



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Aplicación de Plantas Hiperacumuladoras Para el Tratamiento de
Suelos Contaminados con Metales Pesados por Actividades
Mineras en Latinoamérica: Revisión Sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES:

Tejada Pacho, Michelle Gabriela (ORCID: 0000-0002-1410-886X)

Zeballos Flores, Gonzalo Roice (ORCID: 0000-0003-0877-2163)

ASESOR:

Mgtr. Reyna Mandujano, Samuel Carlos (ORCID: 0000-0002-0750-2877)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA - PERÚ

2021

DEDICATORIA

Michelle Tejada:

El esfuerzo realizado en este trabajo se lo dedico a mi abuelita: ALICIA HURTADO, quien es mi mayor ejemplo de bondad, solidaridad y amor que puedo tener a pesar de no estar en este mundo; así mismo, a mi tío EFRAÍN TEJADA, cuando él estuvo en este plano terrenal siempre me impulsó a realizar esta tesis incentivándome con apuestas y mucha insistencia.

Gonzalo Zeballos:

Dedico este trabajo a mi abuelo, siempre lo tengo presente a donde voy; pero especialmente dedico este trabajo a la persona a quien un día le prometí que me titularía y esa persona es mi abuela: DORA MANCHEGO, sé que en donde se encuentre, ella se siente orgullosa del nieto que tiene y de que hoy por hoy este logrando mis metas, un saludo hasta el cielo y que cada cosa que hago la llevo en mi mente y en mi corazón, te amo abuelita.

AGRADECIMIENTOS

Michelle Tejada:

¡Gracias Dios! Por salvarme de tantos accidentes y permitirme vivir aún. Sigo con mis padres OLGA PACHO y ALONSO TEJADA quienes con poco o mucho han apostado por mí siempre, me han guiado y acompañado todos estos años; el amor que me dan me hace más fuerte, son increíbles, los amo. Y no menos importante, a mi abuelo LEONIDAS TEJADA, quien siempre ha estado cuando más lo he necesitado, me ha alentado y ha estado orgulloso de cada logro que he obtenido. ¡Te amo pá!

Gonzalo Zeballos:

Este trabajo va en agradecimiento a esa persona que siempre está conmigo en las buenas pero sobre todo en las malas, que es mi madre MARINA FLORES MANCHEGO, gracias por siempre estar a mi lado y nunca dejarme caer, hoy por hoy soy lo que soy gracias a ti, te amo mucho madre, en segundo lugar quiero agradecer a mi hermana CARLA CASTILLO, quien es uno de mis pilares en mi vida ya que siempre me apoyo en todo sentido, este trabajo va para ti hermanita linda, y finalizando quiero agradecer a mi padre ROICE ZEBALLOS quien a pesar de todo lo que pudo pasar en la vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS	vi
ÍNDICE. DE ABREVIATURAS.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA.....	12
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	12
3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización	12
3.3 Escenario de estudio.....	14
3.4 Participantes	14
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	14
3.6 Procedimientos	15
3.7 Rigor científico.....	16
3.8 Método de análisis de información	17
3.9 Aspectos éticos	17
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
V. CONCLUSIONES	31
VI. RECOMENDACIONES.....	32
REFERENCIAS.....	33
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de la toxicidad de metales pesados	6
Tabla 2: Antecedentes de los tipos de plantas hiperacumuladoras	11
Tabla 3: Categorización apriorística	13
Tabla 4: Métodos de aplicación	19
Tabla 5: Capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras	23
Tabla 6: Tipos de plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados por actividad minera	28

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS

Figura N°1: Vía de la fuente de metales pesados y exposición humana.....	8
FiguraN° 2: Mecanismos implicados en la hipertolerancia a los metales pesados en la distribución de los mismos en una planta excluidora no hiperacumuladora (izquierda) y en una hiperacumuladora (derecha)	10
Gráfico N°1: Procedimiento	24

ÍNDICE. DE ABREVIATURAS

MP: Metales pesados

EDTA: El ácido etilendiaminotetraacético

ADN: Ácido desoxirribonucleico

HA: Hiperacumuladoras

CE: Conductividad eléctrica

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación está enfocado en determinar de qué manera las plantas hiperacumuladoras inciden en el suelo contaminado por metales pesados en Latinoamérica, los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras, la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesado y los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica.

En la cual, después de la revisión de diversas literaturas enfocadas a la Aplicación de plantas hiperacumuladoras para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados por actividades mineras en Latinoamérica, se obtuvo que los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados por actividad minera a nivel de Latinoamérica el 85% emplean la Fito-Extracción, mientras que el 15% la técnica de digestión por vía seca, la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados varia en un promedio del 75%-95%, siendo considerados en una sub categoría alta y por último los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica, son las especies Poaceae y Asteraceae; debido a su poder de acumulación y tolerancia al crecimiento en suelos mineros.

Palabras Claves: Plantas hiperacumuladoras, metales pesados, actividad minera, Latinoamérica.

ABSTRACT

The objective of this research is focused on determining how hyperaccumulator plants affect soil contaminated by heavy metals in Latin America, the most used methods for the application of hyperaccumulator plants, the adsorption capacity of hyperaccumulator plants in soils contaminated with heavy metals and the types of hyperaccumulator plants most used in the treatment of contaminated soils in Latin America.

In which, after the review of several literatures focused on the application of hyperaccumulator plants for the treatment of soils contaminated with heavy metals due to mining activities in Latin America, it was obtained that the most used methods for the application of hyperaccumulator plants in soils contaminated by mining activities in Latin America 85% use Phyto-Extraction, The adsorption capacity of hyperaccumulator plants in soils contaminated with heavy metals varies in an average of 75%-95%, being considered in a high sub-category, and finally, the types of hyperaccumulator plants most used in the treatment of contaminated soils in Latin America are the Poaceae and Asteraceae species; due to their power of accumulation and tolerance to growth in mining soils.

Key words: Hyperaccumulator plants, heavy metals, mining activity, Latin America.

I. INTRODUCCIÓN

La civilización moderna depende completamente de una gran variedad de metales para todos los aspectos de la vida cotidiana; sin embargo, debido a la minería, los minerales, la fundición y la industria del curtido, la contaminación por metales pesados (MP) se ha convertido en algo serio; no sólo afectando a la producción y la calidad de los cultivos, sino que también influye en la calidad de la atmósfera, los cuerpos de agua, y amenaza la salud y vida de los animales y seres humanos (Kasassi et al., 2008, p.2).

Estos contaminantes inorgánicos se están desechando en nuestras aguas, suelos y en la atmósfera debido al rápido crecimiento de la agricultura y las industrias del metal, quienes generan la eliminación inadecuada de desechos, fertilizantes y pesticidas (Briffa J. et al., 2020, p.1). Entre ellas están, las operaciones de industrialización, como las industrias de fundición de metales, las industrias de pintura, los astilleros de desguace de barcos, minerías y agricultura que generan concentraciones de minerales y eliminación de residuos que contribuyen a la contaminación del suelo presentando niveles elevados de metales pesados (Jung M., 2001, p.2).

Los MP aunque son componentes naturales de la corteza terrestre, la preocupación llega cuando superan las concentraciones más altas, debido a que se vuelven tóxicos para las formas de vida (Bhayani et al., 2020, p.3). Siendo considerados entre los contaminantes ambientales más peligrosos, porque no se desintegran con los procesos físicos y, por tanto, permanecen durante mucho tiempo (Kumar et al., 2008, p.1).

De acuerdo al estado de la constante contaminación del suelo, se emplean diversas tecnologías de remediación de suelos contaminados por metales pesados, incluyendo remediación física, remediación química y remediación biológica (Yao et al., 2012, p.1). Estas tecnologías son remediaciones convencionales, que se han empleado durante mucho tiempo para remediar los MP peligrosos, pero también pueden usarse en combinación entre sí para limpiar estos suelos contaminados (Khalid et al., 2017, p.1).

La fitorremediación utiliza plantas y microbios asociados para la limpieza del suelo, al ser una tecnología verde, es rentable y respetuosa con el medio ambiente; dentro de ellas se encuentran las plantas hiperacumuladoras, que presentan una capacidad excepcional en la acumulación de MP (Tu et al., 2004, p.2).

También, se han utilizado especies de plantas hiperacumuladoras estrechamente relacionadas para evaluar su capacidad en la acumulación de metales debido a su eficiencia en la acumulación, que tienen potencial para remediar suelos contaminados; sin embargo, hay pruebas limitadas para demostrar que las especies de plantas estrechamente relacionadas tienen una capacidad similar en la acumulación de metales (Xu et al., 2020, p.1).

La selección de plantas hiperacumuladoras eficientes es importante para la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados; debido a ello y a la problemática expuesta anteriormente se realizamos el presente trabajo con la finalidad de dar a conocer la importancia de la aplicación de plantas hiperacumuladoras en el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados.

Sobre la base de realidad problemática se planteó el problema general y problemas específicos de la investigación. El problema principal de la investigación: **¿De qué manera las plantas hiperacumuladoras inciden en el suelo contaminado por metales pesados en Latinoamérica?**, mientras que los problemas específicos son: **¿Cuáles son los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras?**, **¿Cuál es la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados?**, **¿Cuáles son los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica?**

Del mismo modo, se determina como objetivo principal de la investigación: **Determinar de qué manera las plantas hiperacumuladoras inciden en el suelo contaminado por metales pesados en Latinoamérica**, Así mismo los objetivos específicos propuestos fueron: **Analizar los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras**, **Definir la capacidad de adsorción de las plantas**

hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados, Determinar los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica.

La presente investigación se justifica en la búsqueda y recolección de información a nivel de Latinoamérica para dar a conocer la aplicación de las plantas hiperacumuladoras en el tratamiento de suelos contaminación con metales pesados con actividades mineras, para así servir como base de información actualizada para futuros investigadores.

II. MARCO TEÓRICO

Desde mediados del siglo XIX, la creciente actividad de las fábricas de acero y hierro en los países industrializados y naciones industrializadas generó grandes cantidades de residuos de fundición, que generalmente se depositaban en los lugares de producción o cerca de ellos, aunque, estos residuos contienen altos niveles de metales pesados (por ejemplo, Pb, Cr, Ni, Zn, Cu) la mayoría de los antiguos vertederos de residuos metalúrgicos, que pueden extenderse por varias hectáreas, se abandonan sin mayores medidas de seguridad (Remon et al., 2005, p.2). Sin embargo, en las zonas urbanas, los metales pesados y los metaloides pueden proceder de diversas fuentes como las actividades industriales, la generación de energía, la minería, la fundición, los vertidos de residuos o la combustión de combustibles fósiles y la eliminación de residuos (Islam et al., 2019, p.2).

De esta manera se detalla la contaminación del suelo por metales pesados procedentes de las actividades mineras; debido a que se ha convertido en un problema grave por la minería excesiva (He et al., 2021, p.1). La extracción de minerales es una de las prácticas antropogénicas más destructivas para el medio ambiente, especialmente en los países en desarrollo, donde la evaluación correcta de sus impactos en los ecosistemas del suelo requiere una comprensión de la respuesta de las redes tróficas del suelo (Martineza et al., 2018, p.3).

La extracción de minerales, tanto a gran como a pequeña escala, contribuye de forma importante a la economía de muchos países en desarrollo, como por ejemplo, Filipinas, importante exportador de minerales metálicos como el oro cobre, níquel y cromo que mediante la explotación de sus minerales emplean tecnologías que suelen ser peligrosas para el medio ambiente como el recurso suelo; siendo a pesar de su contribución económica, una cuestión muy polarizada debido a la incidencia de la degradación medioambiental y los problemas de salud entre las comunidades expuestas (Heikens et al., 2001, p.1).

Así también en una mina de cobre en los Andes del norte de Perú se presentaron en una investigación altas concentraciones de As y Cu en extractos de suelo (acetato de amonio-EDTA), además del bajo pH y la alta disponibilidad de Al, siendo aparentemente los factores más importantes del suelo que limitan el rendimiento de las plantas (Bech et al., 1997, p.1).

Debido a ello, los metales pesados no solo entran en el agroecosistema por procesos naturales, también por procesos antropogénicos y a diferencia de los contaminantes orgánicos la biodegradación de los metales pesados está fuera de toda duda y por ello se acumulan continuamente en el medio ambiente y su acumulación en el suelo, así como en el recurso hídrico supone una gran amenaza para la salud humana debido al riesgo potencial de su entrada en la cadena alimentaria (Sarwer et al., 2017, p.2).

La contaminación del suelo con metales pesados (loides) persistentes y potencialmente (eco) tóxicos se encuentran omnipresente en todo el mundo; pero la concentración de estos metales pesados (loides) en el suelo ha aumentado drásticamente durante las últimas tres décadas, lo que representa un riesgo para el medio ambiente y la salud humana (Khalid et al., 2020, p.1). Un ejemplo es el aumento de la concentración de Cd en el suelo, el cual es motivo de gran preocupación debido al riesgo de su entrada en la cadena alimentaria (Sarwar et al., 2015, p.2).

La entrada excesiva de metales pesados y metaloides en los suelos urbanos puede provocar el deterioro de la biología y la función del suelo, así como cambios en las propiedades fisicoquímicas del mismo, lo que puede generar otros problemas medioambientales y la función del suelo, cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo que pueden crear otros problemas ambientales (Karim et al., 2014, p.1).

Así también es un problema ambiental grave en el suelo de los humedales, convirtiéndose las características microecológicas de los humedales contaminados con metales pesados en una preocupación pública (Zhang et al., 2016, p.1). De igual manera se encuentra reconocido que la presencia de metales pesados afecta negativamente a las actividades microbianas en los suelos (Enya et al., 2020, p.1).

Como es el caso de la tasa de descomposición de la materia orgánica en el pino silvestre (*Pinus silvestris*) que disminuye con el aumento del nivel de contaminación por metales pesados lo que se traduce en una menor emisión de CO₂ y acumulación de materia orgánica en el suelo (Zwolinski J., 1994, p.2).

Las toxicidades de algunos metales pesados, como el plomo y el arsénico, se han reconocido durante cientos de años, mientras que los peligros de otros, como el cadmio y el berilio solo han sido reconocidos más recientemente, aunque las presentaciones clínicas de las toxicidades de los diferentes metales pueden ser bastante variadas, la mayoría de los metales inducen daño a través de mecanismos similares, ya sea por unión de los metales a enzimas vitales o por sustitución de los metales por otros elementos en reacciones bioquímicas (Gwaltney S.. 2013, p.1).

En la tabla N°1 se detalla los mecanismos de ataque de los metales pesados en los organismos.

Tabla 1: Características de la toxicidad de metales pesados

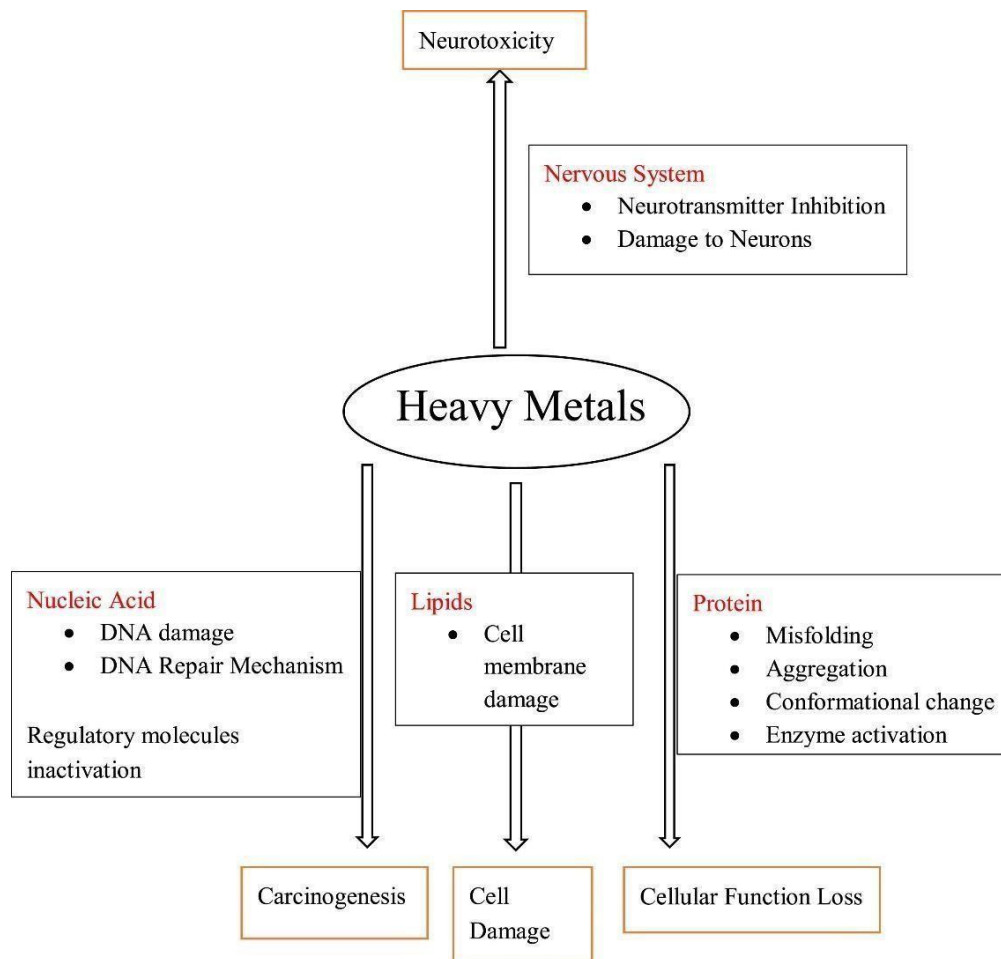
Metal	Mecanismo	Órgano(s)/sistema(s) primario(s) afectado(s)
Antimonio	Inhibición de la enzima mediante la unión de grupos sulfhidrilos	Tracto gastrointestinal
Arsénico	Deterioro de la respiración celular mediante la unión a los grupos sulfhidrilos de las enzimas celulares	Arsénico inorgánico: tracto gastrointestinal, endotelio vascular (agudo); piel, nervios periféricos, hígado (crónico) Fenilares: cerebro, médula espinal, nervios periféricos Arsina: glóbulos rojos
Cadmio	Inhibición enzimática mediante la sustitución del zinc en sistemas metaloenzimáticos; sustitución competitiva del	Tracto gastrointestinal, tracto respiratorio (agudo) Riñón, hueso, testículo (crónico)

	calcio en sistemas metabólicos	
Plomo	Deterioro de las vías metabólicas celulares mediante la unión a grupos sulfhidrilos; agotamiento del glutatión Competencia con los iones de calcio	Sistema nervioso central, tracto gastrointestinal, riñón, glóbulos rojos
Mercurio	Inhibición de la enzima a través de la unión a grupos sulfhidrilos; alteración de los canales de transporte de la membrana; agotamiento del glutatión	Mercurio elemental: tracto respiratorio, riñón (agudo); tracto gastrointestinal, sistema nervioso central (crónico) Mercurio inorgánico: tracto gastrointestinal (agudo), riñón (subagudo), sistema nervioso central (crónico) Mercurio orgánico: sistema nervioso central
Plutonio	Inhibición de enzimas y daños en las membranas mediante la unión a proteínas y fosfolípidos celulares	Riñón, médula ósea
Talio	Sustitución del potasio en los procesos dependientes del mismo, unión a grupos sulfhidrilos en enzimas y proteínas estructurales	Tracto gastrointestinal, riñón, piel
Uranio	Inhibición de enzimas y daños en las membranas mediante la unión a proteínas y fosfolípidos celulares	Riñón

Fuente: Modificado de Osim et al., (2020, p.2)

También, se ha informado que los orgánulos celulares y los componentes de la célula se ven afectados por metales pesados, como las mitocondrias, los núcleos, los lisosomas, la membrana celular y las enzimas; estos iones metálicos interactúan con el ADN y las proteínas nucleares, lo que provoca daños en el ADN, conduciendo a la modulación del ciclo celular, la apoptosis o la carcinogénesis (Briffa et al., 2020, p.4). En la Imagen N°1 se puede ver una ruta que muestra las consecuencias de la contaminación por metales pesados.

Figura N°1: Vía de la fuente de metales pesados y exposición humana



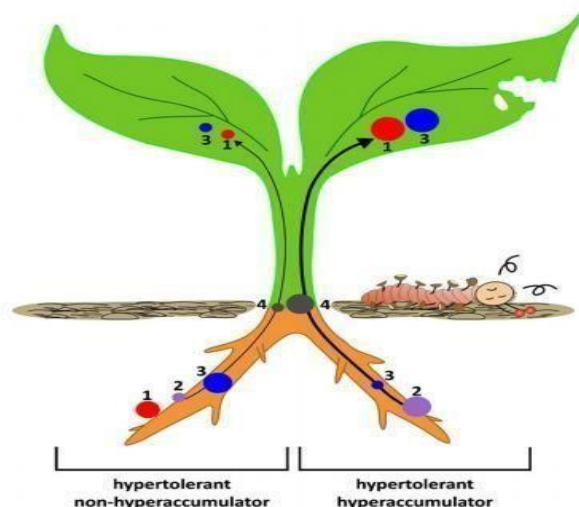
Fuente: Briffa et al., (2020, p.4)

Debido a lo expuesto anteriormente se detalla la hiperacumulación de metales, el cual es un proceso de adaptación entre microbios expuestos a metales pesados y plantas, que requiere interacciones continuas entre los organismos coexistentes (Singh N. y Singh R., 2016, p.1). Esto se da, mediante algunas plantas, llamadas hiperacumuladoras (HA), las cuales son capaces de extraer metales del suelo y almacenarlos en sus tejidos cosechables, a concentraciones de hasta unas decenas de gramos por kilo; siendo esta propiedad aprovechado para recuperar los metales de los suelos y los recursos secundarios (Hazotte et al., 2020, p.1).

La hiperacumulación depende de la especie vegetal, las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica (CE)) y diferentes tipos de metales pesados, donde, la mayor parte de la captación de metales pesados se produce a través de las células de la raíz, en donde se desintoxican mediante la complejación con aminoácidos, ácidos orgánicos o péptidos que se unen a metales, y / o se secuestran en vacuolas (Chaudhary et al., 2016, p.3).

En la Imagen N°2 se muestra las características y comparación de las partes de de una planta hipertolerante hiperacumuladora y una tolerante no hiperacumuladora.

Figura N° 2: Mecanismos implicados en la hipertolerancia a los metales pesados en la distribución de los mismos en una planta excluidora no hiperacumuladora (izquierda) y en una hiperacumuladora (derecha).



Fuente: Extraído de Rascio N. y Navari F., (2011, p.1)

(1) Unión de metales pesados a las paredes celulares y/o a los exudados celulares, (2) absorción por las raíces, (3) quelación en el citosol y/o secuestro en vacuolas, (4) translocación de la raíz al brote. Los puntos indican el órgano de la planta en el que se producen los diferentes mecanismos y los tamaños de los puntos el nivel de cada uno de ellos. Según la hipótesis de la defensa elemental, las altas concentraciones de metales pesados hacen que las hojas hiperacumuladoras sean venenosas para los herbívoros.

Tres características básicas distinguen a los hiperacumuladores de los taxones no hiperacumuladores relacionados: una tasa de absorción de metales pesados muy mejorada, una translocación más rápida de raíz a brote y una mayor capacidad para desintoxicar y secuestrar metales pesados en las hojas (Pandey V. y Bajpai O., 2019, p.1).

De acuerdo a lo expuesto se plasmó en la Tabla 2, 18 de los 30 estudios más resaltantes para exponerlos como antecedentes de acuerdo al metal de extracción.

Tabla 2: Antecedentes de los tipos de plantas hiperacumuladoras

Planta	Metal de extracción	Referencia
<i>Odontarrhena chalcidica</i> , <i>Leptoplax emarginata</i> y <i>Berkheya coddii</i>	Ni	Hazotte et al., 2020
<i>Sedum plumbizincicola</i>	Cd / Zn	Zhang et al., 2021
<i>Alyssum murale</i>	Ni	Cassayre et al., 2020
<i>Solanum nigrum</i> L.	Cd	Teng et al., 2021
<i>Sphagneticola calendulacea</i>	Cd	Lu et al., 2020
<i>Sedum alfredii</i>	Cd	Wu et al., 2020
<i>Pteris vittata</i>	As	Chen et al., 2021
<i>Sedum alfredii</i>	Cd / Zn	Ge et al., 2020
<i>Sedum alfredii</i>	Cd	Wu et al., 2020
<i>Cyphomandra betacea</i> plántulas	Cd	Lin et al., 2018
<i>Odontarrhena chalcidica</i>	Ni	Tognacchini et al., 2020
<i>Pteris vittata</i>	As	Liu et al., 2018
<i>Noccaea caerulescens</i>	Cd / Zn	Hazotte et al., 2017
<i>Pteris vittata</i> Y <i>Arabidopsis bisulcatus</i>	As	Mehdwi C., 2011
<i>Malva rotundifolia</i> , <i>Malva crispa</i> , <i>Sida rhombifolia</i> , <i>Celosia argentea</i> y <i>Celosia cristata</i>	Cd	Wu et al., 2018
<i>Arundo donax</i> L., <i>Morus alba</i> L. y <i>Broussonetia papyrifera</i> L.	As / Cd / Pb / Zn	Zeng et al., 2019
<i>Pteris vittata</i>	As	Liu et al., 2017
<i>Odontarrhena muralis</i>	Ni	Guilpain et al., 2018

Elaboración propia

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación empleada es de tipo aplicada; de acuerdo con Delaney et al., (2010, p.3) la investigación aplicada normalmente pide a los participantes que estudien información nueva y examinen cómo algún tratamiento es eficiente empleando un tipo de metodología en específica.

En su forma más pura, la investigación aplicada consiste en aplicar la teoría a problemas identificados en el mundo real; los beneficios de la investigación aplicada son a corto plazo y los resultados tienen un uso o aplicación inmediata e identificada (Driskell et al., 2014, p.4). Y es empleada debido a que se busca estudiar la aplicación de las diferentes plantas hiperacumuladoras, en el tratamiento de suelos, mediante la comparación de diversos investigadores.

De igual manera, señalamos que el tipo de diseño es narrativo de tópico; ya que se va analizar las experiencias vividas por el o los investigadores siguiendo una secuencia cronológica hasta llegar al resultado, contando la historia de los acontecimientos que vivieron, mediante la recolección de información de la data (Blanco N., 2011, p.1) y de tópico ya que se centra en un solo tema o temática; siendo en este caso la aplicación de plantas hiperacumuladoras para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados por actividades mineras en Latinoamérica.

3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización

La matriz de la presente investigación permite indicar las categorías planteadas de acuerdo a los objetivos y problemas específicos, de las cuales se desprendieron las categorías y de ellas las sub categorías, lo que hará que se tenga mayor

entendimiento de los resultados; a continuación se muestra se muestra la matriz de categorización en la tabla 3.

Tabla 3: Categorización apriorística

Objetivo Específico	Problemas Específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
OE1: Analizar los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras	PE1: ¿Cuáles son los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras?	Técnica de aplicación (Aguilar et al., 2001, p.2)	Fito-Extracción Natural Fitoextracción asistida Termoquímica (Kidd et al., 2007, p.1)	(Martínez et al., 2007, p.1), (Delgadillo et al., 2011, p.1)
OE2: Definir la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados	PE2: ¿Cuál es la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados?	Porcentaje de remoción (Delgadillo et al., 2011, p.1)	Alto Medio Bajo (Poma V. y Valderrama A., 2014, p.2)	(Diez et al., 2002, p.1), (Case H., 2013, p.1), (Betancur et al., 2005, p.1)
OE3: Determinar los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica.	PE3: ¿Cuáles son los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica?	Tipos de plantas hiperacumuladoras (Bustos Y., 2021, p.37)	Familia Género Orden (Alvarado et al., 2011, p.1)	(Pandey V. y Bajpai O., 2019, p.1), (Rascio N. y Navari F., 2011, p.1), (Chaudhar y et al., 2016, p.3).

Elaboración propia

3.3 Escenario de estudio

El escenario de estudio viene a ser los que se observa, de los hechos y acontecimientos suscitados por un grupo de investigadores, llevándolos de la realidad a lo explicativo para una situación en particular (Salinas, 2015, p. 8).

Dicho de tal modo, se aclara que en la presente investigación al ser una revisión sistemática, no se va a contar con un escenario físico en el que se realice el estudio, para lo cual se presenta como escenario de estudios al territorio de Latinoamérica, las plantas hiperacumuladoras que sirven como tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, especificando en la agricultura. El conocimiento de las palicaciones y sus métodos de extracción, todo ellos extraído provenientes de artículos de investigación, revistas o libros.

3.4 Participantes

Los participantes en el presente estudio son provenientes de fuentes primarias, debido a que se va extraer la información de estudios ya realizados. De esta manera se señala como fuentes a los artículos, libros y revistas, que engloben Latinoamérica, en diversos idiomas, todas ellas de revistas indizadas y fuentes como Sciencedirect, Scielo y Scopus.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

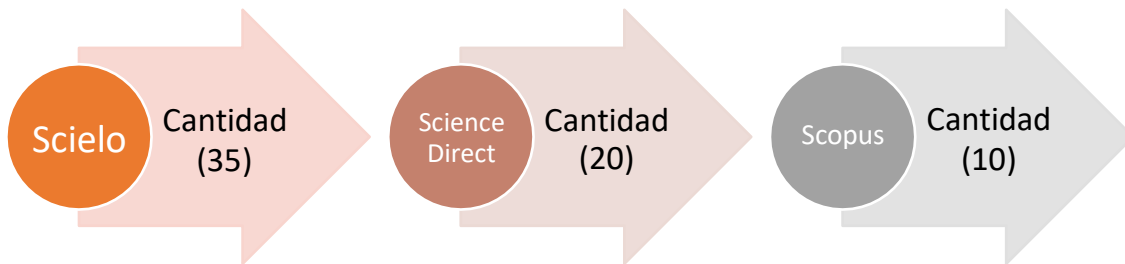
La técnica presentada en el presente estudio es el análisis documental mediante la recolección de datos brindados en el excel bibliográfico. Dicha el presente formato permite recaudar información importante y esencial de cada estudio que aporte a la presente investigación, extrayéndola y exponiéndola en el formato con el fin de tener un mayor entendimiento mediante la sistésis del contenido original. El análisis de documentos busca de manera similar hechos representados en los documentos utilizados en un proceso empresarial. Para analizar un documento, cada encabezado del documento se clasifica como representativo de: (1) una entidad (su identificador); (2) un atributo; o (3) datos calculados (Moody D. y Shanks G., 1994, p.1).

3.6 Procedimientos

De acuerdo a lo expuesto en el punto 3.4 los participantes como revistas, artículos, libros, serán extraídos de fuentes indizadas, de páginas web como Google académico, Scielo, Sciencedirect, entre otros; en un intervalo de tiempo no mayor a los 15 años; y siguiendo criterios, como el que deben de pertenecer Latinoamérica de lo contrario serán excluidos, siendo presentado con mayor detalle en el gráfico N°1.

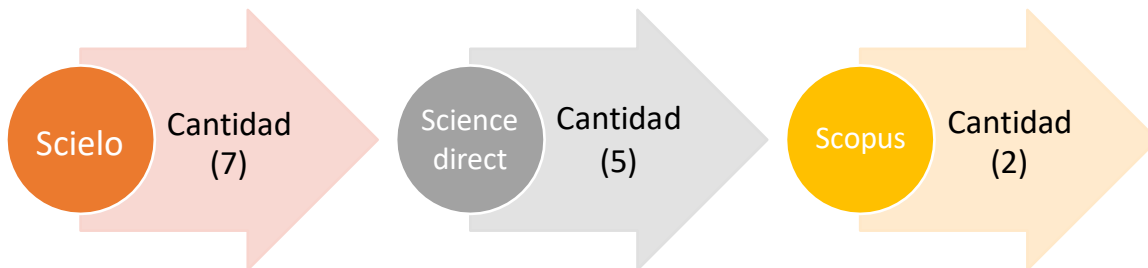
Gráfico N°1: Procedimiento

RECOLECCIÓN:



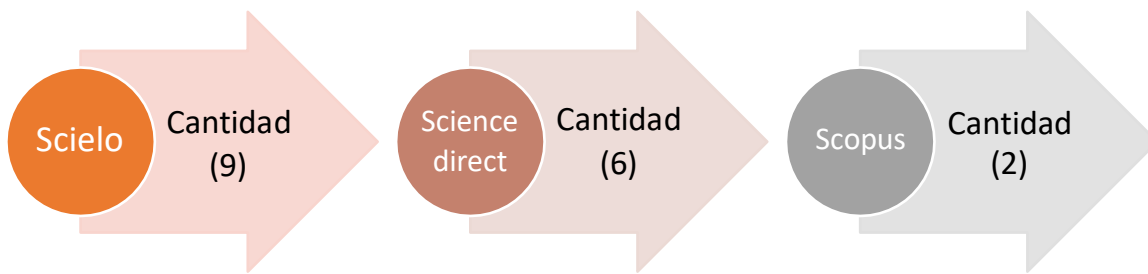
Palabras claves empleadas: Hyperaccumulation, Hyperaccumulator plants, mining activity, contamination, contaminated soil, application technique, Latin America.

EXCLUSIÓN



Por: Ser mayores a 15 años de antigüedad, No contar con DOI, ISBN, ISSN, no ser de Latinoamérica, no estar enfocado en suelo.

INCLUSIÓN



Por: Presentar información relevante al estudio

Total de estudios incluidos a la investigación: 17

3.7 Rigor científico

Este estudio cuenta con 4 criterios, los cuales permiten que el estudio cumpla con el rigor científico.

- ✓ **Dependencia:** Hace referencia los resultados consistentes, esto quiere decir que mediante la extracción de los resultados obtenidos por otros investigadores en sus estudios cuantitativos se extraerán los resultados brindando confiabilidad al estudio que se va a realizar (Parra y Briceño, 2013, p.120).
Esto será visto en la resolución de resultados mediante la aplicación de lo que obtuvieron en sus estudios otros investigadores a nivel de Latinoamérica, como es el caso de los resultados que obtuvieron en la remoción de plantas hiperacumuladoras.
- ✓ **Credibilidad:** Se obtiene cuando los hallazgos obtenidos por otros investigadores contemplan a personas y fenómenos, es encontrado en un estudio cuantitativo (Parra y Briceño, 2013, p.120).
Se aplica cuando los estudios encontrados sirven para resolver o esclarecer nuestros objetivos; en este caso el determinar de qué manera las actividades mineras en Latinoamérica inciden en la contaminación del suelo por metales pesados.

- ✓ Transferencia: Este rigor permite que el investigador traslade información importante del autor original a otro contexto, que ayude a esclarecer dudas, sin perder (Parra y Briceño, 2013, p.120).

Es aplicado cuando se vea que técnicas, métodos, procedimientos emplearon los investigadores, como es el caso de los métodos más empleados para la aplicación de plantas híper acumuladoras.

- ✓ Autenticidad: Es cada dato o información que se haya extraído del documento original, sin alterar los resultados que obtuvieron los autores de dichos estudios; empleándolos de manera crítica (Parra y Briceño, 2013, p.120).

Es empleado en el desarrollo de resultados; realizando una comparación de lo que obtuvieron los autores originales con otros, mediante la discusión.

3.8 Método de análisis de información

La información ha sido analizada de acuerdo a las categorías, que fueron obtenidas por los objetivos específicos y problemas específicos (Ver Tabla N°3).

Las categorías dieron lugar a las subcategorías, delimitando un gran grupo; como por ejemplo: Categorías 1 (Técnicas de aplicación), desglosando subcategorías semejantes como Fito-Extracción Natural, Fitoextracción asistida y termoquímica.

Es el mismo caso de los restantes dos categorías; donde en la segunda se busca determinar el porcentaje de remoción de los contaminantes y los tipos de plantas híper acumuladoras; quienes presentan como sub categorías Alto, Medio, Bajo y Familia, Género, Orden.

3.9 Aspectos éticos

Con la finalidad de garantizar la ética de la presente investigación se cumplió con los aspectos éticos de derecho de autoría; cumpliendo con las citas respectivas para cada autor detallando: Nombres, año y página; de igual manera es esencial recalcar que se siguió la norma ISO 690-2; cumpliendo de esta manera con la

normativa vigente de la Universidad César Vallejo; y como último aspecto a detallar, se indica el valor social mediante la presente investigación, ya que está realizado con fines de proveer información, a nuevos investigadores y brindar nuevos y actualizados conocimientos de las plantas hiperacumuladoras a nivel de Latinoamérica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MÉTODOS DE APLICACIÓN

Al generar el análisis y recolección de 17 estudios respecto a las actividades mineras en Latinoamérica y su incidencia en la contaminación del suelo por metales pesados, se tuvo para el primer objetivo de los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras, lo expuesto en la tabla N°4:

Tabla 4: Métodos de aplicación

Técnica de aplicación (Fito-Extracción Natural o Fitoextracción asistida)	Metodología	Metal	Autor
Fitoextracción asistida	Secado y triturado	Cd	Zhang et al., 2021
Fitoextracción asistida	Secado 105°C y triturado con trituradora de laboratorio	Ni	Hazotte et al., 2020
Fitoextracción asistida	Secado 72°C y molido	Cu	Cartaya et al., 2017
Fito-Extracción Natural	10 estaciones de evaluación de metales en tejido vegetal.	Hg Sn Se Hg	Cahuana L. y Aduvire O., 2019
Fito-Extracción Natural	No indica	Cu	González et al., 2008
Fito-Extracción Natural	Siembra de estacas, obtención de plántulas, siembra de plántulas y crecimiento de plántulas.	Óxido de aluminio y Fe	Morales A. y Moreira M., 2020
Fitoextracción asistida	Se estableció en un diseño de bloques aleatorios utilizando un esquema factorial 4 x 1 con tres repeticiones. Las muestras de las plantas (parte aérea y raíz) y la solución nutritiva se sometieron a los análisis químicos para la determinación del Pb.	Pb	Romeiro et al., 2007
Fito-Extracción Natural	El tratamiento control consistió en las plantas sembradas en un	Hg	Durango et al., 2010

	suelo sin historial minero (muy baja concentración de Hg), con el propósito de establecer las diferencias en los rasgos fitotóxicos con las plantas expuestas a altas concentraciones de Hg, puesto que en las plantas sembradas en el suelo control no se generan tasas considerables de acumulación ni remoción del metal del suelo.		
Fito-Extracción Natural	En macetas se estudió el crecimiento, la fitoextracción de metal (loid) y la complementariedad mediante la co plantación de <i>Pteris vittata L.</i> con tres especies tolerantes a metales (loid) con gran biomasa (a saber, <i>Arundo donax L.</i> , <i>Morus alba L.</i> y <i>Broussonetia papyrifera L.</i>) en suelos co-contaminados con As, Cd, Pb y Zn.	As Cd Pb Zn	Zeng et al., 2019
Fito-Extracción Natural	Se recolectaron individuos de tres especies en dos zonas de muestreo: una zona intensiva donde continúa la extracción de oro, y una zona natural.	Hg	Chamba et al., 2017
Fito-Extracción Natural	Se determinaron el Factor de Translocación (TF) y el Factor de Acumulación de Brotes (SAF) para evaluar las estrategias de tolerancia desarrolladas por estas especies y evaluar su potencial para fines de fitorremediación.	As Cu Pb Zn	Bech et al., 2016
Fito-Extracción Natural	Se tomaron muestras de suelo y plantas en Perú, en una mina polimetálica (principalmente plata, plomo y cobre) en la provincia de Cajamarca.	Pb Zn	Bech et al., 2012
Fito-Extracción Natural	Se seleccionaron cuatro sitios para la recolección de plantas que crecen en suelos contaminados en México	Zn	González C. y González M., 2006

Fito-Extracción Natural	Se recogieron muestras de suelo y del helecho, El suelo de se secó, tamizó y molió; las hojas que tenían esporas se muestrearon por separado y se separaron de aquellas sin esporas, y las hojas senescentes fueron separadas de las hojas jóvenes y sanas.	As	Francesconi et al., 2002
Fitoextracción asistida	Las plantas se separaron inmediatamente en brotes y raíces y almacenadas a 4 °C en bolsas de plástico abiertas hasta su pretratamiento y análisis en el laboratorio. Las muestras de suelo se cortaron inmediatamente en estratos de 0-5-cm y 5-20 cm y se almacenaron en bolsas de plástico a 4 °C hasta su análisis.	B	Rámila et al., 2015
Fito-Extracción Natural	Las plantas se cultivaron en una cámara de crecimiento con una temperatura día/noche de 26/20 °C, con un fotoperiodo de 16/8 h bajo una intensidad de luz de 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una humedad del 70/85%. Se realizaron tres réplicas biológicas para cada tratamiento.	Zn Cd	Yang et al., 2018
Fito-Extracción Natural	Las plantas fueron sembradas y monitoreadas cada semana para determinar su altura; previa siembra se pesaron hojas, tallos y raíz de cada maceta. Posteriormente fueron pesadas en peso fresco, para llevar a la estufa y secarlas para tener la materia seca.	Pb Cd	Munive et al., 2018

Elaboración propia

Para los resultados de los métodos de aplicación en las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados por actividad minera a nivel de Latinoamérica, se tuvo que el 85% emplean la Fito-Extracción, mientras que el 15% la técnica de digestión por vía seca. La fitoextracción Natural de oligoelementos de acuerdo con diversos

investigadores, es “una tecnología emergente que puede utilizarse para la limpieza de bajo costo de tierras contaminadas (Robinson et al., 2015, p.1).

Siendo los investigadores que emplearon la Fito-Extracción Natural: Cahuana L. y Aduvire O., 2019, González et al., 2008, Morales A. y Moreira M., 2020, Durango et al., 2010, Zeng et al., 2019, Chamba et al., 2017, Bech et al., 2016, Bech et al., 2012, Gonzáles C. y González M., 2006, Francesconi et al., 2002, Yang et al., 2018, Munive et al., 2018.

Mientras que en menor cantidad quienes apoyan la técnica de Fitoextracción asistida son: Zhang et al., 2021, Hazotte et al., 2020, Cartaya et al., 2017, Romeiro et al., 2007 y Rámila et al., 2015.

De acuerdo con Ghori et al., (2016, p.1) la fitoextracción o fitoacumulación ha surgido como una técnica prometedora para la remediación del suelo que puede absorber fácilmente metales pesados y purificar el suelo de sus contaminantes. Esta afirmación es también respaldada por Sheoran et al., (2016, p.1) quien señala que los estudios que exploran el papel beneficioso de estos hiperacumuladores para limpiar el medio ambiente han llevado al desarrollo de la fitoextracción.

Mientras que Mcgrath P. y Zhao F., (2003, p.2) señala que, los estudios recientes han analizado la viabilidad de la fitoextracción y demuestran que se requieren buenos rendimientos de biomasa e hiperacumulación de metales para que el proceso sea eficiente. La adición de agentes quelantes al suelo para aumentar la biodisponibilidad de contaminantes a veces puede inducir hiperacumulación en plantas normales, pero puede producir riesgos ambientales indeseables.

Esta afirmación es apoyada y respaldada por Zeng et al., (2019) quien empleó la co plantación mejoró los resultados; De igual manera Zeng et al., (2019), Romeiro et al., 2007 y Munive et al., 2018, quienes emplearon adición de agentes como enmiendas orgánicas para obtener un mayor porcentaje de adsorción por las plantas hiperacumuladoras, como el compost o y vermicompost para ayudar a una mayor adsorción de los metales en las plantas.

Así también, Eissa M., (2017, p.1) señala que empleando agentes movilizadores las plantas hiperacumuladoras presentan mayor eliminación de los metales del suelo; empleando en su estudio las plantas de *saltbush* de codorniz modificadas con vinaza de caña de azúcar; siendo capaces de eliminar el 8,34% del total del Cd del suelo; donde la vinaza de caña de azúcar es más eficaz para mejorar la fitoextracción de Cd.

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN

De acuerdo con el segundo objetivo de definir la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados; mediante la selección de las sub categorías alta, media y baja se tuvo los resultados expuestos en la Tabla N°5:

Tabla 5: Capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras

Planta Hiperacumuladora	Concentración de	Tiempo	Porcentaje de remoción	Autor
<i>Bidens pilosa L.</i>	Raíz, tallo y hoja 0,2 g/kg de peso seco	No indica	B.pilosa no plantada (15,40%) B.pilosa plantada (21,17%)	Zhang et al., 2021
- <i>Odontarrhena chalcidica,</i>	Conc. Inicial Ni: 0,86 g/kg	16 h de día/8 h de noche	A 500°C el Ni desaparece al 100%	Hazotte et al., 2020
- <i>Leptoplax emarginata</i>				
- <i>Berkheya coddii</i>				
<i>Solanum Lycopersicum L.</i>	Concentración de plant. Hiperacumul.: 20 mg/L (dosis 3 mL/planta) de ogal Cu: 650 mg/kg	35 días	Se logran niveles de extracción de iones Cu por las plántulas de tomate completas de 14,93 mg/kg	Cartaya et al., 2017
<i>Stipa mucronata</i>	500 gramos cada una	No indica	Hg: 0.1 mg/kg Sn: 100% Se: 100% Hg: Por debajo de lo permitido	Cahuana L. y Aduvi
<i>Festuca dolichophylla</i>				
<i>Cortaderia sp.</i>				

				re O., 2019
<i>Oenothera affinis</i>	Concentración de Cu: 90-900 mg/kg	No indica	Acumulación de Cu: <i>Oenothera affinis</i> : 614 mg/kg (no fue considerada como hiperacumuladora.	González et al., 2008
<i>Argemone subfusiformis</i>				
<i>Oenothera affinis</i>				
<i>Erato polymnioides</i>	40 estacas	60 días	Porcentaje de adsorción del 80%	Moral es A. y Morei ra M., 2020
<i>Canavalia ensiformes L.</i>	Concentración Pb: 100 mmol/L 200 mmol/L 400 mmol/L	28 días	Se produjo una disminución del crecimiento de <i>C. ensiformes</i> , que fue directamente proporcional al aumento de las concentraciones de Pb aplicadas.	Rome iro et al., 2007
<i>Guarumo</i>	40 plántulas de guarumo en cada uno de los suelos de manera aleatoria	4 meses de crecimiento	Remoción entre 15.7% y 33.7% de Hg	Duran go et al., 2010
<i>Arundo donax L.</i>	Contenido total de As: 79,6 mg/kg	10 h de oscuridad	La biomasa total y el contenido de As en	Zeng et al.,
<i>Morus alba L.</i>				
<i>Broussonetia papyrifera L.</i>	Cd: 41,2 mg/kg Pb: 519 mg/kg Zn: 2090 mg/kg Plántulas de <i>P. vittata L.</i> (unos 6-7 cm), <i>A. donax L.</i> (unos 6-7 cm), <i>M. alba L.</i> (unos 15-20 cm) y <i>B. papyrifera L.</i> (unos 15-20 cm).	10 h de oscuridad con T° diurnas y nocturnas de 30 °C /20 °C y una humedad relativa del 60-80%.	las raíces de <i>P. vittataL.</i> bajo el sistema de co-plantación mejoraron en un 117.5% y 122.0% respectivamente, en comparación con el monocultivo. El contenido de As, Cd, Pb y Zn en los tejidos de <i>A. donax L.</i> , <i>M. alba L.</i> y <i>B. papyrifera L.</i> se	2019

			incrementó ligeramente.	
<i>Axonopus compressus</i>	Zona intensiva 4.8 mg Hg/kg de suelo	No indica	<i>E. polymnioides</i> aumentó la acumulación de Hg cuando creció con una mayor colonización de hongos micorrízicos	Cham ba et al., 2017
<i>Erato polymnioides</i>	Zona natural 0.19 mg Hg/kg del suelo			
<i>Miconia zamorensis</i>				
<i>Cortaderia hapalotricha</i>	As 280-1029 mg/kg Cu 256-2070 mg/kg Pb 3992-16,060 mg/kg	No indica	<i>C. hapalotricha</i> , <i>T. repens</i> y <i>E. denticulatum</i> son hiperacumuladores de Pb debido a su capacidad de acumular más de 1500 mg Pb/kg en los brotes. <i>A. alata</i> , <i>Ageratina sp.</i> y <i>E. denticulatum</i> podrían ser las especies más prometedoras para fitoextracción de Zn, porque fueron capaces de acumular más de 12.000 mg/kg de Zn.	Bech et al., 2016
<i>Ageratina sp.</i>	Zn 11,550-28,059 mg/kg			
<i>Epilobium denticulatum</i>				
<i>Bidens triplinervia</i>	Pb: 13,105 mg Pb/Kg	No indica	Adsorción de <i>Bidens triplinervia</i> L.: 5180 mg Pb/kg y 9900 mg Zn/kg en un 80% <i>Senecio sp.</i> : acumuló más metales pesados en los brotes; 4250 mg Pb/kg y 3870 mg Zn/kg en un 90%	Bech et al., 2012
<i>Seneciosp</i>	Zn: 28,393 ± 3458 mg Zn/kg			
<i>Polygonum aviculare</i>	Cd 11-47 mg/kg Ni 19-26 mg/kg Pb 232-695 mg/kg Mn 1132-2400 mg/kg	No indica	Acumulación de <i>Polygonum aviculare</i> para Zn del 9236 mg/kg <i>Jatropha dioica</i> acumuló altas	Gonz áles C. y Gonz ález
<i>Jatropha dioica</i>	Cu 134-186 mg/kg Zn 116-827 mg/kg			

			concentraciones de Zn, en un 6249 mg/kg en un porcentaje de 95%.	M., 2006
<i>Pityrogramma calomelanos</i>	8350 µg As/g de masa seca	No indica	Porcentaje de extracción: 86-93% en las hojas de helecho	Franc esconi et al., 2002
<i>Puccinellia frigida</i>	Porcentaje de arcilla en el suelo 7-19% Sodio en el suelo: 52-63% K: 800mg/Kg P: 40mg/kg	No indica	Los brotes de <i>Puccinellia frigida</i> presentan concentraciones de boro extremadamente altas en un 99.9%.	Rámil a et al., 2015
<i>Sedum alfredii</i>	ZnSO: 4 50 µM CdCl2: 10 µM	3 h, 24 h, 72 h y 8 d.	Las concentraciones de Zn o Cd tanto en las raíces como en los brotes bajo 50 µM ZnSO4 o 10 µM CdCl2 fueron aumentando a medida que pasaba el tiempo.	Yang et al., 2018
<i>Zea mays L.</i>	No indica	No indica	Porcentaje de acumulación en raíces (80 %) hojas (15 %) tallos (5%) como promedio de todos los tratamientos.	Muniv e et al., 2018

Elaboración propia

De acuerdo con el segundo objetivo de determinar la capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados, se tuvo que el promedio de los porcentajes de adsorción varía entre un 75%-95%; siendo encontrados en una sub categoría alta; donde esta afirmación viene siendo apoyada por los investigadores: Hazotte et al., 2020, Cahuana L. y Aduvire O., 2019, Morales A. y Moreira M., 2020, Zeng et al., 2019, Bech et al., 2016, Bech et al., 2012, Francesconi et al., 2002, Gonzáles C. y González M., 2006, Yang et al., 2018 y Munive et al., 2018.

Ghori et al., (2016, p.1) apoya lo anteriormente dicho, señalando que las plantas tienen un mecanismo natural para absorber y almacenar nutrientes de acuerdo con su biodisponibilidad en el suelo y el requerimiento de la planta, siendo los hiperacumuladores, las plantas que tienen la tendencia a absorber incluso elementos no esenciales hasta 100 veces más que los no hiperacumuladores; debido a su mayor biomasa, pueden recolectar metales pesados utilizando canales iónicos y proteínas de transporte de metales a través de las raíces y almacenarlos en los órganos de la superficie donde se almacenan en vacuolas y paredes celulares o se desintoxican.

Por su parte, Hazotte et al., 2020, señala que teniendo una concentración inicial de Ni en 0,86 g/kg, en el suelo se pudo desaparecer al 100% el metal del suelo minero. Esto es apoyado por Bech et al., 2012, quien afirma que presentando el suelo una contaminación del metal Pb: 13,105 mg Pb/Kg o Zn: 28,393 ± 3458 mg Zn/kg, obtuvo porcentajes altos de adsorción en un 80% y 90%, respectivamente.

De igual manera se puede afirmar que empleando *Zea mays L.* como hiperacumulador, independientemente del tiempo, pudo obtener porcentajes altos de adsorción en un 80% en las raíces (Munive et al., 2018). Esta afirmación es respaldada por Zeng et al., (2019) quien señala que la biomasa total y el contenido de As en las raíces de *P. vittata L.* bajo el sistema de co-plantación mejoraron en un 117.5% y 122.0%. Por otro lado, Gonzáles C. y González M., (2006), refuta lo anterior dicho por (Munive et al., 2018) y (Gonzáles C. y González M., 2006), quien independientemente del tiempo empleando las plantas *Polygonum aviculare* y *Jatropha dioica* como hiperacumulador tuvo un porcentaje de remoción del 86-93% en las hojas de helecho.

Por otro lado; los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica, se determinaron de acuerdo a las sub categorías Género, familia y orden; donde los resultados de acuerdo a la comparación de 17 investigaciones a nivel de Latinoamérica se muestran en la Tabla N°

TIPOS DE PLANTAS HIPERACUMULADORAS

Tabla 6: Tipos de plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados por actividad minera

Planta Hiperacumuladora	Género	Familia	Orden	Autor
<i>Bidens pilosa</i> L.	Bidens	Asteraceae	Asterales	Zhang et al., 2021
<i>Odontarrhena chalcidica</i>	No indica	Brassicaceae	Brassicales	Hazotte et al., 2020
<i>Leptoplax emarginata</i>	Nyman	Brassicaceae	Brassicales	
<i>Berkheya coddii</i>	Berkheya	Asteraceae	Asterales	
<i>Solanum Lycopersicum</i> L.	Solanum	Solanáceas	Solanales	Cartaya et al., 2017
<i>Stipa mucronata</i>	Stipa L. 1753	Poaceae	Poales	Cahuana L. y Aduvire O., 2019
<i>Festuca dolichophylla</i>	Festuca	Poaceae	Poales	
<i>Cortaderia sp.</i>	Cortaderia	Poaceae	Poales	
<i>Oenothera affinis</i>	Onagras	Onagraceae	Myrtales	
<i>Argemone subfusiformis</i>	Argemone L.	Papaveraceae	Papaverales	González et al., 2008
<i>Oenothera affinis</i>	Onagras	Onagraceae	Myrtales	
<i>Erato polymnioides</i>	Erato	Asteraceae	Asterales	Morales A. y Moreira M., 2020

<i>Canavalia ensiformes L.</i>	Canavalia Adans.	Fabáceas	Fabales	Romeiro et al., 2007
<i>Guarumo</i>	Cecropia	Urticaceae	Rosales	Durango et al., 2010
<i>Arundo donax L.</i>	Arundo	Poaceae	Poales	Zeng et al., 2019
<i>Morus alba L.</i>	Morus	Moraceae	Rosales	
<i>Broussonetia papyrifera L.</i>	Broussonetia	Moraceae	Rosales	
<i>Axonopus compressus</i>	Axonopus	Poaceae	Poales	Chamba et al., 2017
<i>Erato polymnioides</i>	Erato	Asteraceae	Asterales	
<i>Miconia zamorensis</i>	Miconia	Melastomataceae	Myrtales	
<i>Cortaderia hapalotricha</i>	Cortaderia	Poaceae	Poales	Bech et al., 2016
<i>Ageratina sp.</i>	Ageratina	Asteraceae	Asterales	
<i>Epilobium denticulatum</i>	Epilobium	Onagraceae	Myrtales	
<i>Bidens triplinervia</i>	Bidens	Asteraceae	Asterales	
<i>Seneciosp</i>	Senecio	Asteraceae	Asterales	Bech et al., 2012
<i>Polygonum aviculare</i>	Polygonum	Polygonaceae	Caryophyllales	
<i>Pityrogramma calomelanos</i>	Pityrogramma	Pteridaceae	Polypodiales	Francesconi et al., 2002
<i>Puccinellia frigida</i>	Puccinellia Parl.	Poaceae	Poales	Rámila et al., 2015
<i>Sedum alfredii</i>	Sedum	Crassulaceae	Saxifragales	Yang et al., 2018
<i>Zea mays L.</i>	Zea	Poaceae	Poales	Munive et al., 2018

Elaboración propia

De las 31 plantas hiperacumuladoras empleadas 8 son las que pertenecen a la familia Poaceae, 7 pertenecen a la familia Asteraceae y los demás restantes en minoría con

un o dos veces empleando a Solanáceas, Papaveraceae, Fabáceas, Urticaceae, Moraceae, entre otros.

Asteraceae es una herbácea perenne con un tallo subterráneo vertical acortado que produce hojas simples largas (10-40 cm) anchas (hasta 40 cm) y raíces relativamente carnosas (Hilliard O., 1997, p.2) y está confirmado que la población perteneciente a la familia Asteraceae hiperacumulan metales pesados como el Ni y que su mayor concentración se da en la epidermis de las hojas de estas poblaciones (Boyd et al., 2008, p.3). Esto es corroborado por: Zhang et al., 2021, Morales A. y Moreira M., 2020, Chamba et al., 2017, Bech et al., 2016 y Bech et al., 2012; quienes utilizaron las plantas *Bidens pilosa L.*, *Berkheya coddii*, *Erato polymnioides*, *Erato polymnioides*, *Ageratina sp.*, *Bidens triplinervia* y *Seneciosp.*

De igual manera; entre las plantas más empleadas de la familia Poaceae se encuentran *Cahuana L.* y Aduvire O., 2019, utilizando las plantas hiperacumuladoras *Stipa mucronata*, *Festuca dolichophylla* y *Cortaderia sp.*; Zeng et al., 2019, con la planta *Arundo donax L.*; Chamba et al., 2017 con *Axonopus compressus*; Bech et al., 2016, con la planta *Cortaderia hapalotricha*; Rámila et al., 2015 con *Puccinellia frigida* y el autor Munive et al., 2018 empleando en su investigación a *Zea mays L.*

Basándonos en base a la revisión de los artículos de investigación y literaturas revisadas, las plantas con mayor potencial de hiperacumulación son las que pertenecen a las dos familias Poaceae y Asteraceae; sin embargo esto corroborado por Pires et al., (2020, p.1) quien en su investigación empleó la planta *P. aquaticum* de la familia Poaceae, para la adsorción de Pb en diversas concentraciones, obteniendo que las raíces de *P. aquaticum* presentaron mayor absorción en un 2279 $\mu\text{g/g DW}^{-1}$ de Pb concluyendo que esta especie tiene potencial como hiperacumulador para la fitorremediación de áreas contaminadas con Pb. Esto es también apoyado por Patra et al., (2020, p.2) quien recomienda que la familia de las gramíneas Poaceae son recomendadas para la restauración de tierras contaminadas de manera sostenible en base a su estudio.

V. CONCLUSIONES

Para determinar cómo las plantas hiperacumuladoras indican en el suelo contaminado por metales pesados en Latinoamérica, se estudió 3 objetivos en las cuales se obtuvo:

- Los métodos más empleados para la aplicación de plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados por actividad minera a nivel de Latinoamérica el 85% emplean la Fito-Extracción, mientras que el 15% la técnica de digestión por vía seca, siendo considerada la fitorremediación una tecnología emergente que puede utilizarse para la limpieza de bajo costo de tierras contaminadas.
- La capacidad de adsorción de las plantas hiperacumuladoras en suelos contaminados con metales pesados varía en un promedio del 75%-95%, siendo considerados en una sub categoría alta; donde se confirma por diversos investigadores que teniendo concentraciones iniciales de metales como Ni en 0,86 g/kg en el suelo se pudo desaparecer hasta el 100% el metal del suelo minero.
- Por último, los tipos de plantas hiperacumuladoras más empleadas en el tratamiento de suelos contaminados en Latinoamérica, son las especies Poaceae y Asteraceae; debido a su poder de acumulación y tolerancia al crecimiento en suelos mineros.

VI. RECOMENDACIONES

Frente a los resultados obtenidos acerca de determinar cómo las plantas hiperacumuladoras indican en el suelo contaminado por metales pesados en Latinoamérica y en referencia a las literaturas evaluadas, se recomienda:

- Emplear más estudios a nivel de Latinoamérica, utilizando plantas prometedoras con alta capacidad de tolerancia a las concentraciones de metales pesados que presentan tierras contaminadas por las actividades mineras; como es el caso de las plantas *Sedum alfredii*, *Pityrogramma calomelanos*, *Polygonum aviculare* y *Miconia zamorensis*.
- Emplear más especies vegetales para la fitoextracción no solo de metales pesados, si no también, de hidrocarburos, ya que, son aptas para la restauración de tierras contaminadas de manera sostenible.
- Se recomiendan un mayor enfoque en las características de las plantas hiperacumuladoras como las raíces u hojas, incluidas pruebas adicionales de los efectos de los hiperacumuladores en el tratamiento y la fitoextracción de metales.

REFERENCIAS

AGUILAR, Irma Díaz, et al. Alteración de algunos procesos fisiológicos en trigo por la adición de plomo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2001, vol. 17, no 2, p. 79-90. ISSN: 0188-4999

ALVARADO, Carlos J., et al. Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2011, vol. 27, no 4, p. 357-364. ISSN 0188-4999

BECH, Jaume, et al. Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru. *Science of the Total Environment*, 1997, vol. 203, no 1, p. 83-91. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00136-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00136-8)

BECH, Jaume, et al. Accumulation of Pb and Zn in *Bidens triplinervia* and *Senecio* sp. spontaneous species from mine spoils in Peru and their potential use in phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 123, p. 109-113. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.06.021>

BETANCUR, Lina Marcela Agudelo; MAZO, Karina Isabel Macias; MENDOZA, Alfredo José Suárez. Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de investigación*, 2005, vol. 2, no 1, p. 57-60. Disponible en: ISSN: 1794-4449

BHAYANI, Apoorva, et al. Microbial-assisted heavy metal remediation: Bottlenecks and prospects. En *Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment*. Elsevier, 2020. p. 349-372. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821014-7.00014-9>

BLANCO, Mercedes. Investigación narrativa: una forma de generación de conocimientos. *Argumentos* (México, DF), 2011, vol. 24, no 67, p. 135-156. ISSN 0187-5795.

BOYD, Robert S.; DAVIS, Micheal A.; BALKWILL, Kevin. Elemental patterns in Ni hyperaccumulating and non-hyperaccumulating ultramafic soil populations of *Senecio coronatus*. South African Journal of Botany, 2008, vol. 74, no 1, p. 158-162. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2007.08.013>

BRIFFA, Jessica; SINAGRA, Emmanuel; BLUNDELL, Renald. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. Heliyon, 2020, vol. 6, no 9, p. e04691. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>

BUSTOS CONTRERAS, Yordy Alejandro. Uso de plantas hiperacumuladoras en minería conceptos y aplicaciones.

CAHUANA, Lizardo; ADUVIRE, Osvaldo. Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. Revista de Medio Ambiente y Minería, 2019, vol. 4, no 2, p. 19-36. ISSN 2519-5352

CARTAYA, Omar, et al. Efecto de la aplicación foliar de oligogalacturónidos a plántulas de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en la fitoextracción de cobre de suelo contaminado. Cultivos Tropicales, 2017, vol. 38, no 3, p. 142-147. ISSN 1819-4087

CASE, HELICONIA PSITTACORUM. Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (Heliconiaceae). Rev. acad. colomb. cienc, 2013, vol. 37, no 145. ISSN 0370-3908

CHAMBA, Irene, et al. *Erato polymnioides*-A novel Hg hyperaccumulator plant in ecuadorian rainforest acid soils with potential of microbe-associated phytoremediation. Chemosphere, 2017, vol. 188, p. 633-641. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.160>

CHAUDHARY, Khushboo; JAN, Sumira; KHAN, Suphiya. Heavy Metal ATPase (HMA2, HMA3, and HMA4) Genes in Hyperaccumulation Mechanism of Heavy Metals. En Plant Metal Interaction. Elsevier, 2016. p. 545-556. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00023-0>

CHEN, Jun-Xiu, et al. Novel PvACR3; 2 and PvACR3; 3 genes from arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* and their roles in manipulating plant arsenic accumulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 415, p. 125647. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125647>

CASSAYRE, Laurent, et al. Combustion of nickel hyperaccumulator plants investigated by experimental and thermodynamic approaches. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, vol. 160, p. 162-174. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.003>

DELANEY, Peter F.; VERKOEIJEN, Peter P.J.L.; SPIRGEL, Arie. Spacing and testing effects: A deeply critical, lengthy, and at times discursive review of the literature. *Psychology of learning and motivation*, 2010, vol. 53, p. 63-147. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(10\)53003-2](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(10)53003-2)

DELGADILLO-LÓPEZ, Angélica Evelin, et al. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 2011, vol. 14, no 2, p. 597-612. ISSN 1870-0462

DRISKELL, James E.; KING, Jennifer; DRISKELL, Tripp. Conducting applied experimental research. En *Laboratory experiments in the social sciences*. Academic Press, 2014. p. 451-472. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404681-8.00020-0>

DURANGO, Jhon Víctor Vidal, et al. Remediation of soils contaminated with mercury using guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería y desarrollo*, 2010, no 27, p. 113-129. ISSN 2145-9371

ENYA, Osim, et al. Effects of heavy metals on organic matter decomposition in inundated soils: microcosm experiment and field examination. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 724, p. 138223. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138223>

EISSA, Mamdouh A. Phytoextraction mechanism of Cd by *Atriplex lentiformis* using some mobilizing agents. *Ecological Engineering*, 2017, vol. 108, p. 220-226. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.025>

FRANCESCONI, Kevin, et al. Arsenic species in an arsenic hyperaccumulating fern, *Pityrogramma calomelanos*: a potential phytoremediator of arsenic-contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 2002, vol. 284, no 1-3, p. 27-35. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00854-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00854-3)

GE, Jun, et al. Nickel tolerance, translocation and accumulation in a Cd/Zn co-hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 398, p. 123074. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123074>

GONZÁLEZ, Isabel, et al. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista chilena de historia natural*, 2008, vol. 81, no 2, p. 279-291. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2008000200010>

GONZÁLEZ, R. Carrillo; GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. C. A. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 144, no 1, p. 84-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.006>

GUILPAIN, Mathilde, et al. Speciation of nickel extracted from hyperaccumulator plants by water leaching. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 180, p. 192-200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.07.024>

Gwaltney-Brant, S. M. (2013). Heavy Metals. Haschek and Rousseaux's Handbook of Toxicologic Pathology, 1315-1347. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-415759-0.00041-8>

HAZOTTE, Claire, et al. Evaluation of the performance of nickel hyperaccumulator plants as combustion fuel. *Biomass and Bioenergy*, 2020, vol. 140, p. 105671. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105671>

HAZOTTE, Claire, et al. A novel process to recover cadmium and zinc from the hyperaccumulator plant *Noccaea caerulescens*. *Hydrometallurgy*, 2017, vol. 174, p. 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.09.012>

HE, Bihong, et al. Exploring the fate of heavy metals from mining and smelting activities in soil-crop system in Baiyin, NW China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 207, p. 111234. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111234>

HEIKENS, A.; PEIJNENBURG, W. J. G. M.; HENDRIKS, A. J. Bioaccumulation of heavy metals in terrestrial invertebrates. *Environmental Pollution*, 2001, vol. 113, no 3, p. 385-393. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00179-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00179-2)

HILLIARD, Olive Mary. *Compositae in natal*. University of Natal Press, 1977.

ISLAM, Mohammad Saiful, et al. Sources and ecological risks of heavy metals in soils under different land uses in Bangladesh. *Pedosphere*, 2019, vol. 29, no 5, p. 665-675. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60394-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60394-1)

JUNG, Myung Chae. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Applied geochemistry*, 2001, vol. 16, no 11-12, p. 1369-1375. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00040-3)

KARIM, Zahida, et al. Heavy metal content in urban soils as an indicator of anthropogenic and natural influences on landscape of Karachi—a multivariate spatio-temporal analysis. *Ecological indicators*, 2014, vol. 42, p. 20-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.07.020>

KHALID, Sana, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 182, p. 247-268. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>

KIDD, Petra Susan, et al. Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. *Revista Ecosistemas*, 2007, vol. 16, no 2.

KASASSI, A., et al. Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, no 18, p. 8578-8584. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.010>

KUMAR, G. P., et al. Growth of *Jatropha curcas* on heavy metal contaminated soil amended with industrial wastes and *Azotobacter*-A greenhouse study. *Bioresource technology*, 2008, vol. 99, no 6, p. 2078-2082. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.032>

LIN, Lijin, et al. Effects of living hyperaccumulator plants and their straws on the growth and cadmium accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, vol. 155, p. 109-116. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.072>

LIU, Xue, et al. Arsenic-induced nutrient uptake in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* and their potential role to enhance plant growth. *Chemosphere*, 2018, vol. 198, p. 425-431. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.077>

LU, Rui-Rui, et al. The effect of *Funneliformis mosseae* on the plant growth, Cd translocation and accumulation in the new Cd-hyperaccumulator *Sphagneticola calendulacea*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 203, p. 110988. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110988>

LIU, Xue, et al. Phytate induced arsenic uptake and plant growth in arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 226, p. 212-218. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.021>

MCGRATH, Steve P.; ZHAO, Fang-Jie. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current opinion in biotechnology*, 2003, vol. 14, no 3, p. 277-282. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00060-0](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00060-0)

MARTINEZA, Joey Genevieve, et al. Influence of heavy metals on nematode community structure in deteriorated soil by gold 1 mining activities in Sibutad, southern Philippines 2. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.021>

MARTÍNEZ, Carmen Monterroso, et al. Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente, 2007, vol. 16, no 2, p. 3.

MOODY, Daniel L.; SHANKS, Graeme G. What makes a good data model? Evaluating the quality of entity relationship models. En International Conference on Conceptual Modeling. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994. p. 94-111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227240-4/00034-4>

MORALES-HERRERA, Alexandra; MOREIRA-PALACIOS, Máximo. Propagación de erato polymnioides, en combinaciones de sustratos, reguladores de crecimiento y agrupación de plántulas. Agronomía Costarricense, 2020, vol. 44, no 1, p. 133-144. Disponible en: www.mag.go.cr/rev_agr/index.html

MUNIVE CERRÓN, Rubén, et al. Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. Scientia Agropecuaria, 2018, vol. 9, no 4, p. 551-560. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>

PANDEY, Vimal Chandra; BAJPAI, Omesh. Phytoremediation: from theory toward practice. En Phytomanagement of polluted sites. Elsevier, 2019. p. 1-49. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813912-7.00001-6>

PARRA Matrha y Briceño Isías. Aspectos éticos en la investigación cualitativa. Enfoque neurológico. 12 (3), 2013. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/enfneu/ene-2013/ene133b.pdf>

PATRA, Deepak Kumar, et al. Poaceae plants as potential phytoremediators of heavy metals and eco-restoration in contaminated mining sites. Environmental Technology & Innovation, 2020, p. 101293. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101293>

PIRES-LIRA, Marinês F., et al. Potential of *Panicum aquaticum* Poir.(Poaceae) for the phytoremediation of aquatic environments contaminated by lead. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, vol. 193, p. 110336. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110336>

POMA LLANTOY, Víctor Raúl; VALDERRAMA NEGRÓN, Ana C. Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de Cadmio (II) y Mercurio (II) con la especie *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2014, vol. 80, no 3, p. 164-173.

RÁMILA, Consuelo DP, et al. Boron accumulation in *Puccinellia frigid*a, an extremely tolerant and promising species for boron phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 150, p. 25-34. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.020>

RASCIO, Nicoletta; NAVARI-IZZO, Flavia. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?. *Plant science*, 2011, vol. 180, no 2, p. 169-181. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>

REMON, Esteban, et al. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, 2005, vol. 137, no 2, p. 316-323. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.012>

ROBINSON, B. H.; ANDERSON, C. W. N.; DICKINSON, N. M. Phytoextraction: where's the action?. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 151, p. 34-40. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.01.001>

ROMEIRO, Solange, et al. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. *Bragantia*, 2007, vol. 66, no 2, p. 327-334. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000200017>

SARWAR, Nadeem, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 2017, vol. 171, p. 710-721. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>

SARWAR, Nadeem, et al. Zinc-cadmium interactions: impact on wheat physiology and mineral acquisition. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2015, vol. 122, p. 528-536. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.011>

SHEORAN, Vimla; SHEORAN, Attar Singh; POONIA, Poonam. Factors affecting phytoextraction: a review. *Pedosphere*, 2016, vol. 26, no 2, p. 148-166. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60032-7)

SINGH, Naveen K.; SINGH, Rajeev P. Potential of plants and microbes for the removal of metals: Eco-friendly approach for remediation of soil and water. En *Plant metal interaction*. Elsevier, 2016. p. 469-482. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00019-9>

TENG, Yue, et al. Visualization and quantification of Cadmium accumulation, chelation and antioxidation during the process of vacuolar compartmentalization in the hyperaccumulator plant *Solanum nigrum* L. *Plant Science*, 2021, p. 110961. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.110961>

TOGNACCHINI, Alice, et al. Nickel phytomining from industrial wastes: Growing nickel hyperaccumulator plants on galvanic sludges. *Journal of environmental management*, 2020, vol. 254, p. 109798. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109798>

TU, S., et al. Effects of arsenic species and phosphorus on arsenic absorption, arsenate reduction and thiol formation in excised parts of *Pteris vittata* L. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, vol. 51, no 2, p. 121-131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2003.08.003>

WU, Yingjie, et al. *Pseudomonas fluorescens* accelerates a reverse and long-distance transport of cadmium and sucrose in the hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*.

Chemosphere, 2020, vol. 256, p. 127156. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127156>

WU, Yingjie, et al. The plant-growth promoting bacteria promote cadmium uptake by inducing a hormonal crosstalk and lateral root formation in a hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 395, p. 122661. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122661>

WU, Mengxi, et al. Screening ornamental plants to identify potential Cd hyperaccumulators for bioremediation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, vol. 162, p. 35-41. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.049>

XU, Wumei, et al. Closely-related species of hyperaccumulating plants and their ability in accumulation of As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, p. 126334. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126334>

YAO, Zhitong, et al. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, vol. 16, p. 722-729. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.099>

YANG, Qianying, et al. SaZIP4, an uptake transporter of Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance. *Environmental and experimental botany*, 2018, vol. 155, p. 107-117. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.021>

ZENG, Peng, et al. Complementarity of co-planting a hyperaccumulator with three metal (loid)-tolerant species for metal (loid)-contaminated soil remediation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, vol. 169, p. 306-315. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.017>

ZHANG, Chang, et al. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 557, p. 785-790. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170>

ZHANG, Jin, et al. Comparison of ashing and pyrolysis treatment on cadmium/zinc hyperaccumulator plant: Effects on bioavailability and metal speciation in solid residues and risk assessment. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 272, p. 116039. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116039>

ZHANG, Xinying, et al. Effect of crop straw biochars on the remediation of Cd-contaminated farmland soil by hyperaccumulator *Bidens pilosa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 219, p. 112332. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112332>

ZWOLIŃSKI, Józef. Rates of organic matter decomposition in forests polluted with heavy metals. *Ecological Engineering*, 1994, vol. 3, no 1, p. 17-26. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0925-8574(94)90008-6)