. & Pilar, M. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas* 16, 1-3.

Casierra-Posada, F.; Gonzáles. L. & Ulrichs C. 2010. Crecimiento de plantas de brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *Itálica*) afectadas por exceso de zinc. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4,163-174.

Chaney, R. L. & Baklanov I. A. 2017. Chapter Five - Phytoremediation and Phytomining: Status and Promise. *Advances in Botanical Research*, 189-221.

Chaney, R.; Angle, J.; Leigh, C.; Peters, C.; Tapper, R. & Sparks, D. 2007. Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. *Journal of Environmental Quality* 36(5), 1429-43.

Chan-Quijano, J. G.; Jarquín-Sánchez, A.; Ochoa-Gaona, S.; Martínez-Zurimendi, P.; López-Jiménez, L. N. & Lázaro-Vázquez, A. 2015. Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Chavez, L. 2014. Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo. Universidad Nacional Agraria La Molina. *Ing Ambiental*.

Cherian, S. & Oliveira, M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39(24), 9377-9390.

China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED). 2015. Special Policy Study on Soil Pollution Management. China Council for International Cooperation on Environment and Development.

- Clarkson, T. 1993. Molecular and ionic mimicry of toxic metals. *Ann. Rev Pharmacol. Toxicol*, 32, 545-571.
- Contreras, S. A.; Zucol, A. F. & Lutz, A. S. 2016. Revisión de las asociaciones fitolíticas de especies de Panicoideae (Poaceae) del Chaco oriental argentino. *Agraria*, 9, 93-108.
- CRC CARE (2014). Contaminated Sites Law & Policy Directory.
- Cristaldi, A.; Oliveri, G.; Hea, E.; Zuccarello, P.; Grasso, A. & Ferrante, M. 2017. Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*. 8, 309-326.
- Cubillos, J.; Pulgarin, P.; Gutiérrez, J. & Paredes, D. 2014. Phytoremediation of Water and Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons. *Ingeniería y Competitividad*, 16, (1), 131-146.
- Cunningham, S.; Berti W.R. & Huang, J.W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*, 13, 393-397.
- Delgadillo-López, A.; González-Ramírez, C.; Prieto-García, F.; Villagómez-Ibarra, J. & Acevedo-Sandoval, O. 2011. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 597- 612.
- Delgadillo-Ruiz, L.; Gallegos-Flores, P.; Román-García, F.; Huerta-García, J. & Esparza-Ibarra, E. 2014. Hiperacumulación inducida de oro, plata y metales pesados en Brassica rapa cultivada en desechos de mina. *Tlamati*, 5, 36-42.
- Díaz, W. 2016. Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú. *Revista de Investigación UNMSM*, 19, 103-110.

- Diego, N. & Calderón, G. 2004. Un nuevo género de Cruciferae (Brassicaceae) del estado de Guerrero, México. *Acta Botanica Mexicana*, 68, 73-79.
- Diez, J. 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas, 23-29.
- Ebbs S. & Kochian L. 1997. Toxicity of zinc and copper to Brassica species: implications for phytoremediation. *Journal of Environmental Quality*, 26(3), 776–81.
- EEA (European Environment Agency). 2014. Progress in management of contaminated sites. European Environment Agency.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico.
- Farooq, M. A.; Basharat, A.; Gill, R. A.; Islam, F.; Cui, P. & Zhou, W. 2016. Chapter 2 – Breeding Oil Crops for Sustainable Production: Heavy Metal Tolerance. *Breeding Oilseed Crops for Sustainable Production. Opportunities and Constraints*, 19–31.
- Ferreyroa, G. 2016. Retención, biodisponibilidad y remediación de Pb en suelos: efectos de la interacción suelo-planta (*Brassica napus*) y bioacumulación, Doctorado en el área de Ciencias Sociales. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Galán, E. & Romero, A. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*. *Macla*, 10, 48-60.

- Ghaderian, S. M. & Ghotbi, A. A. 2012. Accumulation of copper and other heavy metals by plants growing on Sarcheshmeh copper mining area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 1 (23), 25-32.
- Gomes, M. A.; Hauser-Davia, R. A.; Nunes, A. & Pierre, A. 2016. Metal phytoremediation: General strategies, genetically modified plants and applications in metal nanoparticle contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134(1), 133-147.
- González, A.; Beltrán, M.; Ayala, I.; Vaca, M. & Vázquez A. 2012. Contaminación por metales pesados en un suelo urbano industrial y en la vegetación del sitio. *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, 5, 1-10.
- González-Chávez, M. 2005. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamericana*, 23:1, 29-37.
- González–Mendoza, D & Zapata–Pérez, O. 2008. Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 82 ,53-61.
- Gratão, Priscila L.; Prasad, M.; Cardoso, P.; Lea, P. & Azevedo, R. 2005. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 53-64.

- Graziani, N.; Salazar, J.; Pignata, M. & Rodríguez, J. 2015. Assessment of the root system of *Brassica juncea* (L.) Czern. and *Bidens pilosa* L. exposed to lead polluted soils using rhizobox systems. *International Journal of Phytoremediation*.
- Guefrachi, I.; Rejili, M.; Mahdhi, M. & Marte, M. 2013. Assessing genotypic diversity and symbiotic efficiency of five rhizobial legume interactions under cadmium stress for soil phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 15 (10), 938-951.
- Guerrero, M. & Pineda, V. 2016. Contaminación del suelo en la zona minera de rasgatá bajo (tausa). Modelo conceptual. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26, 57-74.
- Hansda, A. & Kumar, V. 2016. Phytoremediation of Copper-Contaminated Soil Using *Helianthus annuus*, *Brassica nigra*, and *Lycopersicon esculentum* Mill.: A Pot Scale Study. *Environmental Quality Management*, 25(4).
- Herrera, I.; Lago, C.; Lechón, Y.; Sáes, R. 2011. Análisis del ciclo de vida de cultivos energéticos en España. *Brassica carinata* y *Brassica napus* como fuente de biomasa para calor y electricidad. Centro de Investigaciones energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
- Hoyos-Cerna, M. & Guerra-Padilla, A. 2014. Bioacumulación de plomo y cadmio en *Brassica oleracea* subsp. *Capitata* (L.) Metzg. Y *Raphanus sativus* L. *Sciéndo*. *Ciencia para el desarrollo*.
- Ibáñez, J. 2015. Contaminación y Salinización de los Suelos del Mundo y de Europa (GSF). *BLOGS Madrid*.

- Ibrahim, A. & Adila E. 2013. Heavy metal and element profiling of Brassica rapa. Verbr. Lebensm, 8, 201–204.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2007. Tecnologías de remediación, Delegación Coyoacán, Ciudad de México.
- INERCO Perú. 2018. Suelos Contaminados y Aguas Subterráneas.
- Jara-Peña, E.; Gómez, J.; Montoya, H.; Chanco, M.; Mariano, M. & Cano, N. 2014. Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. Revista peruana de biología, 21: 145 – 154.
- Katz, O.; Lev-Yadun, S. & Bar, P. 2014. Do phytoliths play an antiherbivory role in southwest Asian Asteraceae species and to what extent? Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 209 (7), 349-358.
- Kavamura V. & Esposito, E., 2010. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. Biotechnol, 28(1), 61–69.
- Khalid, S.; Shahid, M.; Khan, N.; Murtaza, B.; Bibi, I. & Dumat, C. 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. Journal of Geochemical Exploration, 182, 247-268.
- Kidd, P. S.; Becerra, C.; García, M. & Monterroso, C. 2007. Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género Alyssum L. Ecosistemas, 16 (2), 26-43.
- Kumar, N.; Dushenkov, V.; Motto, H. & Raskin, I. 1995. Phytoextraction. The use of Plants to remove Heavy Metals from soils, Environ. Sci. Technol., 29 (5), 1232-1238.

- Lacalle, R.; Gómez-Sagasti, M.; Artetxe, U.; Garbisu, C. & Becerril, J. 2018. Effectiveness and ecotoxicity of zero-valent iron nanoparticles during rhizoremediation of soil contaminated with Zn, Cu, Cd and diésel. *Data in Brief*, 17, 47–56.
- Lasat, M. 2000. Phytoextraction of metals from contaminated soils. A review of plant/soil metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *Journal of Hazardous Substances Research*, 2, 1-25.
- Lasat, M. 2002. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, 31(1), 109-20.
- León, J. 2017. Una mirada a la fitorremediación en Latinoamérica. Especialización en Biotecnología Agraria. Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD.
- Leyval, C.; Joner, E.; Del Val, C. & Haselwandter, K. 2002. Potential of arbuscular mycorrhizal fungi for bioremediation. *Mycorrhizal Technology in Agriculture*, 175-186.
- Liu, L.; Li, W.; Song, W. y Guo M. 2018. Remediation techniques for heavy metal contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206–219.
- Llugany, M.; Tolrá, R.; Poschnrieder, C. & Barceló J. 2007. Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre?. *Revista Ecosistemas*, 16,2.
- Londoño-Franco, L.; Londoño-Muñoz, P. & Muñoz-García, F. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14, 145-153.

- López, E. I. 2014. Alternativas de disposición para la fitorremediación de suelos contaminados por actividades mineras. Especialista en Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos. Corporación Universitaria Lasallista-Facultad de Ingenierías. Caldas (Antioquia).
- Lupino, P.; Majeti, P.; Felipe, P. & Antunez, R. 2005. Phytoremediation: Green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 53-64.
- Mahar, A.; Wang, P.; Alí, A.; Kumar, M.; Hussain, A.; Wang, Q.; Li, R. & Zhang, Z. 2016. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111-121.
- Manahan, S. E. 2006. Introducción a la química ambiental. Desechos y contaminantes en el suelo, 334-338.
- Manchego-Perdomo, W.; Marrugo-Negrete, J. & Durango-Hernández, J. 2017. El efecto de la aplicación de enmiendas en la transferencia de mercurio (Hg) en *Basella alba* y *Brassica oleracea* cultivadas en suelos contaminados de la Mojana. *Memorias III Seminario Internacional de Ciencias Ambientales SUE-Caribe*, 87-89.
- Marrero-Coto, J.; Amores-Sánchez, I. & Coto-Pérez, O. 2012. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46, 52-61.
- Martínez, A. & Leyva, A. 2014. La biomasa de los cultivos en el ecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35, 11-20.

- Martínez, L. & Vargas, Y. 2017. Evaluación de la contaminación en el suelo por plomo y cromo y planteamiento de alternativa de remediación en la Represa del Muña, Municipio de Sibaté-Cundinamarca. Ing. Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle, Colombia.
- Martínez, Z. & González, M. 2017. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Colombia. Revista Temas Agrarios ,22.
- Martínez-Alcalá, I.; Pilar Bernal M.; De la fuente, C.; Gondar, D. & Clemente, R. 2016. Changes in the heavy metal solubility of two contaminated soils after heavy metals phytoextraction with *Noccea caerulescens*. Ecological Engineering, 89, 56-63.
- Memon, A. & Schreoder, P. 2009. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. Environmental Science and Pollution Research, 16(2), 162-75.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2017. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. El Peruano, 12-15.
- MINSA (Ministerio de Salud). 2016. Casos sospechosos notificados por exposición a metales pesados y metaloides por departamentos, Perú 2016. Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades-CDC/MINSA.
- Miranda-Martínez, M.; Delgadillo-Martínez, J.; Alarcon, A. & Ferrera-Cerrato, R. 2007. Degradación de fenantreno por microorganismos en la rizosfera del pasto alemán. Terra Latinoamericana, 25, 1.
- Monsalve, C. & Cano, A. 2003. La familia Brassicaceae en la provincia de Huaylas, Áncash. Revista Peruana de Biología, 10,1.

- Monsalve, C. 2000. Catálogo preliminar de fitolitos producidos por algunas plantas asociadas a las actividades humanas en el suroeste de Antioquia, Colombia. *Crónica Forestal y del Medio Ambiente*, 15, 1.
- Montero, M. 2017. Biorremediación de suelos contaminados con Cr (VI) y lindano. *Biología*. Universidad del País Vasco.
- Muñoz-Castellanos, L. N.; Nevárez-Morillón, G. V.; Ballinas-Casarrubias, M. L. & Peralta-Pérez M. R. 2010. Fitorremediación como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados. *Toctli. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Biomédica*, 1(3).
- Nanda, P. B.; Viatcheslav, D.; Harry, M. & Ilya, R. 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.*, 29 (5), 1232–1238.
- Navarro-Aviñó, J.; Aguilar, A. & López-Moya, J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16, 10-25.
- Nolasco, S. 2011. Impactos de la Minería Metálica en Centroamérica. Centro de Investigación sobre Inversión y Comercio (CEICOM).
- Noquez-Inesta, A.; López-Sánchez, A. S.; Carrillo-González, R. & González-Chávez, M. C. 2017. Uso de leguminosas (Fabaceae) en fitorremediación. *Agroproductividad*, 10 (4), 57-62.
- Oyuela, M.; Fernández, W. & Gutiérrez, M. 2017 Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands - A review. *Chemosphere*. 168(1), 1230-124.

- Paredes, K. I. 2017. Fitoestabilización de metales pesados en sedimentos costeros asistida por bacterias rizosféricas. Tesis Doctoral.
- Parejo, C. & Parejo, J. 2012. La minería metálica en el mundo. El caso particular de Extremadura. Universidad de Extremadura Escuela de Ingenierías Agrarias.
- Parent, X. 2013. Le Traitement des sols contaminés. Travaux mai.
- Peralta Pérez & Volke-Sepúlveda, 2011. La defensa antioxidante en las plantas: una herramienta clave para la fitorremediación, Revista Mexicana de Ingeniería Química, 11, 75-88.
- Peralta-Pérez, M. & Vole-Sepúlveda, T. L. 2011. La defensa antioxidante en las plantas: Una herramienta clave para la fitorremediación. R Revista mexicana de ingeniería química, 11 (1), 75-88.
- Pérez, J. 2011. Biodisponibilidad de metales pesados en suelos mineros contaminados enmendados con materiales orgánicos. Revista 100cias@uned,4,31-34.
- Puga S., Sosa M, Lebgue T., Quintana C., y Campos A. 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. Ecología Aplicada, 5(1-2), 149-155.
- Rascio, N. & Navari-Izzo, F. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? Plant Science, 2, 169-181.
- Rodríguez-Eugenio, N.; McLaughlin, M. & Pennock, D. 2018. Soil Pollution: a hidden reality. Rome-FAO, 142.

- Romero, K. 2009. Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), 45-46.
- Rosique, M. 2016. Gestión de los residuos y suelos. Contaminados provenientes de la Minería metálica: Aspectos técnicos, problemas ambientales y Marco Normativo. Doctorado en Ciencias Sociales y Jurídicas. Universidad de Cartagena.
- Sánchez, M. S.; Barahona, R.; Arroyave, C.; Bedoya, A. 2009. Informe final del grupo de flora, fauna y fitorremediación. Universidad Nacional de Colombia – Medellín.
- Sarma, H. 2011. Metal Hyperaccumulation in Plnts: A review Focusing on Phytoremediation Technology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4, 118-138.
- Shayler, H.; McBride, M. & Harrison E. 2009. Sources and Impacts of Contaminants in Soils. Cornell Waste Management Institute. Department of Crop & Soil Sciences, 1.
- Silva, S. & Correo, J. 2009. Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la Normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12 (23), 13-34.
- Sudha, S.; Selvaraj, C.; Li, J.; Singh, R.; Zhao, X.; Kim, D.; Young, J.; Chang, Y. & Jung-Kul, Lee. 2016. Phytoremediation of metal-contaminated soils by the hyperaccumulator canola (*Brassica napus* L.) and the use of its biomass for etanol production. *Fuel*, 183,107–114.

- Tafesse, S. 2014. Heavy Metals in Contaminated Soil: Sources & Washing through Chemical Extractants. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 10, 54-60.
- Trejo, J.A. & Volke, T. 2002. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología.
- Trujillo-González, J. & Torres-Mora, M. 2015. Contamination levels in three sectors of Villavicencio using the geoaccumulation (Igeo) index. *Orinoquia*, 19 (1), 109-117.
- Van, L.; Meers, E.; Guisson, R.; Ruttens, A.; Elst, K.; Tack, F.; Vangronsveld, J.; Diels, L.; & Dejonghe, W. 2007. Phytoremediation for heavy metal-contaminated soils combined with bioenergy production, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 15(4), 227-236.
- Vangronsveld, J. & Cunningham, S. 1998. *Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation*. Environmental intelligence unit. Berlin, Springer.
- Veer, U.; Abisheck. A.; Bhaskar, M.; Tandan, N.; Ghazy, N. & Pal, N. 2015. Phyto-extraction of heavy metals and biochemical changes with *Brassica nigra* L. grown in rayon grade paper mill effluent irrigated soil. *Bioinformation*, 11(3), 138-144.
- Wang, J.; Xu, C.; Feng, X.; Xing, Y.; W. Anderson & Shang, L. 2012. Remediation of mercury contaminated sites - a review. *J Hazard Mater*, 221-222(1), 18.
- Weerakoon, S. R. & Somaratne, S. 2009. Phytoextractive potential among mustard (*Brassica juncea*) genotypes in Sri Lanka. *Cey. J. Sci. (Bio. Sci.)*, 38 (2), 85-93.

Weyens, N.; Van, D.; Taghavi, S. & Vangronsveld, J. 2009. Phytoremediation: plant-endophyte partnerships take the challenge. *Current Opinion in Biotechnology*, 20, 248–254.

Ying M.; Rjkumar, M., Chang, Z. & Freitaa, H. 2016. Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 174, 14-25.

Zafra, C.; Peña, N. & Álvarez, S. 2013. Contaminación por metales pesados en los sedimentos acumulados sobre el corredor vial Bogotá – Soacha. *Revista Tecnura*, 17.