	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
		PAGINA: 1 de 8

16.

FECHA	Viernes, 11 de diciembre de 2020
--------------	----------------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad


UNIDAD REGIONAL	Seccional Girardot
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Ambiental

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Lozada Ayala	Angie Carolina	1005773811

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
 www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
		PAGINA: 2 de 8

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Suarez Pulido	Dalia Xiomara

TÍTULO DEL DOCUMENTO
FITORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN EL RECURSO SUELO EN COLOMBIA

SUBTÍTULO (Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía
Ingeniería Ambiental

AÑO DE EDICION DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÁGINAS
03/12/2020	79

DESCRPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
ESPAÑOL	INGLÉS
1. Fitotecnologías	Phytotechnologies
2. Metales pesados	Heavy metals
3. Especies vegetales	Plant species
4. Degradación	Degradation
5. Técnicas fisicoquímicas	Physicochemical techniques
6. Suelos contaminados	Contaminated soils

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 3 de 8

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS
(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

Resumen

La Fitorremediación es un tratamiento *in situ* o *ex situ* que consiste en aprovechar el potencial de especies vegetales capaces de absorber, acumular, volatilizar, estabilizar o metabolizar diversos contaminantes, en este caso, metales pesados presentes en el Recurso Suelo que en altas concentraciones pueden provocar efectos adversos a los componentes bióticos y abióticos. El objetivo principal de esta revisión bibliográfica es presentar un panorama de las ventajas que ofrecen las fitotecnologías como potencial alternativa ante la problemática de la contaminación de suelos con metales pesados en Colombia, tomando en cuenta la importancia de las especies hiperacumuladoras, y hacer una comparación frente a los métodos fisicoquímicos que se utilizan en la actualidad. La información se recopiló en bases de datos como ScienceDirect, Scopus, SciELO, Dialnet, Redalyc y Google Scholar. Se tuvieron en cuenta trabajos de grado, maestrías y repositorios de diferentes universidades a nivel global y nacional.

Abstract

Phytoremediation is an *in situ* or *ex situ* treatment that consists of taking advantage of the potential of plant species capable of absorbing, accumulating, volatilizing, stabilizing or metabolizing various pollutants, in this case, heavy metals present in the Soil Resource that in high concentrations can cause adverse effects to biotic and abiotic components. The main objective of this bibliographic review is to present an overview of the advantages offered by phytotechnologies as a potential alternative to the problem of contamination of soil with heavy metals in Colombia, taking into account the importance of hyperaccumulative species, and to make a comparison against to the physicochemical methods that are used today. The information was collected in databases such as ScienceDirect, Scopus, SciELO, Dialnet, Redalyc, and Google Scholar. Degree works, masters and repositories from different universities at a global and national level were taken into account.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 4 de 8

AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 5 de 8

autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI ___ NO _X_.

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 6 de 8

patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.


e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
		PAGINA: 7 de 8



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



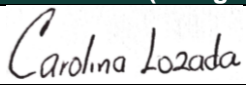
Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. Fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el recurso suelo en colombia.pdf	Texto
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafa)
Lozada Ayala Angie Carolina	

21.1-51.20

**FITORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA LA REMOCIÓN DE
METALES PESADOS EN EL RECURSO SUELO EN COLOMBIA**

Angie Carolina Lozada Ayala

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Ingeniería Ambiental
Girardot
2020

**Fitorremediación como alternativa para la remoción de Metales Pesados en el recurso
Suelo en Colombia**

Angie Carolina Lozada Ayala

Trabajo de grado para recibir el título de Ingeniera Ambiental

Directora

Ms.c Dalia Xiomara Suarez Pulido

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Ingeniería Ambiental

Girardot

2020

Tabla de contenidos

Resumen.....	9
Introducción	10
Planteamiento del Problema.....	13
Justificación.....	16
Objetivos	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos.....	18
Metodología	19
Capítulo I. Metales Pesados como Agentes Contaminantes de la Matriz Suelo.....	21
Fuentes de Metales Pesados en Suelos.....	21
Comportamiento de los Metales Pesados en la Matriz Suelo	24
Capitulo II. Generalidades de la Fitorremediación	28
Tecnologías de la Fitorremediación.....	30
Estrategias de la Vegetación para Procesos de Fitorremediación	35
Especies Usadas en Procesos de Fitorremediación.....	38
Tratamientos Físico-químicos Usados para la Enmienda de Suelos con Metales Pesados .	46
Conclusiones	54
Referencias.....	56

Apéndice. Mapa de Vertimientos Estimados de Hg por Departamentos en Colombia	79
------------------------------------------------------------------------------------	----

Lista de tablas

Tabla 1 Principales Actividades Industriales que Generan Metales Pesados en el Medio	21
Tabla 2 Nivel de Toxicidad y Aplicaciones Industriales del Hg, As, Pb, y Cd	23
Tabla 3 Procesos de Fitorremediación, Mecanismos de Remoción de Contaminantes y Criterios de Selección de Especies.....	34
Tabla 4 Eficiencias de Remoción de Metales Pesados de Diferentes Especies Fitorremediadoras	39
Tabla 5 Principales Técnicas para la Recuperación de Suelos Contaminados con Metales Pesados.....	47

Lista de figuras

Figura 1 Etapas de la Planificación.....	19
Figura 2 Potenciales Aplicaciones de las Plantas para el Control de Contaminantes.....	28
Figura 3 Matriz DOFA de la Fitorremediación	29
Figura 4 Representación Esquemática de las Estrategias de la Fitorremediación	31
Figura 5 Clasificación de las Plantas en Base a su Absorción Relativa y Potencial de Bioacumulación.....	36
Figura 6 Número de Artículos Publicados en los Últimos 20 Años	44
Figura 7 Artículos Publicados por Diferentes Países del Mundo	45
Figura 8 Publicaciones en Colombia sobre Fitorremediación en Scopus	45

Dedicatoria

A Dios quien ha sido mi principal fuente de motivación para culminar este trabajo monográfico.

A mi mamá Ana Yuney Ayala, a mi abuela Rosa Delia Ayala y a mis hermanas, ya que son ellas el motivo principal para cumplir con mi propósito de convertirme en una profesional integra en el área ambiental.

Agradecimientos

A la profesora Dalia Xiomara Suarez Pulido por acompañarme en este proceso, por su constante disposición, por compartir sus conocimientos y sus destacadas asesorías, que permitieron llevar a cabo este trabajo de forma exitosa, contribuyendo a mi formación como Profesional en Ingeniería Ambiental.

A mis amigas de la Universidad, quienes me acompañaron, apoyaron y me motivaron en cada momento para hacer posible este logro.

Resumen

La Fitorremediación es un tratamiento *in situ* o *ex situ* que consiste en aprovechar el potencial de especies vegetales capaces de absorber, acumular, volatilizar, estabilizar o metabolizar diversos contaminantes, en este caso, metales pesados presentes en el Recurso Suelo que en altas concentraciones pueden provocar efectos adversos a los componentes bióticos y abióticos. El objetivo principal de esta revisión bibliográfica es presentar un panorama de las ventajas que ofrecen las fitotecnologías como potencial alternativa ante la problemática de la contaminación de suelos con metales pesados en Colombia, tomando en cuenta la importancia de las especies hiperacumuladoras, y hacer una comparación frente a los métodos fisicoquímicos que se utilizan en la actualidad. La información se recopiló en bases de datos como ScienceDirect, Scopus, SciELO, Dialnet, Redalyc y Google Scholar. Se tuvieron en cuenta trabajos de grado, maestrías y repositorios de diferentes universidades a nivel global y nacional.

Palabras clave: Fitotecnologías, metales pesados, especies vegetales, degradación, técnicas fisicoquímicas, suelos contaminados.

Introducción

La interacción entre las esferas de desarrollo económico, tecnológico y medio ambiente ha provocado el aumento de acumulación de metales pesados en los suelos, debido a las actividades antrópicas. La minería, la industria metalúrgica, la agricultura, y los vehículos automotores corresponden a las principales fuentes de contaminación en cuanto aporte a metales pesados (Covarrubias y Peña, 2017). En este contexto, los metales pesados son contaminantes persistentes y biomagnificables, que han generado numerosos efectos negativos sobre la salud humana y los recursos bióticos y abióticos, lo que implica a su vez, una pérdida de calidad de vida y de biodiversidad (García et al., 2002). Actualmente, existen técnicas biotecnológicas que consisten en el uso de especies vegetales naturales o modificadas genéticamente, con el fin de degradar, absorber, volatilizar, transformar o eliminar compuestos peligrosos, ya sean de naturaleza orgánica e inorgánica, presentes en suelos contaminados, mediante procesos metabólicos; a esta estrategia se le denomina *Fitorremediación* (Mallick, 2003; De Oliveira, 2004; Audet y Charest, 2007).

En algunos países como México, la recuperación de suelos contaminados mediante métodos fisicoquímicos es rápida, pero, representan un alto costo económico. Estos tratamientos pueden realizarse *in situ* (en su lugar) o *ex situ* (transporte del suelo contaminado para ser tratado). De este modo, las técnicas biológicas, en este caso, la *Fitorremediación*, se considera como una estrategia que ofrece numerosas ventajas, entre ellas, minimizar la generación de impactos negativos en el lugar, su amplia aplicabilidad y bajo costo, la capacidad de dar soluciones *in situ*, convirtiéndola así, en una tecnología rentable y sostenible. Además, el resultado, una cobertura vegetal, es estéticamente agradable y más aceptable desde el punto de vista ambiental (Velásquez Arias, 2017).

En Colombia, específicamente en la Región del Caribe, se han registrado gran cantidad de plantas terrestres que tienen la capacidad de hiperacumular compuestos peligrosos, como los metales pesados. Allí se han encontrado aproximadamente 12 familias, 30 géneros y 157 especies que han demostrado altos porcentajes de eficiencia de remoción frente a este tipo de contaminantes. Las especies de los cultivos más conocidas son el Girasol (*Heliantus annuus*) y el maíz (*Sea mays*) (Marrero-Coto et al., 2012).

Por otro lado, algunas zonas del ecosistema Andino se han visto amenazadas por actividades como la minería, donde se depositan metales pesados, contaminando el suelo, representando así, un problema ambiental de gran preocupación. Sin embargo, Jara-Peña et al. (2014) emplearon las especies *Solanum nitidum*, *Brassica rapa L*, *Fuertesimalva echinata*, *Urtica urens L*, y *Lupinus ballianus*, pertenecientes al bosque alto andino, las cuales presentaron altos índices de tolerancia a los metales pesados, por lo que representan un gran potencial en procesos de fitorremediación.

La contaminación por metales pesados es evidente en diferentes zonas del país donde se practican actividades antrópicas como la minería, curtido, industria metalúrgica, aplicación de sustancias químicas como los pesticidas, cementeras, entre otros. Por ejemplo, en el municipio de Sibaté- Cundinamarca se ha registrado presencia de metales pesados en las colas del Embalse del Muña, ya que este cuerpo hídrico es receptor de gran cantidad de vertimientos por parte de empresas que no realizan un pre tratamiento a sus aguas residuales generadas antes de ser vertidas, además de ser alimentado por las aguas del río Bogotá (Incignares y Trujillo, 2015).

Es importante destacar que, a pesar de que la Fitorremediación ha tenido una gran aceptación como tecnología emergente, debido a sus cualidades, presenta limitaciones como el desconocimiento de toda la fisiología involucrada en el proceso o la identificación de las plantas

tolerantes al medio contaminado o al tipo de contaminante (González, 2010), lo que establece que aún el estudio de esta tecnología tiene un largo camino por recorrer, pues es de vital importancia transmitir a la comunidad conocimientos claros para su posible aplicación a gran escala y comercialización.

Dentro de este documento se hace una revisión del proceso de fitorremediación, los tipos que existen y las principales especies utilizadas para la remediación de suelos contaminados por metales pesados como el cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As) y mercurio (Hg), con la información encontrada en las bases de datos como ScienceDirect, Scopus, Scielo, Google Academico, Springer, y Dialnet, repositorios institucionales e informes técnicos correspondientes que brindan información clara, precisa y confiable.

Planteamiento del Problema

La contaminación de los recursos naturales es una situación tan ambigua como el hombre mismo y en la actualidad cada vez se ha intensificado más a raíz de la poca concientización del ser humano sin mediar o prever las necesidades de las generaciones futuras. Un recurso altamente afectado es el suelo, siendo este de suma importancia para la sociedad (seguridad alimentaria) y la naturaleza misma (servicios ecosistémicos) (Burbano-Orjuela, 2016). Sin embargo, estos dos aspectos mencionados anteriormente han sido contraproducentes o ha sido mal relacionado, debido a que, para su buen funcionamiento debe existir un equilibrio mutuo.

El aporte de contaminantes al suelo son producto de una variedad de industrias y actividades antropogénicas; según Bueno et al. (2018), las principales industrias que afectan considerablemente el recurso suelo son; la minería, al hacer uso de sustancias tóxicas tales como el mercurio y el arsénico principalmente; talleres mecánicos, los cuales aportan aceites, combustibles y algunos metales; e industrias de calzado de cuero, que participan en el aporte de metales pesados como el cromo, arsénico y diversos compuestos orgánicos que son potencialmente bioacumulables y biomagnificables. Por otro lado, según Silva y Correa (2009), la producción agrícola es otra de las actividades antrópicas que aportan contaminantes hacia el suelo, debido al uso intensivo de agroquímicos que ha traído como consecuencia el aumento de la biodisponibilidad de los ya mencionados metales como el plomo, arsénico, mercurio, cadmio, entre otros, al igual que el aporte de vertimiento de aguas contaminadas sin previo tratamiento

En Colombia, según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2012), el suelo del país es diverso y frágil, cuenta con 11 de los 12 órdenes de suelos en el mundo y los procesos de degradación resultantes de las actividades antropogénicas más relevantes son la contaminación, el sellamiento, la erosión, la pérdida de materia orgánica, la salinización, la compactación y la

desertificación problemas que se encuentran en mayor proporción en las regiones Caribe, Orinoquia y Andina percibiéndose también en la Amazonía y en el litoral Pacífico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

El informe del Estudio Nacional del Agua (ENA) del 2018 realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2019), presentó un estimativo de las cargas de materia Orgánica, nutrientes y sólidos durante el 2016, donde se incluyen mediciones de metales pesados en agua y sedimentos, provenientes del sector agrícola, industrial y minero, del uso de agroquímicos en la agricultura y del sacrificio de ganado; el informe arroja 15 estaciones de monitoreo con valores altos en las concentraciones de metales pesados presentes en sedimentos en zonas de desembocadura de ríos.

Los departamentos con mayor presencia de dichos contaminantes fueron Vaupés y el Amazonas encontrando muestras con concentraciones de Hg hasta de 0,094 mg/L, (siendo 0,001 el valor de referencia según Resolución 2115 de 2007), esto debido a que los municipios de Taraira y Tarapaca tienen una amplia tradición minera con predominio de socavones, además en el Cauca el níquel (Ni) presentó 23 mg/kg, aluminio (Al) en 8000 mg/kg, cobre (Cu) entre 9 y 84 mg/kg, hierro (Fe) de 16000 mg/kg y magnesio (Mg) de 787 mg/kg en muestras de Cali, siendo el Valle del Cauca uno de los departamentos más contaminados con metales pesados, entre otras muestras cabe resaltar los datos obtenidos en el departamento de Caldas con cadmio (Cd) entre 1 y 19 mg/kg y plomo (Pb) con 1409 mg/kg, Inírida en la Guanía con concentraciones de 0,69 mg/kg de Mg y por último Cundinamarca que sobresale con cromo (Cr) de 86,80 mg/kg en Bogotá derivados de la minería del carbón y de la industria manufacturera, (IDEAM, 2019).

Por otro lado, en cuanto a la contaminación por Hg en el país, para el ENA 2018 se estimó que para el año del estudio (2016), 183 toneladas de mercurio fueron vertidos al suelo y

agua en 154 municipios de 16 departamentos, producto de la extracción de oro y plata (IDEAM, 2019). Los departamentos con mayor porcentajes de contribución de Hg fueron Antioquia (41%), Chocó (24%), Nariño (15%), Bolívar (7%), y Caldas (4%) (ver apéndice); del total de toneladas vertidas, el 85%, corresponde a los vertimientos por beneficio de oro, y el 15% por beneficio de plata (Sistema de Información Minero Colombiano, 2018; IDEAM, 2019). Comparando con el ENA 2014, para el año 2012, se había estimado 205 toneladas de Hg vertidos (IDEAM 2015); lo cual indica que para el 2016 la reducción de Hg vertidos fue de solo 22 toneladas, es decir, representa un valor muy bajo, por lo que el avance para afrontar esta problemática aún está lejos de ser significativo. Dentro de los impactos que se generan producto de la extracción de minerales preciosos e hidrocarburos en el país, se encuentran la deforestación, la contaminación de fuentes hídricas y el aumento en el material particulado de la zona, además de la pérdida de hábitat (Martínez Sepúlveda y Casallas, 2018).

Es decir que uno de los rasgos significativos y propios de la sociedad moderna y del país es la progresiva emisión de sustancias contaminantes al ambiente y son las actividades mineras domésticas industriales y agropecuarias las que sobresalen en la contaminación del suelo aire y agua causando daños irreversibles en sus propiedades naturales y en los seres vivos. Si bien, la fitorremediación es una alternativa viable para afrontar dicha problemática, aún hace falta más investigación en el contexto nacional sobre el tema enmienda de suelos contaminados con metales pesados.

¿La fitorremediación puede ser una alternativa sostenible para el tratamiento de suelos con un elevado grado de contaminación por metales pesados, provenientes de actividades antropogénicas?.

Justificación

El suelo es un componente esencial del medio ambiente, soporte de los ecosistemas terrestres, principio de muchas cadenas tróficas y soporte del medio urbano e industrial (Durán, 2010). De este modo, el sistema suelo se hace imprescindible tanto para la sociedad, como para las demás matrices ambientales (aire, agua, biota); por lo que es necesario e importante contribuir en la conservación de dicho recurso. Debido a esto, la búsqueda de soluciones para la eliminación de los contaminantes presentes en éste se ha convertido en uno de los principales objetivos de los países industrializados para restaurar los daños causados (Garzón et al., 2017).

Es común que en los diferentes medios de comunicación se haga visible las problemáticas con el mercurio, por ejemplo, en fuentes de agua, quebradas y lagunas del Meta, Boyacá y Antioquia, así como diversos vegetales y aguas contaminadas con plomo y mercurio en el Chocó, uso indiscriminado de cientos de toneladas de mercurio y cianuro en explotación minera especialmente de oro en el Nordeste y Bajo Cauca (Antioqueño), Arsénico en cultivos de hortalizas y legumbres en Nariño, Marmato (Caldas) y en más de 500 minas en todo el país son el panorama de los metales pesados en Colombia (Londoño Franco et al., 2016).

Los metales son persistentes, es decir, no pueden ser creados o degradados, ni mediante procesos biológicos ni antropogénicamente, una vez que han entrado en los ecosistemas acuáticos, se transforman a través de procesos biogeoquímicos y se distribuyen entre varias especies con distintas características físico-químicas afectando directamente la cadena trófica, además el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y el arsénico (As) son algunos de los metales pesados que contaminan el suelo y comprometen la seguridad alimentaria y la salud pública del país (Reyes et al. 2016); el plomo, por ejemplo, causa síntomas como retraso del crecimiento e impacto al sistema nervioso, el consumo de pescado contaminado por mercurio genera mal

desarrollo del feto y toxicidad en el sistema nervioso y digestivo o daño en los pulmones, entre otros problemas.

La restauración de los suelos contaminados supone un reto de suma dificultad, por tal motivo, se plantea la Fitorremediación como una alternativa considerada ambientalmente viable y económicamente sostenible, para así minimizar y contrarrestar los efectos negativos provocados por actividades antropogénicas que alteran la estabilidad de los diferentes ecosistemas, los cuales son los que brindan los bienes y servicios necesarios para la supervivencia del hombre. Es por eso por lo que la presente monografía tiene como finalidad la realización de una revisión bibliográfica que permita evidenciar las ventajas que presenta el proceso de Fitorremediación, las principales especies utilizadas para llevar a cabo este proceso según el tipo de contaminante (metal pesado) y hacer una comparación frente a otros tipos de tratamientos fisicoquímicos utilizados.

Se debe destacar que la aplicación de esta estrategia dependerá de diversos factores como el tipo de contaminante, las características fisicoquímicas del suelo, la viabilidad económica y ambiental de su implementación y el tiempo estimado de la recuperación. La utilización de especies vegetales para la descontaminación no es una práctica nueva, ya que se viene utilizando desde hace décadas, principalmente para el tratamiento de aguas contaminadas (Hartman, 1975) y sería de gran satisfacción incrementar información en lo que concierne el componente suelo y a los avances recientes que evidencien el potencial del uso de plantas para inmovilizar los metales pesados de suelos contaminados y hacer posible su aplicación a gran escala de manera controlada y eficiente.

Objetivos

Objetivo General

Describir el potencial de la Fitorremediación a través de especies hiperacumuladoras, como alternativa para la remoción de metales pesados en suelos en Colombia.

Objetivos Específicos

1. Identificar especies vegetales hiperacumuladoras utilizadas para la remoción de los metales pesados (Cd, Pb, As, Hg) en el recurso Suelo.
2. Comparar a nivel ambiental y económico, entre la Fitorremediación frente a otros tratamientos fisicoquímicos aplicables para reducir la contaminación por metales pesados en el recurso suelo.

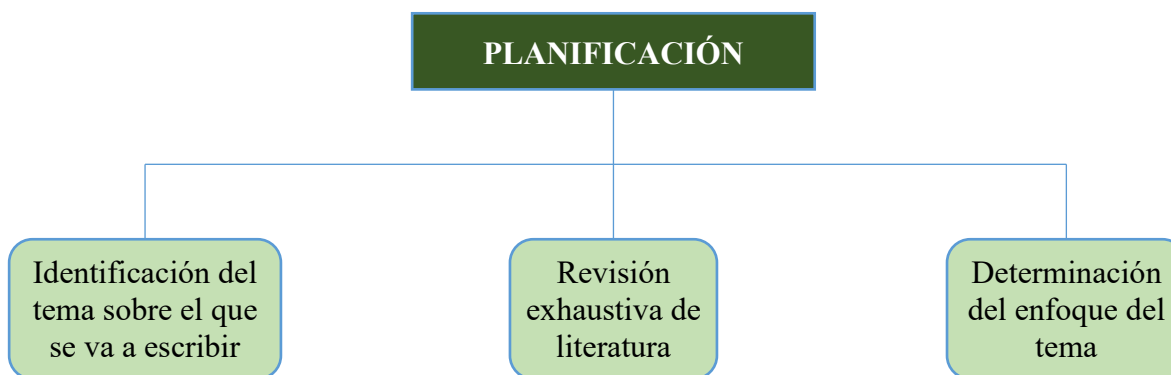
Metodología

El presente trabajo de revisión se concibió desde un enfoque cualitativo con un alcance exploratorio, donde se consideró investigaciones, trabajos y proyectos que se hayan realizado a nivel global y nacional donde se evidencie la eficiencia de la fitorremediación para la remoción de los contaminantes inorgánicos como los metales pesados, resaltando los tipos de fitorremediación existentes y los mecanismos a través de los cuales la especie vegetal acumule o extraiga los metales pesados Cd, Pb, As, Hg del suelo.

Se formuló en dos etapas; la *Planificación* y el *Desarrollo del cuerpo de trabajo*. De acuerdo con Provenzale (2007), el desarrollo adecuado de etapa de *Planificación* facilita y garantiza que el documento restante sea más sencillo de realizar, además, dicha etapa contempla los aspectos que se visualizan en la Figura 1, según (Mantilla-Villarreal et al., 2010):

Figura 1

Etapas de la Planificación



Nota. Adaptado de Mantilla-Villarreal et al., 2010.

En primer lugar, se identificó el tema sobre el cual escribiría, luego se hizo revisión de literatura mediante bases de datos como: ScienceDirect, Scopus, SciELO, Dialnet, Redalyc y Google Scholar, y la búsqueda en dichos gestores bibliográficos se realizó con las siguientes palabras clave: "*Phytoremediation*", "*Heavy Metal*" y "*Soil*"(también con "Fitorremediación",

“metales pesados” y “suelo” para Google Scholar y SciELO). Los documentos trabajados fueron tanto en español como en inglés. Por otra parte, se utilizó la base de datos institucional, y repositorios de otras instituciones, así como informes técnicos.

Posterior a la revisión, se ajustó el enfoque en base a lo que se encontró para realizar un aporte novedoso. Dicho enfoque es el que determinó la base para la estructuración del cuerpo de trabajo y posteriormente su desarrollo, dando cumplimiento a los objetivos planteados. La información se administró con el gestor bibliográfico Mendeley.

Capítulo I. Metales Pesados como Agentes Contaminantes de la Matriz Suelo

No hay una definición estándar para el término de “metal pesado”, sin embargo, éstos generalmente incluyen elementos (tanto metales como metaloides) que son tóxicos y tienen una densidad atómica superior a 5 g/cm^3 (Pinto et al., 2015). Algunos de ellos son esenciales para los organismos en pequeñas cantidades, como el Fe, Mn, Zn B, Co, As, V, Cu, Ni o Mo y que se convierten en nocivos si se elevan sus concentraciones; mientras, que otros metales pesados o algunos metaloides que incluyen, por ejemplo el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros, no desempeñan ninguna función biológica y son altamente tóxicos (Ortiz et al., 2007). Además, muestran una elevada tendencia a bioacumularse y a biomagnificarse a través de su paso por los distintos eslabones de las cadenas tróficas y pueden ocasionar graves problemas en el desarrollo, crecimiento y reproducción de los seres vivos (Londoño-Franco, 2016) por su persistencia y toxicidad (Delgadillo-López et al., 2011).

Según Sauvé et al. (2000), la cantidad de metales pesados biodisponibles en el suelo dependen de ciertas características del suelo como el contenido de arcillas y materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, entre otras. La toxicidad de los metales pesados también depende de su movilidad en el medio, de su composición química y su persistencia (Dom  nech y Peral, 2011).

Fuentes de Metales Pesados en Suelos

Los metales pesados son emitidos por diferentes fuentes, principalmente antropogénicas, y por medio de la Tabla 1, se muestran diversas actividades industriales que desencadenan la presencia y la elevada concentración de estos contaminantes en los suelos:

Tabla 1

Principales Actividades Industriales que Generan Metales Pesados en el Medio

Industria	Metales	Contaminación derivada
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las minas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, Tl	Procesado del mineral para obtención de metales
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales, Relaves y escoriales
Gestión de Residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión Metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y Pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosa y sólida desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn	Contaminación de escorrentía y aguas superficiales

Nota. Adaptado con datos de Caviedes et al. (2015)

Adicionalmente, en la Tabla 2 se muestra el nivel de toxicidad de los metales pesados y sus aplicaciones o usos en el sector industrial y manufacturero:

Tabla 2*Nivel de Toxicidad y Aplicaciones Industriales del Hg, As, Pb, y Cd*

Metal Pesado	Nivel de Toxicidad	Usos/Aplicaciones	Referencias
Mercurio (Hg)	Extremadamente tóxico	Empastes dentales, fabricación de pilas, lámparas fluorescentes, aparatos eléctricos (baterías, computadores), pinturas, procesos de catálisis, agroquímicos, productos farmacéuticos, papel.	Arthington (2013)
Plomo (Pb)	Extremadamente tóxico	Aditivo antidetonante en la gasolina, baterías, monitores y pantallas de televisión, joyería, latas de conserva, tintes para el pelo, grifería, pigmentos, aceites, cosmetología, aleaciones, cerámicas, municiones, soldaduras, plumadas, armamento, radiación atómica, insecticidas.	Brunton et al., (2018); Lanphear et al., (2000)
Arsénico (As)	Extremadamente tóxico	Tratamiento de maderas, pesticidas, bronceadores de piel, anticorrosivos, vidrio, cerámica, pinturas, pigmentos, medicamentos, entre otros usos.	Nava-Ruíz y Méndez-Armenta (2011)
Cadmio (Cd)	Extremadamente tóxico	Pinturas, plásticos, pilas, baterías, abonos, soldaduras, asbestos, pigmentos, barras (reactores nucleares), farmacéutica, fotografía, vidrio, porcelana, entre otros.	Zamora, et al., (2008); Peris Mendoza, (2005); Wasson et al., (2005)

Nota. Los niveles de toxicidad para cada metal contemplado en la tabla se tomaron de Ashraf et al. (2019).

Comportamiento de los Metales Pesados en la Matriz Suelo

Cuando el contenido de metales pesados en el suelo está en concentraciones que sobrepasan los límites máximos permitidos, pueden generar un efecto adverso sobre algunos organismos que habitan allí, tales como, inhibir el crecimiento de las plantas, causar una disminución de las poblaciones microbianas, entre otras afectaciones (Mejía Domínguez, 2011). Por su origen, puede ser geogénico o antropogénico. Los primeros pueden proceder de la roca madre en la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o del lixiviado de las mineralizaciones. Por el contrario, los antropogénicos, se producen a causa de residuos peligrosos que se producen en diversas actividades económicas, tales como: mineras, industriales, agrícolas, residuos sólidos urbanos, entre otros (Galán Huertos y Romero Baena, 2008).

Los metales pesados en el suelo suponen un riesgo, debido a su movilidad hacia fuentes hídricas superficiales y subterráneas, absorción por las plantas e invertebrados presentes en el suelo, lo que conduce el paso de este contaminante hacia la cadena trófica, debido a que organismos como las plantas conforman la base de la cadena alimenticia. Cuando los elementos esenciales (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, Co) (Carpena y Pilar Bernal, 2007), y los no esenciales (Cd, Pb, Hg, Cr) están a concentraciones elevadas y con una biodisponibilidad alta, estos pueden ser tóxicos (Carpena y Pilar Bernal, 2007); pues, la amenaza que suponen tanto para la salud humana como para las plantas y animales se intensifica por su larga persistencia en el suelo. Por tanto, la acción de los metales pesados sobre el suelo y el nivel de peligrosidad dependerá de su concentración y de las condiciones del suelo (pH, contenido en carbonatos, materia orgánica) y del propio metal; partir de dichas condiciones, se podrán dar procesos de adsorción, desorción o

de complejación, los cuales influyen directamente en la biodisponibilidad del metal que marca la peligrosidad de contaminación metálica (García et al., 2002).

A modo general, los metales pesados que han sido incorporados al suelo pueden tomar alguna de las siguientes vías:

- Adsorción; los metales pueden permanecer adsorbidos sobre las superficies de partículas coloidales orgánicas (humus) e inorgánicas (como las arcillas de silicatos de aluminio, oxihidróxidos de hierro, manganeso y aluminio, entre otros) (Young, 2013).
- Precipitación y coprecipitación; cuando el suelo presenta condiciones de anegamiento en conjunto con ciertos tipos de aniones como el carbonato y bicarbonato (CO_3^{2-} , HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), hidróxido (OH^-) y fosfato (HPO_4^{2-}), los metales pesados se precipitan en forma de bases y/o bases de baja solubilidad (Naidu et al., 1997; Menzies, 2006; Ok et al., 2010); mientras que en presencia de oxihidróxidos y sulfuros, los metales se pueden coprecipitar en coloides insolubles (Lu et al., 2011).
- Complejación; la cual se produce cuando en la solución del suelo tiene presencia de compuestos húmicos y fúlvicos que tienen una variedad de grupos funcionales como los enolatos, anillos de nitrógeno, aminos, azo, carbonilos, entre otros, los cuales facilitan la formación de complejos con metales pesados (Young, 2013; Mantoura, 1981; Chaberek y Martell 1959; Stevenson, 1994).
- Lixiviación; este proceso depende principalmente de la solubilidad del metal y la textura del suelo, es decir, si el suelo presenta una textura gruesa y los metales pesados se encuentra en formas solubles, el potencial de lixiviación será elevado, por lo que los metales pesados pueden llegar hasta niveles freáticos, contaminando las aguas subterráneas (Alloway, 1995; Polo et al., 2003).

Las principales características fisicoquímicas del suelo que inciden en la movilización de los metales son el pH, potencial redox, capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), carbonatos y bicarbonatos, materia orgánica, textura, humedad, entre otras (Sahuquillo et al., 2003).

Aunque, por otra parte, los metales pueden ser absorbidos por organismos biológicos, es decir, en la biota del suelo donde, por un lado, pueden llegar a ser volatilizados por la degradación biológica (para metales como el Hg y As) mediante bacterias y hongos, los cuales, para el As, lo volatiliza a través de un proceso denominado *metilación*, mientras que, mediante bacterias reductoras de Hg, reducen el Hg^{2+} a su forma volátil (Hg^0) (Mahimairaja et al., 2005; Bolan et al., 2013; Mason, 2015; Frankenberger y Losi, 1995). Por otro lado, los metales pueden ser acumulados en la macrobiota del suelo y las plantas, logrando de esta manera, su incorporación en la cadena trófica y la biomagnificación de dichos contaminantes inorgánicos en la misma (Hincapié Morales, 2019). Dado a que las plantas figuran como la base de la cadena trófica, por lo que su incidencia es altamente significativa en el transporte de los metales pesados por la cadena alimenticia.

Esta absorción biológica depende completamente de la biodisponibilidad del metal, es decir, si queda si el metal permanece inmovilizado en el suelo de las vías ya mencionadas anteriormente, la absorción biológica será reducida, por el contrario, si los metales no están retenidos en el suelo, pueden ser consumidos por las plantas por medio del contacto de la pared celular de las raíces de las plantas (Thakur et al., 2016; Ghosh y Singh 2005). Posteriormente a la absorción del metal en la raíz, el metal se transporta por medio del sistema vascular de la planta, distribuyéndolo en su biomasa, pudiendo llegar hasta el follaje de esta, mediante el uso de diferentes proteínas transportadoras (Manoj et al., 2020).

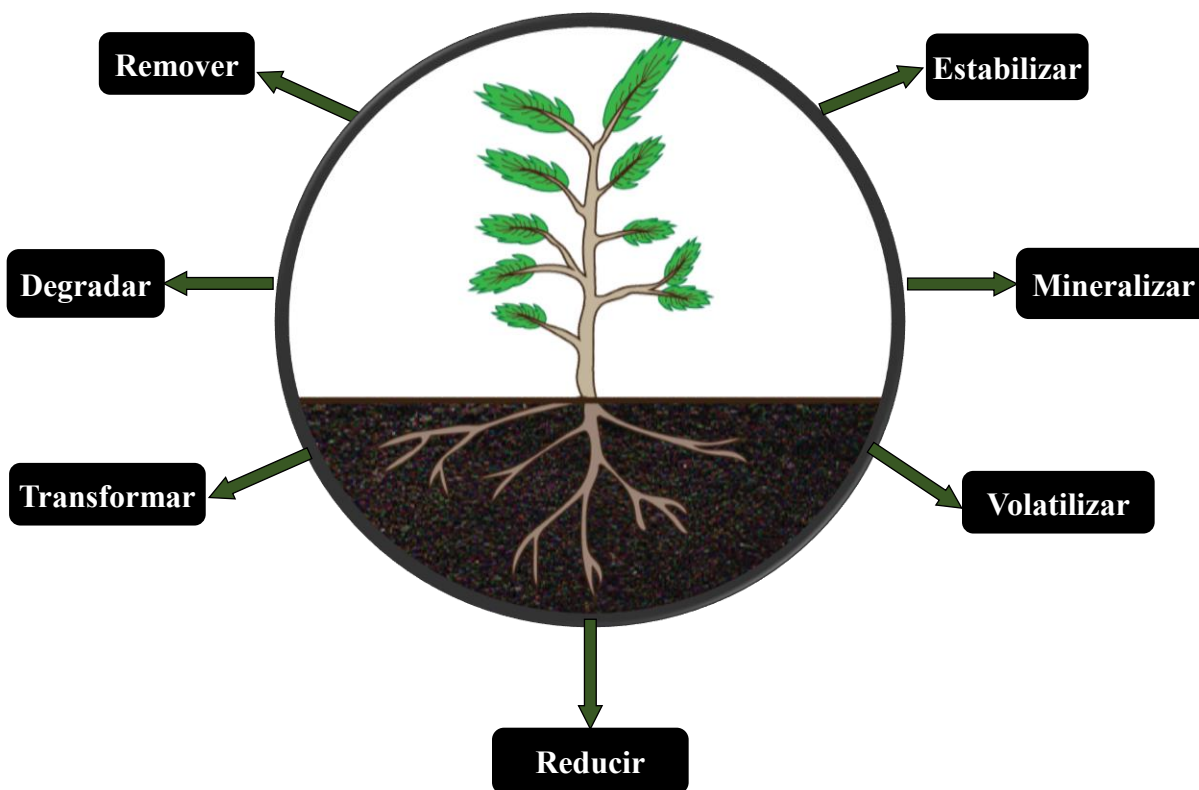
Cabe mencionar que en las plantas los metales se pueden volatilizar de forma directa, ya que luego de absorber los contaminantes del suelo, estos pueden ser liberado en formas volátiles, por ejemplo, para el selenio (Se), se libera en forma de selenato de metilo ($\text{CH}_3\text{O}_4\text{Se}^-$) o en ion Selenato (SeO_4^{2-}), a través de la superficie del tallo, tronco o las hojas (Chandra y Kumar, 2018; Shah y Daverey, 2020; Limmer y Burken, 2016). La volatilización en las plantas se puede dar de forma indirecta, la cual consiste en el aumento del flujo de contaminantes volátiles del subsuelo como resultado de las actividades de las raíces de las plantas (Limmer y Burken, 2016; Chandra y Kumar, 2018).

Capítulo II. Generalidades de la Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología basada en el uso de un conjunto de plantas que utilizan su potencial para remover o disminuir la concentración de contaminantes en el recurso suelo, y se hace más efectiva cuando la especie ha sido modificada genéticamente, ya que mejora la capacidad de remediación de la planta, aumentando su capacidad de degradación de contaminantes orgánicos o de acumulación de metales pesados (Cherian y Oliveira, 2005). En la Figura 2 se muestra el potencial que tienen las plantas para el control de contaminantes en las diferentes matrices ambientales:

Figura 2

Potenciales Aplicaciones de las Plantas para el Control de Contaminantes



Nota. Adaptado de Delgadillo-López et al., 2011.

Es considerada una tecnología eficiente en el tratamiento de la contaminación por metales pesados y su utilización en campo y laboratorio evidencian el potencial biotecnológico en la

recuperación de ambientes que han sido afectados por este tipo de contaminantes. El conocimiento de los procesos metabólicos y genéticos de las plantas y los microorganismos asociados a ellas permiten el desarrollo y aplicación de técnicas efectivas en los procesos de biorremediación (Beltrán-Pineda y Castellanos Rozo, 2016).

La fitorremediación resulta ser una técnica muy eficiente, ya que despliegan una serie de ventajas y desventajas en su aplicación, algunas de ellas las menciona Delgadillo-López et al. (2011); “son especialmente útiles en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajos y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo” (p. 603).

Figura 3

Matriz DOFA de la Fitorremediación



Nota. Adaptado de Rodríguez et al., (2019) y Delgadillo-López et al., (2011).

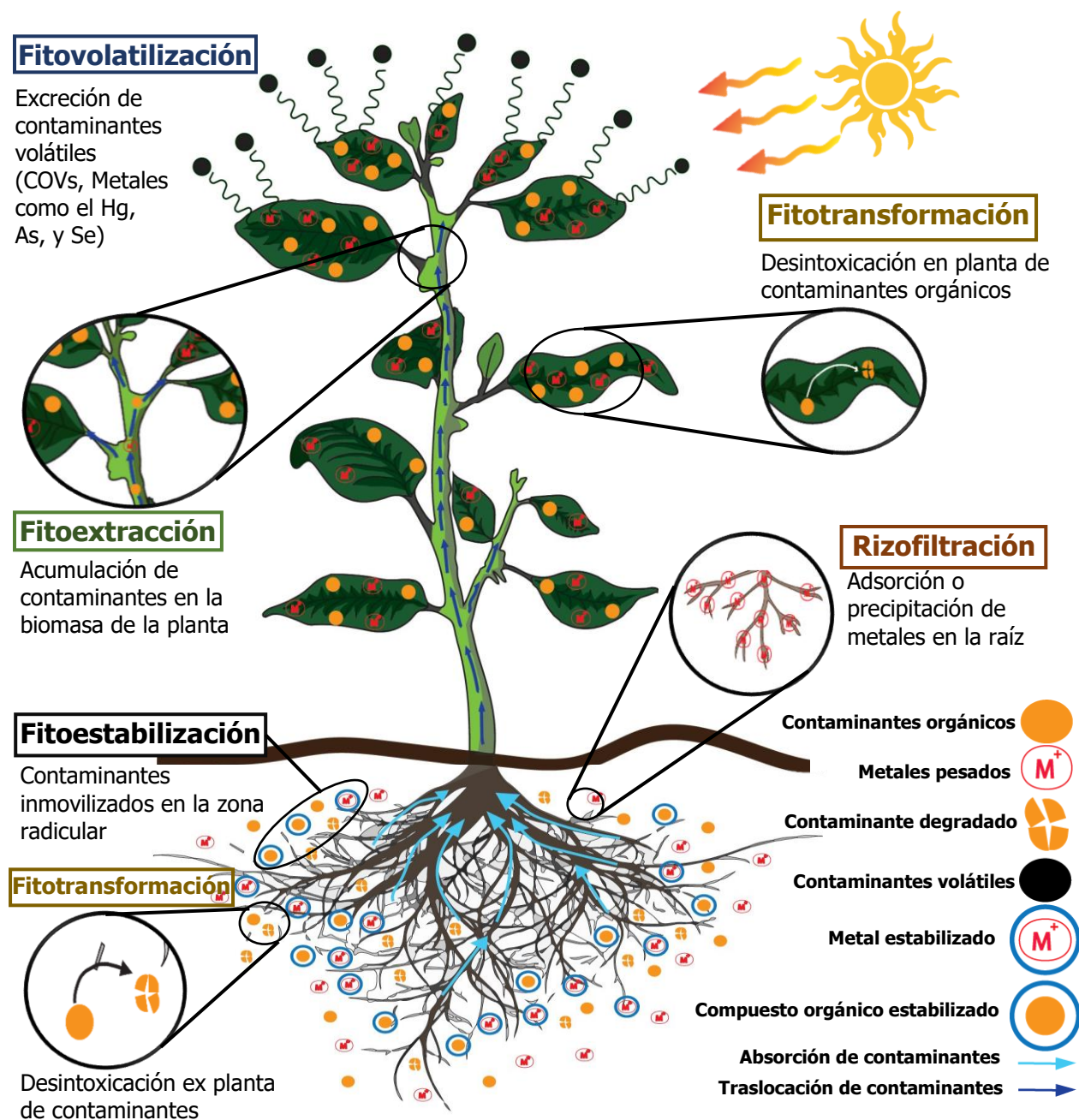
Tecnologías de la Fitorremediación

Las Fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como la transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición. Según Thangavel y Subbhuraam (2004), como se citó en Yan et al. (2020), de acuerdo con el tipo de contaminante, las características del suelo y el nivel de enmienda requerido; la fitorremediación se puede usar como método de contención (rizofiltración y fitoestabilización) o eliminación (fitotransformación, fitoextracción y

fitovolatilización). En la Figura 4 se puede visualizar las diversas estrategias de fitorremediación ya mencionadas:

Figura 4

Representación Esquemática de las Estrategias de la Fitorremediación



Nota. Adaptado de Rezanía et al. (2016), Ali et al., (2013), Mahar et al. (2016), Kumar et al. (2018) y, Chandra y Kumar, (2018).

La *rizofiltración* es una tecnología de la zona de las raíces en la que las plantas interactúan con los contaminantes, reduciendo su movilidad (Chandra y Kumar, 2018). Esta estrategia proporciona una mejor relación de costo-beneficio para el tratamiento de aguas

residuales (Rezania et al., 2016). La *fitoestabilización* es la transformación de contaminantes en formas de compuestos menos tóxicos o no tóxicos (Ali et al., 2013; Khalid et al., 2017; Mahar et al., 2016). En cuando a la inmovilización de metales pesados en suelos mediante este proceso, se puede lograr a través de la absorción, la precipitación, la complejación o la reducción de la valencia del metal en la rizosfera (Ghosh y Singh, 2005; Ali et al., 2013). En la *fitoextracción* los contaminantes se absorben en la rizosfera, y luego, se translocan y acumulan en los brotes de la planta (Ghosh y Singh, 2005; Kotrba et al., 2009). Los contaminantes se acumulan en la biomasa de la planta, seguida de esto se realiza la cosecha, y posteriormente, se realiza una gestión segura de la biomasa con el contaminante acumulado, como los procesos de termodestrucción en condiciones controladas (Prasad y Freitas, 2003; Kotrba et al., 2009; Mahar et al., 2016).

La *fitovolatilización*, la cual, puede ser directa o indirecta, es una estrategia utilizada con contaminantes orgánicos y algunos metales pesados como Hg, As y Se (Sanz, 2015). En la fitovolatilización directa, luego de absorber el contaminante y transportarse hasta el follaje, es liberado en formas volátiles, como los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) para contaminantes orgánicos, y para los metales en formas volátiles como el selenato o el metilmercurio (Limmer y Burken, 2016). Por último, en la *fitotransformación*, las plantas exudan varias enzimas que pueden degradar directamente los contaminantes orgánicos como la deshalogenasa y la oxigenasa (Kumar et al., 2018; Vishnoi y Srivastava, 2008; Ali et al., 2013). Los procesos de fitorremediación, mecanismos de remoción de contaminantes y criterios de selección de especies vegetales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3*Procesos de Fitorremediación, Mecanismos de Remoción de Contaminantes y Criterios de Selección de Especies*

Proceso	Mecanismo	Contaminante	Criterios de selección de especies vegetales
Rizofiltración	Acumulación de rizosfera	Metales pesados como el Pb, Cd, Zn, Ni, Cu, radionúclidos como el Cs, Sr, U y orgánicos hidrófobos	Plantas resistentes a metales, con superficie de alta adsorción, tolerancia a la hipoxia, generalmente plantas terrestres debido a su sistema de raíces fibroso
Fitoestabilización	Complejación	Pb, Cd, Zn, As, Cu, Cr, Se, U, orgánicos hidrófobos: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), Bifenilo Policlorado (PCB), dioxinas, furanos, pentaclorofenol, DDT, dieldrina	Plantas con sistemas radiculares extensos y abundantes, con capacidad de mantener la translocación de metales de las raíces a los brotes, capacidad para retener contaminantes en las raíces o la rizosfera (mecanismo de exclusión)
Fitoextracción	Hiperacumulación	Pb, Cd, Zn, Ni, Cu con adición de EDTA para Pb, radionúclidos, pentaclorofenol, compuestos alifáticos (de cadena corta)	Plantas tolerantes a altas concentraciones de metales, alta capacidad de acumulación de metales, tasa de crecimiento rápida, acumulación de oligoelementos en partes aéreas, fácil de cosechar, sistema de raíces extendido, alto factor de translocación, fácil manejo agrícola, buena adaptación a condiciones ambientales y climáticas predominantes, resistencia a patógenos y plagas, capacidad para repeler a los herbívoros para evitar la contaminación de la cadena alimentaria
Fitovolatilización	Volatilización por hojas	Disolventes clorados, tricloroetileno (TCE), cloruro de metileno (MC) Tetracloroetileno (PCE), tetracloruro de carbono (CT), 1,1,1-tricloroetano (TCA), Hg y Se	Plantas terrestres o acuáticas para aplicaciones in situ o ex situ, especies de tipo hiperacumuladoras
Fitotransformación	Degradación en plantas	Herbicidas: atrazina, alacloro, mezclas Benceno Tolueno Etilbenceno y Xileno (BTEX), compuestos alifáticos clorados, nutrientes (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}), desechos de municiones como el 2,4,6-trinitrotolueno (TNT), explosivo de detonación rápida (RDX)	Plantas resistentes y de fácil crecimiento, fácil de mantener, tolerante al anegamiento y las condiciones de sequía, plantas de raíces profundas., alta tasa de transpiración y de transformación de sustancias tóxicas en menos tóxicas o no tóxicas

Nota. Adaptado de Kumar et al. (2018); Chandra y Kumar (2018).

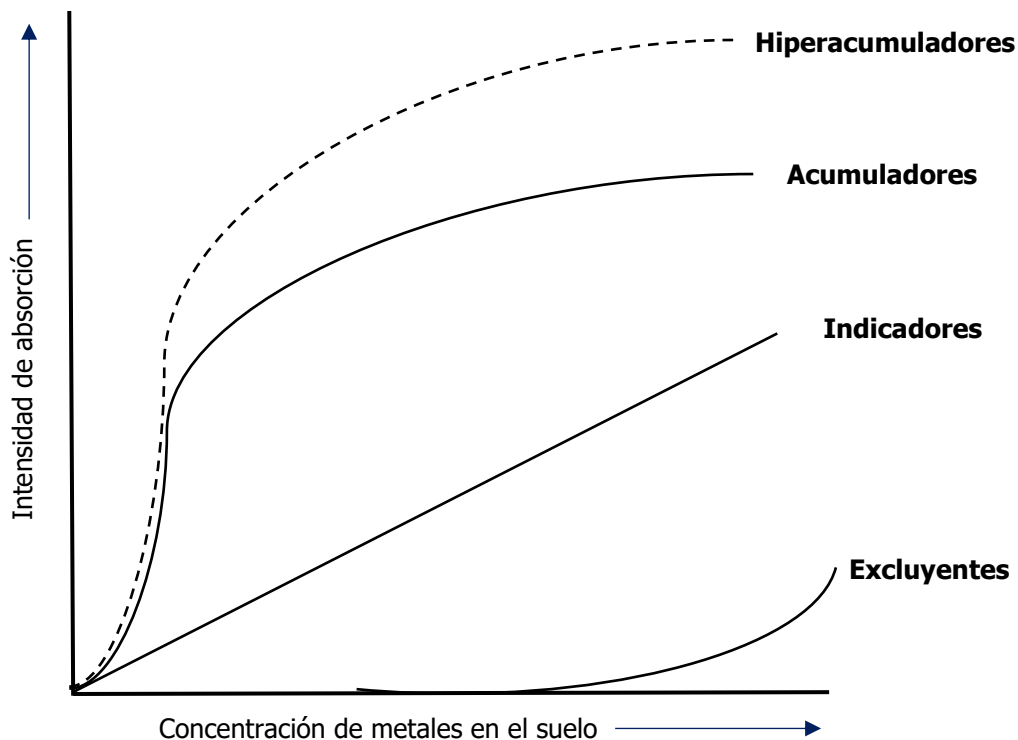
Estrategias de la Vegetación para Procesos de Fitorremediación

En cuanto a la absorción de los contaminantes inorgánicos como los metales pesados, es importante considerar que estos se pueden biomagnificar en la cadena alimenticia principalmente por la absorción realizada por parte de las plantas, las cuales son la principal ruta de ingreso de los metales en la cadena alimenticia, ya que estos ocupan el nivel más bajo dentro de la cadena (Bradl et al., 2005). En general, el proceso absorción por parte de las plantas va a depender principalmente de la biodisponibilidad del metal, es decir, que estén presentes en la solución del suelo, ya que de esta manera pueden ser consumidos por las raíces de las plantas (Thakur et al., 2016).

No obstante, las plantas emplean diversas estrategias para aumentar la biodisponibilidad de iones metálicos. Por ejemplo, la secreción de fitosideróforos (compuestos quelantes en plantas) y carboxilatos; y la acidificación de la rizosfera, para así facilitar la quelación y la solubilización de metales unidos al suelo (Kinnersley, 1993). Posteriormente, los iones metálicos entran en contacto con la pared celular de las raíces, la cual es un intercambiador de iones de baja selectividad y afinidad (Ghosh y Singh 2005). La absorción de metales pesados en las raíces ocurre, ya sea por difusión pasiva a través de la membrana celular o por el proceso de transporte activo contra el gradiente de potencial electroquímico, mediados por los portadores, como los agentes complejantes, ácidos orgánicos o proteínas que se unen a la especie metálica (Fergusson 1990). Después de ser absorbida por la raíz, el sistema vascular de la planta transporta el metal y lo distribuye en el resto de biomasa de la planta, llegando hasta el follaje de esta, mediante el uso de diferentes proteínas transportadoras (Manoj et al., 2020). Baker y McGrath (1991) clasifican a las plantas en función de su potencial de acumulación de metales pesados en sus tejidos, tal como se muestra en la Figura 5:

Figura 5

Clasificación de las Plantas en Base a su Absorción Relativa y Potencial de Bioacumulación



Nota. Adaptado de Baker y McGrath (1991).

Las plantas *excluyentes* son aquellas donde la bioacumulación de metales se mantienen bajas en un amplio rango de concentraciones en el suelo sin efectos adversos, debido a que estas plantas hacen uso del mecanismo de restricción, evitando el consumo de metales en las células de las raíces, por lo tanto, impidiendo el transporte del metal hasta los demás tejidos (De Vos et al., 1991; Adriano, 2001), hasta llegar a valores presentar críticos, donde dicho mecanismo se rompe, resultando en el transporte del metal a los demás tejidos arriba del suelo de la planta, sin restricciones (Baker, 1981).

Los *indicadores* son especies de plantas donde la concentración interna refleja los niveles externos, es decir, que responden de manera correspondiente a las concentraciones de metales en los suelos, mostrando curvas casi lineales (Baker, 1981; Adriano, 2001; McGrath et al., 2002).

Los *acumuladores* permiten que los metales entren en las raíces desde concentraciones bajas a altas, facilitando la acumulación de dichos contaminantes en la biomasa arriba del suelo de las plantas, mostrando curvas logarítmicas (Baker, 1981; Bhargava et al., 2012; Patra et al., 2020)

Al igual que las plantas excluyentes, los acumuladores extremos o *hiperacumuladores* presentan un mecanismo que le permite sobrevivir a la exposición a metales pesados, el cual se denomina mecanismo de tolerancia (Adriano, 2001), por ende, dichas plantas tienen la capacidad natural de absorber estos contaminantes inorgánicos entre 50 a 500 veces más de lo que las plantas promedio pueden absorber (Lasat, 2000), por este motivo, el uso de las especies hiperacumuladores ha revolucionado la fitorremediación como enmienda de suelos contaminados con metales pesados, por lo que las especies de esta categoría de plantas son las más apropiadas para la aplicación del proceso de fitoextracción.

Este subgrupo de las plantas acumuladoras, las cuales, suelen ser endémicas de suelos mineralizados naturalmente, lo cual les ha permitido acumular altas concentraciones de metales en su biomasa sin desarrollar ningún síntoma severo de toxicidad (Baker y Brooks, 1989; Raskin et al., 1997; Patra et al., 2020). Según Lone et al. (2008), aproximadamente un 0,2% de las angiospermas presenta una hiperacumulación de iones de metales pesados.

Helianthus annuus L. (Girasol), como Especie Hiperacumuladora

Todas las plantas tienen un potencial para absorber metales del suelo esenciales para su supervivencia y desarrollo, pero existen especies que sobresalen a la hora de absorber, tolerar y translocar metales que presentan altos niveles de concentración, a este pequeño grupo se les conoce como plantas hiperacumuladoras (Chen et al. 2001), es decir que resisten y se desarrollan en suelos contaminados con metales pesados en comparación con otros grupos taxonómicos, una

de estas especies es *Heliantus annuus L.*, comúnmente conocida como Girasol que pertenece a la familia de las asteráceas; es una planta hortícola con valores tanto ornamentales como económicos (cultivos oleaginosos), tiene tallos bien desarrollados, alta biomasa, una gran superficie foliar y amplia adaptabilidad al medio ambiente (Jun et al. 2020).

En la actualidad varios estudios corroboran que esta especie absorbe metales pesados en grandes cantidades, tal como lo menciona García et al. (2006), quienes consideran que esta planta hiperacumuladora es muy favorable en la Fitoextracción de Zn, Cd, As, Pb y elementos radioactivos, esto se debe a que absorbe los metales pesados en mayor cantidad en sus raíces que en sus brotes y si se cosecha la biomasa entera de la planta puede extraer del 10 al 25% de los metales del suelo, según Lizarbe Asmat y Rivera López (2013)

Especies Usadas en Procesos de Fitorremediación

Las plantas que pueden crecer y desarrollarse en suelos con altas concentraciones de metales pesados pertenecen a una flora especializada y son seleccionadas naturalmente por su alta tolerancia a un determinado metal (Marrero-Coto et al., 2012). Los metales pesados al ser absorbidos por la zona radicular de la planta son transportados a las partes aéreas de la planta (traslocación), donde pueden quedar acumulados allí (tallo, hojas, etc.) (Shah y Daverey, 2020). Estos procesos de bioacumulación permiten que los contaminantes sean transformados en productos no tóxicos o menos tóxicos, minimizando su exposición en el ambiente y las afectaciones que pueden causar en él (Favas et al., 2014; Dos Santos y Lenzi, 2000).

Hay más de 450 especies de hiperacumuladores de metales pesados, las cuales son plantas vasculares que pertenecen a 45 familias en las angiospermas, que incluyen las *asteraceae*, *brassicaceae*, *caryophyllaceae*, *cyperaceae*, *cunoniaceae*, *fabaceae*, *flacourtiaceae*, *lamiaceae*, *poaceae*, *violaceae* y *euphorbiaceae* (Bhargava et al., 2012; Padmavathiamma y Li,

2007;). Los hiperacumuladores también están bien representados en la familia *Brassicaceae*, especialmente en los géneros *Alyssum*, *Thlaspi*, *Bornmuellera* y *Arabidopsis* donde se ha informado la acumulación de varios metales pesados (Dar et al., 2015; Jadia y Fulekar, 2009).

En la Tabla 4 se puede observar las principales especies vegetales que han demostrado altos porcentajes de remoción y control de los metales pesados como el Hg, Cd, Pb y As:

Tabla 4

Eficiencias de Remoción de Metales Pesados de Diferentes Especies Fitorremediadoras

Especie utilizada	Metal	Eficiencia	Características generales	Referencias
	Cd	50 a 75%	Capacidad de fitoextracción medida hasta la etapa de culminación del crecimiento de la planta. Suelo de cultivos de café contaminado con Cd por uso intensivo de fertilizantes	Álvarez Pérez y Sánchez Farfán (2019)
<i>Helianthus annuus</i>	Cd, Pb	75%	Suelos con relaves de minas. Se utilizó acondicionadores orgánicos e inorgánicos para el relave minero al 25%	Lizarbe Asmat et al. (2016)
	As	65,3%	Fitorremediación de lodos residuales de lagunas facultativas de PTAR durante 120 días de crecimiento	Hernandez Bringas (2006)
	Hg	23 a 47%	Fitorremediación del Hg utilizando una fitohormona (citoquinina, tioligando y tiosulfato de amonio)	Cassina et al. (2012)
<i>Brassica juncea</i>	Cd	65%	Esta investigación se hizo en un invernadero, pero con muestras de suelos sacados de zonas cercanas a áreas industriales y centrales termoeléctricas.	Kathal et al. (2016)

Especie utilizada	Metal	Eficiencia	Características generales	Referencias
<i>Raphanus sativus</i>	Cd	54.9%	Compost contaminado con metales pesados y en condiciones ácidas.	Intawongse y Dean, (2007)
<i>Magnolia grandiflora</i>	Pb Cd	63% 49%	Fitorremediación ex situ de muestras de suelos obtenidas en el centro de la ciudad de Shangai y alrededores de zonas industriales.	Liang et al. (2017)
<i>Fuertesimalva echinate</i>	Pb	41,5%	Fitoestabilización de suelos con relave de minas.	Jara-Peña et al., (2014)
<i>Lupinus. ballianus</i>	Cd	68,2%		
<i>Mombasa</i>	Pb,	28%	Se tomaron 3 lotes de suelos de uso agrícola con presencia de dichos metales presentes por fertilizantes. El tratamiento se hizo con dos especies gramíneas combinadas, las cuales demostraron la mayor eficiencia de remoción.	Cordero Casallas (2015)
<i>Brachiaria decumbens</i>	Cd	71%		
<i>Baccharis latifolia</i>	As	81%	El As en el suelo se encontró a una concentración de 10ppm. Esta especie tuvo mejores capacidades de traslocación del As a las partes aéreas de la planta.	Cepeda Hernández (2018)
<i>Pteris vittata</i>	As	84%	Para este proceso se hizo uso combinado de comunidades biológicas en el sistema radicular de esta especie, donde se examinaron 864 cultivos bacterianos, los cuales mejoraron la eficiencia de reducción de As en el suelo.	Abou-Shanab et al. (2020)

Especie utilizada	Metal	Eficiencia	Características generales	Referencias
<i>Jatropha Curcas L</i>	Hg	39 a 48%	Fitorremediación in situ en una zona minera, donde se tomaron 4 lugares en los cuales se presentó dicho rango de eficiencia.	González Pérez (2020)
<i>Erato Polymnioides</i>	Hg	74%	Las muestras de suelo para este trabajo se tomaron en zonas de minería artesanal a pequeña escala en la selva ecuatoriana. Se encontró hongos micorrízicos arbusculares como comunidad biológica que facilitó una eficiencia mayor para esta especie de tipo hiperacumuladora.	Chamba et al., (2016)

En base a la tabla, se encontró que para metales como el Cd, especies como *Helianthus annuus* obtuvieron una eficiencia de remoción altas; por un lado, Álvarez y Sánchez (2019) tuvieron un rango de eficiencias bastante altos, lo cual es coherente con los resultados obtenidos por Beltrán Villavicencio (2001), donde se evidenció que la planta tuvo una eficiencia del 60% de remoción de Cd en suelo agrícola y también se obtuvo mayores capacidades de fitoextracción en la zona radicular hasta el cuarto mes (culminación de etapa de crecimiento). Por otro lado, Lizarbe Asmat et al., (2016) tuvieron eficiencias de remoción altas de Cd y Pb con la misma especie, sin embargo, a diferencia con las otras investigaciones, se utilizó como acondicionador una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos (humus, musgos, arena y aserrín en 50%, 30%, 10% y 10% respectivamente), el cual mejoró la eficiencia de remoción de los metales hasta un 75%, a una proporción del 25% de acondicionador y 75% de material de relave, además, en este estudio se evidenció también que estos metales se acumularon en la zona radicular de las plantas, al igual que en los resultados obtenidos por Munive Cerrón et al. (2020) para la misma especie.

En la remoción de metales como el Pb, investigaciones como las de Liang et al. (2017), muestra una eficiencia del 63%, siendo la *Magnolia grandiflora*, la especie con mayor capacidad de remoción entre las 20 especies tomadas para dicho estudio. Por otro lado, la *Fuertesimalva echinate* es una de las 5 especies altoandinas mencionadas anteriormente, la cual, en dicha investigación, fue la que mejor estabilidad tuvo tanto para el Pb, como para el Cd (Jara-Peña et al., (2014). En Colombia, Cordero Casallas (2018) hizo una fitorremediación in situ para la recuperación de suelos afectados por Cd y Pb en una zona agrícola del municipio de Útica (Cundinamarca), demostrando mejores eficiencias usando dos especies en simultáneo.

Respecto al As, se ha encontrado que se puede potenciar el uso de fitorremediación con plantas hiperacumuladoras y comunidades biológicas; así lo demostraron Abou-Shanab et al. (2020), donde tuvieron una reducción del 95% de As(V) y 73% de As(III), ya que, por un lado, la especie *Pteris vittata* es una planta de tipo hiperacumuladora, y por otro lado, en la zona radicular se tenían comunidades biológicas que ayudaron a mejorar la absorción de As en las plantas, lo cual presenta un potencial para desarrollar inóculos de estos microorganismos (de los cuales se determinó que el 39% eran del género *pseudomonas*), que ya están adaptados a la presencia de este metaloides para combinarlos con las técnicas de fitorremediación. En Colombia, Cepeda Hernández (2018) demostró que la especie *Baccharis latifolia* demostró una alta capacidad de traslocación de As de la zona radicular a la parte aérea de la planta, soportando la hipótesis sobre la familia de las *Asteraceae* respecto a las capacidades que presentan para la biorremediación, debido a sus aptitudes de supervivencia bajo condiciones adversas relacionadas con estos contaminantes (Nikolić y Stevović, 2015). Además, esto es coherente con otras investigaciones, las cuales se encontraron que ciertas especies como *Pteris vittata L*, *Arabidopsis halleri*, *Thlaspi caerulescens* y los géneros *Salix* y *Populus* son consideradas biorremediadoras

debido a la capacidad retener o transformar dichos contaminantes (Miranda et al., 2011; Šyc et al., 2012; De Oliveira et al., 2014; Khan et al., 2015; Alahabadi et al., 2017).

Por último, respecto a la remediación de suelos contaminados con Hg, se encontró en un estudio realizado en una zona minera de extracción aurífera, cerca del municipio de Puerto Libertador (Córdoba), la aplicación de la fitorremediación en cuatro zonas alteradas con la especie *Jatropha Curcas L*, la cual dado a su factor de bioconcentración y traslocación (los cuales fueron mayores a 1), se ratifica que dicha especie es idónea para la fitorremediación de ese tipo de suelo, debido a su buena capacidad de acumulación en raíces y posterior traslocación en las partes aéreas cosechables (González Pérez, 2020). Dicho estudio obtuvo una buena tasa de remoción de Hg del suelo, a pesar de que el porcentaje de eficiencia estuvo en un rango entre el 39 y 48%, sin embargo, hay que apreciar que existen otros procesos que pueden intervenir en la remoción de dicho metal en el suelo, como el que realizan algunos microorganismos al reducir el Hg (II) a Hg (0), en el caso de algunas bacterias poseen una enzima citoplásmica llamada mercurio reductasa (MerA) que es la encargada de esta transformación (Beltrán-Pineda y Gómez-Rodríguez, 2016). Por lo mencionado anteriormente, en el estudio de Chamba et al., (2016) se encontró que las actividades de comunidades fúngicas contribuyeron a un mejoramiento del proceso de fitorremediación; los resultados sugieren un papel facilitador de los hongos micorrízicos arbusculares nativos y adaptados a las condiciones adversas en presencia del Hg, ya que la especie *Erato polymnioides* aumentó la acumulación de Hg cuando creció con una mayor colonización de dicho consorcio fúngico, por lo que esta especie hiperacumuladora pudo obtener mayores remoción si se compara con el estudio de González Pérez (2020), por lo tanto, el uso de fitorremediación asistida por microbios para la remediación de Hg en áreas de extracción de oro son una alternativa eficiente. También se ha estudiado el girasol frente a la remoción del Hg, del

cual, en base a los resultados de Casina et al. (2012), si bien puede remover un bajo porcentaje del Hg, aún no es suficiente, puesto que se hace uso de coadyuvantes como las fitohormonas los cuales elevaron el porcentaje de remoción a un valor más alto, mientras que la especie *Erato polymnioides* presenta mayor eficiencia en comparación.

Debido a las numerosas ventajas de la fitorremediación para el control de los metales pesados, se ha informado de muchas investigaciones en la literatura sobre dicho tema. Los resultados de búsqueda en la base de datos *Scopus* con los elementos de búsqueda "*Phytoremediation*", "*Heavy Metal*" y "*Soil*" en "*Title, Abstract, Keywords*" revelaron que la fitorremediación aplicado a metales pesados en suelos se ha vuelto muy popular en el pasado reciente (~50% de los artículos se publicaron en los últimos cuatro años, 2016-2020), especialmente en países como China (35,2%), India (17,3%) y Estados Unidos (10,8%); estos datos se pueden observar en la Figura 6 y 7:

Figura 6

Número de Artículos Publicados en los Últimos 20 Años

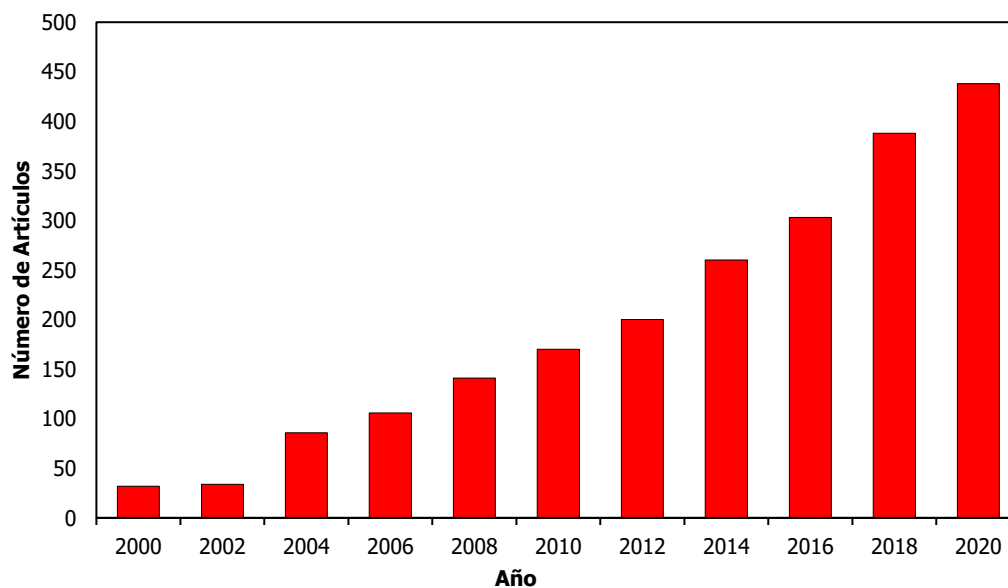
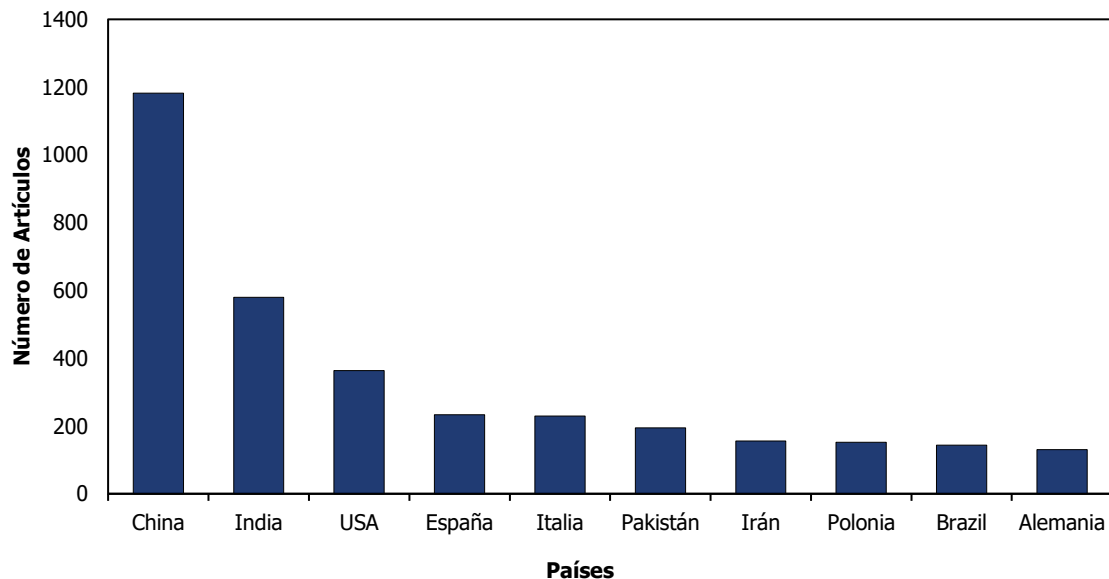


Figura 7

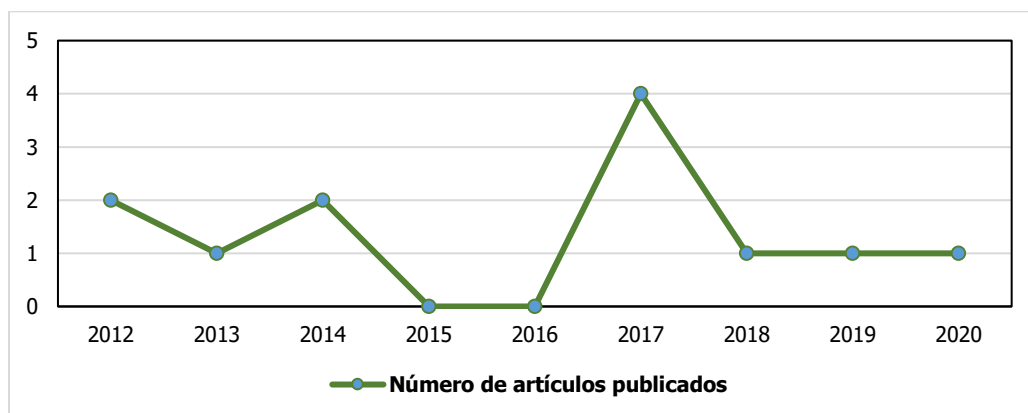
Artículos Publicados por Diferentes Países del Mundo



En base a los parámetros de búsqueda mencionados anteriormente, Colombia se encuentra en el puesto 52 con publicaciones en revistas indexadas en las bases de datos de Scopus con un total de 12 publicaciones, tal como se aprecia en la Figura 8:

Figura 8

Publicaciones en Colombia sobre Fitorremediación en Scopus



Esto deja en evidencia la falta de investigación específicamente en la remediación de metales pesados en suelos con el uso de plantas en el país, dentro de las revistas indexadas en dicha base de datos.

Tratamientos Físico-químicos Usados para la Enmienda de Suelos con Metales Pesados

En la Tabla 5 se mencionan los principales métodos para la descontaminación de suelos con metales pesados;

Tabla 5*Principales Técnicas para la Recuperación de Suelos Contaminados con Metales Pesados*

Tratamiento	Proceso involucrado	Ventajas	Limitaciones	Aplicabilidad	Tiempo aptos de aplicación	Referencias
Tratamiento físico						
Reemplazo de suelo	Excavar suelo contaminado y reemplazarlo por suelo no contaminado	Puede aislar eficazmente los metales pesados de un sitio contaminado. Eficaz para suelos altamente contaminados.	En grandes cantidades de volumen, mayor trabajo, costoso, producción de residuos peligrosos y efecto negativo en el suelo.	Pequeña escala	Corto plazo	Yao et al., (2012); Douay et al., (2008).
Aislamiento del suelo	Aislar el suelo contaminado del suelo no contaminado, utilizando barreras subterráneas	Previene el transporte de metales pesados fuera del sitio, efectivo para suelos altamente contaminados.	Costosa, la efectividad varía con el tipo de barrera subterránea	Pequeña escala	De corto a largo plazo	Zhu et al., (2012); Zheng and Wang, 2002).
Vitrificación	Reducción de la biodisponibilidad del metal mediante la formación de material vítreo usando altas temperaturas	Fácil aplicación, aplicable a una variedad de contaminantes.	Alto costo debido al requerimiento de energía	Pequeña escala	Corto plazo	Mallampati et al., (2015)

Tratamiento	Proceso involucrado	Ventajas	Limitaciones	Aplicabilidad	Tiempo aptos de aplicación	Referencias
Remediación electrocinética	Eliminación de metales pesados del suelo mediante la aplicación de electroforesis o electro-migración con inducción de voltaje de corriente continua.	Fácil aplicación, económicamente eficaz, no destruye la naturaleza del suelo.	Consumo energético elevado, y se requiere suelos con baja permeabilidad, con control continuo del pH	A pequeña escala	A largo plazo	Yao et al., (2012). Rosestolato et al., (2015)
Tratamiento químico						
Inmovilización	Reducción de la movilidad y biodisponibilidad del metal mediante la aplicación de una enmienda inmovilizadora y la formación de complejos estables e inmóviles mediante adsorción.	Aplicabilidad rápida y fácil, costos relativamente bajos, cubre un amplio espectro de contaminantes inorgánicos	Es necesaria una solución temporal y un seguimiento permanente	De pequeña a escala mediana	Corto plazo	Shahid et al., (2014); Austruy et al., (2014); Ashraf et al., (2016)
Lavado de suelos	Eliminación de metales pesados del suelo mediante extractores (orgánicos o inorgánicos) y formación de	Elimina completamente los metales, cumple con criterios específicos y reduce la responsabilidad a largo plazo	Los extractores de lavado pueden causar problemas ambientales, la eficacia varía según el tipo de suelo, metal y extractante.	Pequeña escala	Largo Plazo	Guo et al., (2016); Park y Son, (2016)

Tratamiento	Proceso involucrado	Ventajas	Limitaciones	Aplicabilidad	Tiempo aptos de aplicación	Referencias
	complejos estables y móviles.					
			Fitorremediación			
Fitovolatilización	Absorción de metales pesados por las plantas del suelo y liberación en forma de vapor a la atmósfera.	Económico y menos perturbador en cuanto a impactos ambientales	Restringido a metales volátiles (As, Hg, Se), puede causar otros problemas ambientales después de la liberación del metal a la atmósfera.	De pequeña a escala media	Largo plazo	Sakakibara et al., (2010)
Fitoestabilización	Uso de plantas para disminuir la biodisponibilidad y la movilidad de los metales en el suelo mediante el secuestro en las raíces de las plantas.	Económico y menos perturbador en cuanto a impactos ambientales	Solución temporal, la eficacia varía según el suelo, la planta y el tipo de metal.	De pequeña a escala media	Mediano plazo	Sylvain et al., (2016)

Tratamiento	Proceso involucrado	Ventajas	Limitaciones	Aplicabilidad	Tiempo aptos de aplicación	Referencias
Fitoextracción	Uso de plantas hiperacumuladoras para absorber, translocar y concentrar metales pesados del suelo en la superficie cosechable de la planta	Altamente económico, ecológico, menos disruptivo	La eficacia depende de las condiciones de crecimiento, la tolerancia de la planta, la biodisponibilidad de los metales en el suelo. Las plantas de acumulación de metales son generalmente muy pocas	A escala grande	Largo plazo	Rascio y Navari-Izzo, (2011); Sabir et al., (2015)

Además de los aspectos de aceptabilidad social y ambiental que se toman en cuenta al momento de analizar las diferentes técnicas para la remediación de suelos contaminados, el costo involucrado es el factor clave y la aplicación práctica de la tecnología de remediación en las condiciones de campo. Los estudios sobre el aspecto económico de la remediación del suelo con metales pesados son relativamente escasos, además, son varios factores que contribuyen e influyen de manera directa sobre los costos de la remediación de un sitio contaminado con dicho contaminante inorgánico, ya que influyen factores como los relacionados con el sitio contaminado (como el tipo y profundidad del suelo, textura, la profundidad del agua subterránea, las posibles vías de migración), los metales pesados presentes (tipo de metal y su concentración en el suelo) (Khalid et al., 2017). Los métodos de remediación física generalmente requieren una gran cantidad de mano de obra y recursos materiales, si bien es una alternativa considerable cuando se trata de grandes extensiones de suelos contaminados, económica y ambientalmente implica impactos relativamente altos (Yao et al., 2012). Por otro lado, los tratamientos como los de vitrificación suponen un elevado consumo energético, y, en consecuencia, mayores costos.

La remediación con tratamientos químicos representa un método rentable en comparación con los métodos de remediación física. La cantidad de productos químicos necesarios para la inmovilización de metales pesados o el lavado del suelo generalmente no es muy alta debido a las dosis comparativamente bajas aplicadas de extractantes químicos o agentes inmovilizadores como el EDTA (Khalid et al., 2017). Sin embargo, el costo de la remediación química del suelo varía según el tipo de metal y del suelo, así como el de los extractores químicos o agentes inmovilizadores. Por ejemplo, el lavado del suelo es más fácil para el Cd que para el Pb, debido a la naturaleza inmóvil y la alta afinidad del Pb por los componentes del suelo, además, el lavado del suelo requiere más insumos químicos para los suelos con textura arcillosa en comparación

con los suelos arenosos, esto ocurre como consecuencia de la fuerte unión de metales en suelos con los componentes arcillosos, y por otro lado, en cuanto a los extractantes, las concentraciones aplicados de quelatos sintéticos como el EDTA son de 10 a 50 veces más altos que los ligandos naturales (Shahid et al., 2012; Khalid et al., 2017).

Por último, la fitorremediación es una alternativa aún investigación, la cual, comparada con los demás tipos de tratamiento de suelos, es de las opciones más prácticas y económicas, ya que los tratamientos se pueden realizar en el área afectada sin necesidad de hacer uso de excavaciones físicas o remoción de material, y dado a que esta técnica de biorremediación atenúa los contaminantes de forma natural sin necesidad de una constante participación humana, excepto para la cosecha de biomasa con metales acumulados, representa un ahorro de costos muy considerables comparado con las demás técnicas ya mencionadas. Por ejemplo, dado que la fitorremediación puede operar con un mantenimiento mínimo después de su establecimiento en el campo, la fitorremediación cuesta casi diez veces menos que los métodos basados en ingeniería (Marqués et al., 2009). Blaylock et al. (1997) estimaron el costo para remediar un acre suelos contaminados con Pb suelo, donde se obtuvo que el costo de la fitorremediación representaba entre 50 a 65% menos de costo monetario, comparado con los tratamientos físicos como la excavación. Adicionalmente, también contribuye con el mejoramiento de las condiciones de fertilidad del suelo y tiene menos efectos ambientales adversos en comparación con los procedimientos convencionales.

En cuanto al tiempo requerido los tratamientos físicos son las opciones más efectivas. Aunque los tratamientos químicos pueden suponer otra opción relativamente rápida, realmente depende de las condiciones de lugar en donde se aplique dicho tratamiento. En el caso de la fitorremediación, aquí es donde se tiene la mayor limitación para la remediación de suelos

contaminados con metales pesados, debido a que usualmente se requiere largos períodos de tiempo para rehabilitar completamente los sitios (Bhargava et al., 2012).

Conclusiones

Se encontró que la especie hiperacumuladora *Helianthus annuus* y *Brassica juncea* demostraron óptimas eficiencias de inmovilización de metales pesados como el Pb y Cd por sí solas, sin embargo, ante contaminantes como el Hg y As, aunque presenta cierta capacidad de inmovilización, se puede aumentar significativamente las eficiencias de remoción haciendo uso combinado de fitorremediación con la aplicación asistida de comunidades microbiológicas o acondicionadores en el sistema radicular de las plantas, los cuales ayudan a mejorar dichos procesos de enmienda frente al uso individual de las plantas hiperacumuladoras.

También se encontró que la fitorremediación es una estrategia sostenible para la recuperación de suelos contaminados, ya que, además de acumular o remover en gran medida dichos contaminantes inorgánicos, también contribuye con el mejoramiento de las condiciones del suelo degradado, permitiendo una rehabilitación adecuada sin los efectos adversos que pueden presentar los procedimientos de tratamientos fisicoquímicos, los cuales, en cuánto al factor del tiempo son una mejor alternativa frente a la fitorremediación, estos procesos convencionales se limitan por los costos asociados al uso de tecnología, consumo de energía, tratamientos a grandes extensiones de suelos contaminados y uso de personal capacitado, pero a su vez, pueden presentar una recuperación lenta de las condiciones ideales del suelo, sea por el uso de aditivos químicos, o sea por las condiciones físicas resultantes en los suelos.

La fitorremediación presenta el potencial adecuado por el bajo impacto ambiental y económico que conlleva su implementación, sin embargo, más allá de indicar la teoría y resultados de otras investigaciones sobre la fitorremediación como enmienda efectiva para reducir las concentraciones de metales pesados en la matriz suelo, en Colombia se hace necesario realizar más experimentación, y así, desarrollar más proyectos pilotos que puedan facilitar soluciones de

enmienda en los lugares donde está presenta la afectación ambiental, como en las zonas próximas a minas de extracción aurífera y plata que aportan altas cantidades de mercurio al ambiente, tal como se encontró en gran medida para la región Andina, donde se tiene un aporte del 85% de vertimientos de mercurio al agua y suelo, frente a las demás regiones del país.

Referencias

- Abou-Shanab, R. A. I., Mathai, P. P., Santelli, C. y Sadowsky, M. J. (2020). Indigenous soil bacteria and the hyperaccumulator *Pteris vittata* mediate phytoremediation of soil contaminated with arsenic species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 195, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110458>
- Adriano, D. C. (2001). Biogeochemical Processes Regulating Metal Behavior. En D. C. Adriano, (Ed.), *Trace Elements in Terrestrial Environments* (2da Ed., Vol. 1), 29–60. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Alahabadi, A., Ehrampoush, M. H., Miri, M., Ebrahimi Aval, H., Yousefzadeh, S., Ghaffari, H. R., Ahmadi, E., Talebi, P., Fahabadi, Z. A., Babai, F., Nikonahad, A., Sharafi, K. y Hosseini-Bandegharai, A. (2017). A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air. *Chemosphere*, 172, 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.045>
- Ali, H., Khan, E. y Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Alloway, B. J. (1995). *Heavy Metals in Soils*. Blackie Academic, Glasgow.
- Álvarez Pérez, I. y Sánchez Farfán, R. A. (2019). *Prueba piloto para la fito extracción de cadmio usando Helianthus annuus en un suelo proveniente de la vereda El Zaden – Mesitas del Colegio* [Tesis de Pregrado, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2157&context=ing_ambiental_s
anitaria

- Arthington, J. D. (2013). *Trace Mineral Nutrition and Immune Competence in Cattle*. University of Florida – Institute of Food and Agricultural Sciences.
<https://docs.ufpr.br/~freitasjaf/artigos/simposioflorida/Arthington1.pdf>
- Ashraf, A., Bibi, I., Niazi, N. K., Ok, Y. S., Murtaza, G., Shahid, M., Kunhikrishnan, A., Li, D. y Mahmood, T. (2016). Chromium (VI) sorption efficiency of acid-activated banana peel over organo-montmorillonite in aqueous solutions. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 605–613. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1256372>
- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S. y Asghar, H. N. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 714–727.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Audet, P. y Charest, C. (2007). Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. *Environmental Pollution*, 147(1), 231–237.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.011>
- Austruy, A., Shahid, M., Xiong, T., Castrec, M., Payre, V., Niazi, N. K., Sabir, M. y Dumat, C. (2014). Mechanisms of metal-phosphates formation in the rhizosphere soils of pea and tomato: environmental and sanitary consequences. *Journal of Soils and Sediments*, 14(4), 666–678. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0862-z>
- Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders -strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643–654.
<https://doi.org/10.1080/01904168109362867>
- Baker, A. J. M. y McGrath, S. P. (1991). In situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal accumulating plants—a feasibility study. En R. E. Hinchey y R. F.

- Olfenbittel (Eds.), *In Situ Bioreclamation: Applications and Investigations for Hydrocarbon and Contaminated Site Remediation* (1era Ed.), 600–605. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-9301-1.50049-4>
- Baker, A.J.M. y Brooks, R.R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1, 81–126. <https://tinyurl.com/y6lnbuuf>
- Bayón Sanz, S. (2015). *Aplicación de la Fitorremediación a Suelos Contaminados por Metales Pesados* [Tesis de Pregrado, Universidad Complutense].
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/BAY%C3%93N%20SANZ,%20SARA.pdf>
- Beltrán Villavicencio, M. (2001). *Fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. <http://hdl.handle.net/11191/185>
- Beltrán-Pineda, M. E. y Castellanos Roza, J. (2016). *Manual de prácticas de laboratorio de Microbiología Ambiental*. Universidad De Boyacá. <https://tinyurl.com/yxlyssce>
- Beltrán-Pineda, M. E. y Gómez-Rodríguez, A. M. (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>
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M. y Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.002>

- Blaylock, M. J., Salt, D. E., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnik, Y., Ensley, B. D. y Raskin, I. (1997). Enhanced Accumulation of Pb in Indian Mustard by Soil-Applied Chelating Agents. *Environmental Science & Technology*, 31(3), 860–865.
<https://doi.org/10.1021/es960552a>
- Bolan, N.S., Choppala, G., Kunhikrishnan, A., Park, J.H. y Naidu, R. (2013). Microbial transformation of trace elements in soils in relation to bioavailability and remediation. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 225, 1–56.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6470-9_1
- Bradl, H. B., Kim, C., Kramar, U. y Stüben, D. (2005). Interactions of heavy metals. En H. B. Bradl (Ed.), *Heavy Metals in the Environment: Origin, Interaction and Remediation* (1era Ed., Vol.6), 28–164. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(05\)80021-3](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(05)80021-3)
- Brunton, L. L., Hilal-Dandan, R. y Knollmann, B. C. (2018). *Goodman & Gilman's: The Pharmacological Basis of Therapeutics* (13th Ed.). McGraw-Hill Education.
<https://accessmedicine.mhmedical.com/book.aspx?bookID=2189>
- Bueno, A., Villegas, J. L. y Meza, D. C. (2018). *Evaluación de la presencia de metales pesados (Cd, Pb, Ni y Hg) en suelo y material vegetal de la Universidad Tecnológica de Pereira* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira].
<http://hdl.handle.net/11059/10466>
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su Relación con los Servicios Ecosistémicos y la Seguridad Alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124.
<https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

- Carpena, R. O. y Pilar Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Revista Ecosistemas*, 16(2), 1–3.
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/123>
- Carvalho Dos Santos, M. y Lenzi, E. (2000). The Use of Aquatic Macrophytes (*Eichhornia Crassipes*) as a Biological Filter in the Treatment of Lead Contaminated Effluents. *Environmental Technology*, 21(6), 615–622. <https://doi.org/10.1080/09593332108618080>
- Cassina, L., Tassi, E., Pedron, F., Petruzzelli, G., Ambrosini, P., & Barbaferi, M. (2012). Using a plant hormone and a thioligand to improve phytoremediation of Hg-contaminated soil from a petrochemical plant. *Journal of Hazardous Materials*, 231–232, 36–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.031>
- Caviedes, D. I., Muñoz, R. A., Perdomo, A., Rodríguez, D. y Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73–90.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290>
- Cepeda Hernández, I. K. (2018). *Determinación de la Capacidad Bioremediadora de las Especies baccharis latifolia (ruiz & pav.) pers y verbesina crassiramea s.f. blake Sobre Suelos Contaminados con Arsénico* [Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/15324>
- Chaberek, S y Martell, A. E. (1959). *Organic sequestering agents*. John Wiley & Sons
- Chamba, I., Gazquez, M. J., Selvaraj, T., Calva, J., Toledo, J. J. y Armijos, C. (2016). Selection of a suitable plant for phytoremediation in mining artisanal zones. *International Journal of Phytoremediation*, 18(9), 853–860. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1156638>

- Chamba, I., Rosado, D., Kalinhoff, C., Thangaswamy, S., Sánchez-Rodríguez, A. y Gazquez, M. J. (2017). Erato polymnioides – A novel Hg hyperaccumulator plant in ecuadorian rainforest acid soils with potential of microbe-associated phytoremediation. *Chemosphere*, 188, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.160>
- Chandra, R. y Kumar, V. (2018). Phytoremediation: A Green Sustainable Technology for Industrial Waste Management. En R. Chandra, N. Dubey y V. Kumar (Eds.), *Phytoremediation of Environmental Pollutants* (1era ed.), 1–42. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781315161549>
- Chen, B., Christie, P. y Li, X. (2001). A modified glass bead compartment cultivation system for studies on nutrient and trace metal uptake by arbuscular mycorrhiza. *Chemosphere*, 42(2), 185–192. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(00\)00124-7](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(00)00124-7)
- Cherian, S. y Oliveira, M. M. (2005). Transgenic Plants in Phytoremediation: Recent Advances and New Possibilities. *Environmental Science and Technology*, 39(24), 9377–9390. <https://doi.org/10.1021/es051134l>
- Cordero Casallas, J. K. (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)* [Tesis de Pregrado, Universidad Libre]. <http://hdl.handle.net/10901/7958>
- Covarrubias, S. A. y Peña, J. J. (2017). Contaminación Ambiental por Metales Pesados en México: Problemática y Estrategias de Fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7–21. <http://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Dar, M. I., Khan, F. A., Rehman, F., Masoodi, A., Ansari, A. A., Varshney, D., Naushin, F. y Naikoo, M. I. (2015). Roles of Brassicaceae in Phytoremediation of Metals and

- Metalloids. En A. Ansari, S. Gill, R. Gill, G. Lanza, y L. Newman (Eds.), *Phytoremediation: Management of environmental contaminants* (1era ed., Vol.1), 201–215. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2_14
- De Oliveira, L. M., Ma, L. Q., Santos, J. A. G., Guilherme, L. R. G. y Lessl, J. T. (2014). Effects of arsenate, chromate, and sulfate on arsenic and chromium uptake and translocation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 184, 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.025>
- De Oliveira, L., Maia, R. C. C., Porto, A. L. F., Messias, A. S., Fukushima, K. y De Campos-Takaki, G. M. (2004). Heavy metal biosorption by chitin and chitosan isolated from *Cunninghamella elegans*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 35(3), 243–247. <https://doi.org/10.1590/s1517-83822004000200013>
- De Vos, C. H. R., Schat, H., Waal, M. A. M., Vooijs, R., y Ernst, W. H. O. (1991). Increased resistance to copper-induced damage of the root cell plasmalemma in copper tolerant *Silene cucubalus*. *Physiologia Plantarum*, 82(4), 523–528. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb02942.x>
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R. y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597–612. <https://tinyurl.com/y49petnw>
- Domènech, X. y Peral, J. (2011). *Química ambiental de sistemas terrestre*. Editorial Reverte
- Douay, F., Pruvot, C., Roussel, H., Ciesielski, H., Fourrier, H., Proix, N. y Waterlot, C. (2007). Contamination of Urban Soils in an Area of Northern France Polluted by Dust Emissions

- of Two Smelters. *Water, Air, and Soil Pollution*, 188(1-4), 247–260.
<https://doi.org/10.1007/s11270-007-9541-7>
- Durán, P. (2011). *Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana* [Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona]. <http://hdl.handle.net/10803/970>
- Favas, P. J. C., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R. y Paul, M. S. (2014). Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora. En M. C. Hernández Soriano (Ed.), *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* (1era Ed.), 485–517. IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/57469>
- Fergusson, J. E. (1990). *The heavy metals: chemistry, environmental impact and health effects* (pp. 382–388). Oxford: Pergamon Press.
- Frankenberger, W. T. y Losi, M. E. (1995). Application of bioremediation in the cleanup of heavy elements and metalloids. En H. D. Skipper y R. F. Turco (Eds.), *Bioremediation: Science and Applications, Soil Science*, 43, 173–210. Soil Science Society of America Inc. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub43.c11>
- Galán Huertos, E. y Romero Baena, A. J. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 5(10), 48–60.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6404529>
- García, C., Moreno, J. L., Hernández, T. y Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125–138.
<http://hdl.handle.net/10261/111812>
- García, I. y Dorronsoro, C. (1999). Contaminación por metales pesados. *Edafología*, 16(2), 95–107. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>

- García, J. S., Gratão, P. L., Azevedo, R. A. y Arruda, M. A. Z. (2006). Metal Contamination Effects on Sunflower (*Helianthus annuus L.*) Growth and Protein Expression in Leaves During Development. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8623–8630. <https://doi.org/10.1021/jf061593l>
- Garzón, J. M., Rodríguez, J. P. y Hernández, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309–318. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>
- Ghosh, M. y Singh, S. P. (2005). A Review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1–18. https://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018
- González Pérez, L. E. (2020). *Fitorremediación a Escala Piloto de Suelos Contaminados con Mercurio y Cobre Usando Jatropha Curcas L en Zona Minera El Alacrán* [Tesis de Maestría, Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/3405>
- González, J. D. (2010). *Fitorremediación: Una Herramienta Viable para la Descontaminación de Aguas y Suelos* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/19276>
- Guo, X., Wei, Z., Wu, Q., Li, C., Qian, T. y Zheng, W. (2016). Effect of soil washing with only chelators or combining with ferric chloride on soil heavy metal removal and phytoavailability: Field experiments. *Chemosphere*, 147, 412–419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.087>

- Han, F. X., Banin, A., Kingery, W. L., Triplett, G. B., Zhou, L. X., Zheng, S. J. y Ding, W. X. (2003). New approach to studies of heavy metal redistribution in soil. *Advances in Environmental Research*, 8(1), 113–120. [https://doi.org/10.1016/s1093-0191\(02\)00142-9](https://doi.org/10.1016/s1093-0191(02)00142-9)
- Hartman, W. J. (1975). *An evaluation of land treatment of municipal wastewater and physical siting of facility installations*. US Department of army. <https://tinyurl.com/y4tcsn9v>
- Hernández Bringas. (2006). *Fitoextracción de metales pesados Cromo, Plomo y Arsénico contenidos en lodos residuales de las lagunas facultativas de la PTAR Covicorti-Trujillo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]
- Hincapie Morales, W. (2019). *Análisis de la Disponibilidad de Metales Pesados en la Fase Sólida del Suelo del Agroecosistema en Aquitania, Boyacá* [Tesis de pregrado, Universidad De La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1148
- Incignares, L. J. y Trujillo, D. E. (2015). *Relación de Contaminación del Embalse del Muña, con el Turismo en el Municipio de Sibaté* [Tesis de pregrado, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. <http://hdl.handle.net/10656/3630>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. IDEAM. Recuperado el 14 de noviembre del 2020 de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM. Recuperado el 14 de noviembre del 2020 de http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- Intawongse, M. y Dean, J. R. (2006). Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Additives and Contaminants*, 23(1), 36–48. <https://doi.org/10.1080/02652030500387554>

- Jadia, C. D. y Fulekar, M. H. (2008). Phytotoxicity and remediation of heavy metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in soil-vermicompost media. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 2(3), 141–151. <https://tinyurl.com/y6z8klwv>
- Jara-Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M. y Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, 21(2), 145–154. <https://doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817>
- Jun, L., Wei, H., Aili, M., Juan, N., Hongyan, X., Jingsong, H., Yunhua, Z. y Cuiying, P. (2020). Effect of lychee biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil using sunflower: A field experiment. *Environmental Research*, 188, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109886>
- Kathal, R., Malhotra, P. y Chaudhary, V. (2016). Phytoremediation of Cadmium from Polluted Soil. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 07(06), 1–3. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000376>
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I. y Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247–268. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>
- Khan, A., Khan, S., Khan, M. A., Qamar, Z. y Waqas, M. (2015). The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 22(18), 13772–13799. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4881-0>
- Kinnersley, A. M. (1993). The role of phytochelates in plant growth and productivity. *Plant Growth Regulation*, 12(3), 207–218. <https://doi.org/10.1007/bf00027200>

- Kotrba, P., Najmanova, J., Macek, T., Ruml, T. y Mackova, M. (2009). Genetically modified plants in phytoremediation of heavy metal and metalloids soil and sediment pollution. *Biotechnology Advances*, 27(6), 799–810.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.06.003>
- Kumar Yadav, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L. M., Singh, N., Rezaia, S. y Ahmad Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering*, 120, 274–298.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>
- Lanphear, B. P., Dietrich, K., Auinger, P. y Cox, C. (2000). Cognitive deficits associated with blood lead concentrations <10 microg/dL in US children and adolescents. *Public Health Report*, 115, 521–529. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1308622/>
- Lasat, M.M., (2000). Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *Journal of Hazardous Substance Research*, 2, 1–25. <https://doi.org/10.4148/1090-7025.1015>
- Liang, J., Fang, H. L., Zhang, T. L., Wang, X. X. y Liu, Y. D. (2017). Heavy metal in leaves of twelve plant species from seven different areas in Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.006>
- Limmer, M. y Burken, J. (2016). Phytovolatilization of Organic Contaminants. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 6632–6643. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04113>
- Lizarbe Asmat, K. Y. y Rivera López, Y. S. (2013). *Optimización del crecimiento del Heliantus annuus (Girasol) para la fitoextracción de plomo, zinc y cadmio para relaves minero artesanal del caserío de Zarumilla, Patatez* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3201>

- Lizarbe Asmat, K. Y., Rivera López, Y. S., Mendoza Bobadilla, J. L., Vera Herrera, M. y Rodríguez Espinoza, R. F. (2016). Fitoextracción De Plomo, Zinc y Cadmio de Relaves Mineros Utilizando *Helianthus annuus L.* (Girasol). *Infinitum...*, 6(2), 74–79.
<http://revistas.unjfsc.edu.pe/index.php/INFINITUM/article/view/38/37>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T. y Muñoz Garcia, F. G. (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\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T. y Muñoz-Garcia, F. G. (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\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Lone, M. I., He, Z., Stoffella, P. J. y Yang, X. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9(3), 210–220. <https://doi.org/10.1631/jzus.b0710633>
- Lu, P., Nuhfer, N. T., Kelly, S., Li, Q., Konishi, H., Elswick, E. y Zhu, C. (2011). Lead coprecipitation with iron oxyhydroxide nano-particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(16), 4547–4561. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.05.035>
- Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M. K., Lahori, A. H., Wang, Q., Li, R. y Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>

- Mahimairaja, S., Bolan, N.S., Adriano, D. y Robinson, B. (2005). Arsenic contamination and its risk management in complex environmental settings. *Advance in Agronomy*, 86, 1–82.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86001-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86001-8)
- Mallampati, S. R., Mitoma, Y., Okuda, T., Simion, C. y Lee, B. K. (2015). Dynamic immobilization of simulated radionuclide ¹³³ Cs in soil by thermal treatment/vitrification with nanometallic Ca/CaO composites. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.10.006>
- Mallick, N. (2003). World Journal of Microbiology and Biotechnology. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 19(7), 695–701.
<https://doi.org/10.1023/A:1025104918352>
- Manoj, S. R., Karthik, C., Kadirvelu, K., Arulselvi, P. I., Shanmugasundaram, T., Bruno, B. y Rajkumar, M. (2020). Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review. *Journal of Environmental Management*, 254, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109779>
- Mantilla-Villarreal, A., Fontalvo, J. M., Velasco-Bayuelo, C. A., Gregory, J. A., Rodelo-Salcedo, E., de la Rosa Barranco, D. y Caballero-Uribe, C. V. (2010). Guía práctica para publicar un artículo en revistas latinoamericanas. *Salud Uninorte*, 26(2), 311–324.
<https://tinyurl.com/y2vffsfu>
- Mantoura, R. F. C. (1981). Organo-Metallic Interactions in Natural Waters. En E. K. Duursma y R. Dawson (Eds.), *Marine Organic Chemistry: Evolution, Composition, Interactions and Chemistry of Organic Matter in Seawater* (Vol. 31), 179–223. Elsevier Science Ltd.
[https://doi.org/10.1016/s0422-9894\(08\)70329-5](https://doi.org/10.1016/s0422-9894(08)70329-5)

- Marqués, A. P. G. C., Rangel, A. O. S. S. y Castro, P. M. L. (2009). Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-Up Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(8), 622–654. <https://doi.org/10.1080/10643380701798272>
- Marrero-Coto, J., Amores-Sánchez, I. y 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(3),52–61. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223124988007>
- Martínez Sepúlveda, J. A. y Casallas, M. R. (2018). *Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro*. Ediciones EAN. <https://doi.org/10.21158/9789587565836>
- Mason, R. (2015). Geomicrobiology of Mercury. En H. L. Ehrlich (Ed.), *Geomicrobiology* (6ta ed), 323–335. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19121>
- McGrath, S. P., Zhao, J. y Lombi, E. (2002). Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. *Advances in Agronomy*, 1–56. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(02\)75002-](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(02)75002-)
- Mejía Domínguez, C. M. (2011). *Metales Pesados en Suelos y Plantas: Contaminación y Fitotoxicidad*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Recuperado el 12 de noviembre de 2020 de <https://issuu.com/adolfosantos3/docs/metales-pesados-en-suelos-y-plantas>
- Menzies, N. (2006). Redox Processes and Attenuation of Metal Availability in Soils. En R. Hamon, M. McLaughlin y E. Lombi (Eds.), *Natural Attenuation of Trace Element*

- Availability in Soils* (1era Ed), 137–156. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420042832>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2012). *Estudio de los conflictos de uso del territorio Colombiano. Escala 1:100.000*. MINAGRICULTURA.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12723>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
http://www.andi.com.co/Uploads/8.%20Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*.
https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislati%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf
- Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G. y Zurita, J. (2011). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(2), 180–191.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2008v2i2.1186>
- Munive Cerrón, R., Gamarra Sánchez, G., Munive Yachachi, Y., Puertas Ramos, F., Valdiviezo Gonzales, L. y Cabello Torres, R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y

- vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 1(2), 177–186.
<https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.04>
- Naidu, R., Kookana, R.S., Sumner, M.E., Harter, R.D. y Tiller, K.G. (1997). Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review. *Journal of Environmental Quality*, 26, 602–617. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030004x>
- Nava-Ruíz, C. y Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16(3), 140–147.
<https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=32546#>
- Nikolić, M. y Stevović, S. (2015). Family Asteraceae as a sustainable planning tool in phytoremediation and its relevance in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 782–789. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.002>
- Ok, Y.S., Oh, S.E., Ahmad, M., Hyun, S., Kim, K.R., Moon, D.H., Lee, S.S., Lim, K.J., Jeon, W.T. y Yang, J.E. (2010). Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1301–1308.
<https://doi.org/10.1007/s12665-010-0674-4>
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. y Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. *Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía*.
<https://www.virtualpro.co/biblioteca/tecnicas-de-recuperacion-de-suelos-contaminados>
- Padmavathiamma, P. K. y Li, L. Y. (2007). Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1-4), 105–126.
<https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>

- Park, B. y Son, Y. (2017). Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 640–645.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.002>
- Patra, D. K., Pradhan, C. y Patra, H. K. (2020). Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: Concept, challenges, opportunities and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 100672.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100672>
- Peris Mendoza, M. (2005). *Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón* [Tesis Doctoral, Universitat de Valencia].
<http://hdl.handle.net/10550/15104>
- Pinto, A. P., De Varennes, A., Fonseca, R. y Martins, D. (2015). Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals: Techniques and Strategies. En A. Ansari, S. Gill, R. Gill, G. Lanza, y L. Newman (Eds.), *Phytoremediation: Management of environmental contaminants, volume 1* (1era ed., Vol.1), 133–155. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2>
- Polo, M. J., García-Baquero, E. D., y Giráldez, J.V. (2003). *Lixiviación de Metales desde Puntos con Contaminación Residual en la Cuenca del Guadiana*, 1-9. Recuperado el 13 de noviembre del 2020 de <https://tinyurl.com/y2nfqe62>
- Prasad, M.N.V. y Freitas, H. (2003). Metal hyperaccumulation in plants-biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6, 275–321.
<https://doi.org/10.2225/vol6-issue3-fulltext-6>
- Provenzale, J. M. (2007). Ten Principles to Improve the Likelihood of Publication of a Scientific Manuscript. *AJR*, 188, 1179–1182. <https://doi.org/10.2214/AJR.06.1003>

- Rascio, N. y Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?. *Plant Science*, 180(2), 169–181.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
- Raskin, I., Smith, R. D. y Salt, D. E. (1997). Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 8(2), 221–226.
[https://doi.org/10.1016/s0958-1669\(97\)80106-1](https://doi.org/10.1016/s0958-1669(97)80106-1)
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz-Lagos, M. y González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16 (2), 66-77.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Rezania, S., Taib, S. M., Md Din, M. F., Dahalan, F. A. y Kamyab, H. (2016). Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 587–599.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.053>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. FAO. <http://www.fao.org/tenure/resources/results/card/es/c/I9183ES/>
- Rosestolato, D., Bagatin, R. y Ferro, S. (2015). Electrokinetic remediation of soils polluted by heavy metals (mercury in particular). *Chemical Engineering Journal*, 264, 16–23.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.074>
- Sabir, M., Waraich, E. A., Hakeem, K. R., Öztürk, M., Ahmad, H. R. y Shahid, M. (2015). Phytoremediation. *Soil Remediation and Plants*, 85–105. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-799937-1.00004-8>

- Sahuquillo, A. (2003). Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22(3), 152–159. [https://doi.org/10.1016/s0165-9936\(03\)00303-0](https://doi.org/10.1016/s0165-9936(03)00303-0)
- Sakakibara, M., Watanabe, A., Inoue, M., Sano, S., Kaise, T., (2010). Phytoextraction and phytovolatilization of arsenic from As-contaminated soils by *Pteris vittata*. *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy*. 12, 26. <https://scholarworks.umass.edu/soilsproceedings/vol12/iss1/26/>
- Sauvé, S., Hendershot, W., y Allen, H. E. (2000). Solid-Solution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 34(7), 1125–1131. <https://doi.org/10.1021/es9907764>
- Shah, V. y Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>
- Shahid, M., Pinelli, E. y Dumat, C. (2012). Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. *Journal of Hazardous Materials*, 219–220, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.060>
- Shahid, M., Pinelli, E., Pourrut, B. y Dumat, C. (2014). Effect of organic ligands on lead-induced oxidative damage and enhanced antioxidant defense in the leaves of *Vicia faba* plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.008>

- Silva, S. M. y Correa, F. J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13–34.
<https://tinyurl.com/y62gd2dk>
- Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). (2018). Unidad de Planeación Minero-Energética UPME, Sistema de Información Minero Colombiano SIMCO. Recuperado de <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
<http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/plata.aspx>
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry genesis, composition, reactions*. (2da Ed). J Wiley.
- Šyc, M., Pohořelý, M., Kameníková, P., Habart, J., Svoboda, K. y Punčochář, M. (2012). Willow trees from heavy metals phytoextraction as energy crops. *Biomass and Bioenergy*, 37, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.025>
- Sylvain, B., Mikael, M.-H., Florie, M., Emmanuel, J., Marilyne, S., Sylvain, B. y Domenico, M. (2016). Phytostabilization of As, Sb and Pb by two willow species (*S. viminalis* and *S. purpurea*) on former mine technosols. *CATENA*, 136, 44–52.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.008>
- Thakur, S., Singh, L., Wahid, Z. A., Siddiqui, M. F., Atnaw, S. M. y Din, M. F. M. (2016). Plant-driven removal of heavy metals from soil: uptake, translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4).
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5211-9>
- Thakur, S., Singh, L., Wahid, Z. A., Siddiqui, M. F., Atnaw, S. M. y Din, M. F. M. (2016). Plant-driven removal of heavy metals from soil: uptake, translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5211-9>

- Thangavel, P. y Subbhuraam, C. (2004). Phytoextraction: role of hyperaccumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 1, 109–130.
https://insa.nic.in/writereaddata/UpLoadedFiles/PINSA/Vol70B_2004_1_Art07.pdf
- Velásquez, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151–167.
<https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- Vishnoi, S.R. y Srivastava, P. N. (2008). Phytoremediation-green for environmental clean.. *The 12th World Lake Conf.*, 1016–1021.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Phytoremediation-Green-for-Environmental-Clean-Vishnoi-Srivastava/200278fa62278df0aa20093d1d03d45abbbd6b17>
- Wasson, S. J., Linak, W. P., Gullett, B. K., King, C. J., Touati, A., Huggins, F. E., Chen, Y., Shah, N. y Huffman, G. P. (2005). Emissions of Chromium, Copper, Arsenic, and PCDDs/Fs from Open Burning of CCA-Treated Wood. *Environmental Science & Technology*, 39(22), 8865–8876. <https://doi.org/10.1021/es050891g>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S. y Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Yao, Z., Li, J., Xie, H. y Yu, C. (2012). Review on Remediation Technologies of Soil Contaminated by Heavy Metals. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 722–729.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.099>

- Young, S. D. (2013). Chemistry of heavy metals and metalloids in soils. En B. J. Alloway (Ed.), *Heavy Metals in Soils* (3ra Ed., Vol. 22), 51–96. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Zamora, F., Rodriguez, N., Torres, D. y Yendis, H. (2008). Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro*, 20(3), 193–199. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000300006
- Zheng, C. y Wang, P. P. (2002). A Field Demonstration of the Simulation Optimization Approach for Remediation System Design. *The Groundwater Association*, 40(3), 258–266. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02653.x>
- Zhu, L., Ding, W., Feng, L., Kong, Y., Xu, J. y Xu, X. (2012). Isolation of aerobic denitrifiers and characterization for their potential application in the bioremediation of oligotrophic ecosystem. *Bioresource Technology*, 108, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.033>

Apéndice. Mapa de Vertimientos Estimados de Hg por Departamentos en Colombia

