



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tratamiento de aguas y suelos contaminados por cd y pb utilizando
microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción:

Revisión sistemática

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA AMBIENTAL

AUTOR:

Hanco Rojas, Elena Paola (ORCID: 0000-0003-3804-2911)

ASESOR:

Mg. Honores Balcázar, César Francisco (ORCID: 0000-0003-3202-1327)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERU

2022

Dedicatoria

Este logro profesional se lo dedico
A mis padres por su apoyo
constante y siempre Alentarme a seguir
y no rendirme.
A mi amado esposo Jhon Albert por su infinito amor,
Paciencia, que día a día alegra mi alma
con su compañía,
Por no soltar mi mano y apoyarme
en todo momento.

Agradecimiento

A Dios por estar conmigo en todo momento,
guiar mi camino, darme sabiduría y
no soltar mi mano en esta larga travesía.
A la UCV por darme la oportunidad de poder lograr
mi título profesional.
A mi asesor por su constante orientación.
Y a todas las personas que de una u otra forma
me apoyaron en la realización de este
trabajo.

Índice de contenido

Carátula.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras.....	vi
Índice de gráficos	vii
Resumen.....	viii
Abstract	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	13
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	13
3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística	13
3.3 Escenario de estudio.....	15
3.4 Participantes	15
3.5 técnica e instrumento de recolección de datos	15
3.6 Procedimiento	16
3.7 Rigor científico.....	17
3.8 Método de análisis de datos	17
3.9 Aspectos éticos	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
V. CONCLUSIONES	26
VI. RECOMENDACIONES.....	27
REFERENCIAS.....	28
ANEXOS	39

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Tabla de la matriz de categorización</i>	14
<i>Tabla 2. Plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb</i>	19
<i>Tabla 3. Microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados</i>	21
<i>Tabla 4. Mecanismos implicados en la remediación</i>	23

Índice de figuras

<i>Figura 1. Contaminación de los suelos</i> -----	4
<i>Figura 2. Contaminación del suelo por Cd y Pb</i> -----	5

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Clasificación de tecnologías de remediación</i> -----	7
<i>Gráfico 2. Procedimiento de recolección y selección de estudios</i> -----	16

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo determinar cuáles son los puntos más sobresalientes del tratamiento de aguas y suelos contaminados por cadmio y plomo utilizando microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción; para lo cual se empleó una metodología cualitativa, de tipo aplicada con un diseño sistemático, donde se usó como método la técnica de análisis documental.

Mediante los resultados obtenidos se tuvo que, las plantas hiperacumuladores empleadas son las *Lamiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Poaceae*, *Asteraceae*, *Fabaceae* y *Brassicaceae*; siendo entre las familias identificadas, la familia *Brassicaceae* la predominante. También, los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb son las bacterias donde el género de *Bacillus* y *Pseudomonas* son las más vistas por los investigadores. Además, el ion metálico Cd a diferencia del Pb presenta menores porcentajes de remoción con la aplicación de microorganismos. Por último, los mecanismos implicados son la bioacumulación; biosorción; biolixiviación; biomineralización; biotransformación; y quimisorción de metales pesados asistida por microbios. Teniendo que, la combinación de un sistema único planta-microbio juega un papel clave en el proceso de remediación por lo cual la quimisorción asistido por microbios es el mejor mecanismo implicado en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb.

Palabras clave: suelo, cadmio, plomo, microorganismos, fitoextracción

Abstract

The objective of this study was to determine which are the most outstanding points in the treatment of water and soil contaminated by cadmium and lead using microorganisms and amendments to improve phytoextraction; for which a qualitative methodology was used, of an applied type with a systematic design, where the documentary analysis technique was used as a method.

The results obtained showed that the hyperaccumulator plants used are Lamiaceae, Caryophyllaceae, Poaceae, Asteraceae, Fabaceae and Brassicaceae; among the families identified, the Brassicaceae family is the predominant one. Also, the microorganisms used as treatment of water and soil contaminated with Cd and Pb are bacteria where the genus *Bacillus* and *Pseudomonas* are the most seen by researchers. In addition, the metal ion Cd, unlike Pb, presents lower removal percentages with the application of microorganisms. Finally, the mechanisms involved are bioaccumulation; biosorption; bioleaching; biomineralization; biotransformation; and microbially assisted chemisorption of heavy metals. Considering that, the combination of a unique plant-microbe system plays a key role in the remediation process, microbe-assisted chemisorption is the best mechanism involved in microbe-assisted remediation of Cd and Pb.

Keywords: soil, cadmium, lead, microorganisms, phytoextraction.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de principales problemas que vienen acarreado a todo el mundo es la escases de agua y es que se encuentra previsto por la Agencia Mundial para el Desarrollo del Agua de las Naciones Unidas, que en los próximos años este problema incrementará (Goswami S. et al., 2021, p.163). Ante ello, los metales pesados (HM), aquellos cuyo peso supera los 5 g cm⁻³ han sido informados que tienen presencia excesiva en el medio ambiente (Antoniadis et al., 2019).

Siendo así que, el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) son metales presentes de manera ubicua en los suelos superficiales llegando hasta los medios hídricos, debido a actividades antropogénicas, lo que representa una amenaza para la salud ecológica y humana debido a su naturaleza cancerígena (Arshad M. et al., 2020, p.1).

Como consecuencia, la contaminación por Cd en las últimas décadas se ha convertido en un problema central en todo el mundo, lo que lo convierte en una preocupación grave y fundamental para la comunidad científica. Donde aproximadamente el 44% del Cd en el medio ambiente se debe a las actividades antropogénicas (Rizwan et al., 2016).

Siendo, además, entre estas actividades antropogénicas la agricultura aquella que genera mayor contaminación; mediante el uso de pesticidas y fertilizantes fosfatados (Manzoor M. et al., 2021, p.3).

Así también la contaminación por plomo (Pb) en el medio ambiente se produce predominantemente a través de actividades antropogénicas, que plantean amenazas importantes para la salud humana y la de la biota (Kumar S. et al., 2022, p.1). Además, se acumulan en grandes cantidades en el medio ambiente y afectan negativamente a la microbiota del suelo, plantas, animales y humanos (Gul I. et al., 2020, p.2).

la exposición a largo plazo al Cd y al Pb puede causar efectos adversos crónicos en la salud, además, estudios ya han demostrado que los daños renales inducidos por el Cd y/o el Pb suelen estar asociados a la sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Cabral M. et al., 2016, p.2).

Por tales motivos, y debido a que los niveles de Cd y Pb son alarmantes en el recurso suelo y agua se han aplicado varios métodos convencionales, siendo poco eficientes

o presentando diversas desventajas desfavoreciendo su aplicación (Yadav Ajit P. et al., 2021, p.2). Por tal motivo, se ha pensado en el uso de microorganismos que presenten la capacidad de tolerar entornos altamente críticos con presencias de Cd y Pb (Gautam A. et al., 2021, p.3).

En otras palabras, la biosorción es una técnica bien conocida que utiliza microbios vivos o muertos para la eliminación de HM y se puede utilizar como adsorbentes; bacterias, hongos, algas, residuos de plantas, frutas, entre otros (Kumar R. et al., 2016, p.1). Así también, entre los microbios se encuentran las algas pueden aplicarse como bioadsorbentes de metales pesados (HMs); siendo que este uso para la remediación de contaminantes se denomina fitorremediación (Jais N. et al., 2017, p.1).

Por tal motivo, mediante la problemática expuesta se plantea el siguiente problema de estudio: ¿Cuáles son los puntos más sobresalientes del tratamiento de aguas y suelos contaminados por cadmio y plomo utilizando microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción?

PE1: ¿Cuáles son las plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo?

PE2: ¿Cuáles son los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la fitoextracción?

PE3: ¿Cuáles son los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb?

De igual forma se elaboró el objetivo del estudio: Determinar cuáles son los puntos más sobresalientes del tratamiento de aguas y suelos contaminados por cadmio y plomo utilizando microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción.

Mientras que los objetivos específicos del estudio son:

OE1: Clasificar cuáles son las plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo

OE2: Analizar cuáles son los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la fitoextracción

OE3: Identificar cuáles son los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb

El enfoque principal del presente estudio es comparar y analizar la técnica de fitoextracción para la eliminación de Cd/Pb de sitios contaminados (agua y suelo), mediante la recolección y análisis de diversos estudios actualizados a nivel mundial. Por tal motivo, este trabajo de investigación presenta una justificación teórica. Así mismo, se busca mostrar os hallazgos relevantes sobre el uso de microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción de Cd y Pb del agua y el suelo, con el fin de brindar estrategias mejoradas para que futuras investigaciones puedan aplicarlos de manera experimental, siendo enfocado este trabajo a los futuros investigadores.

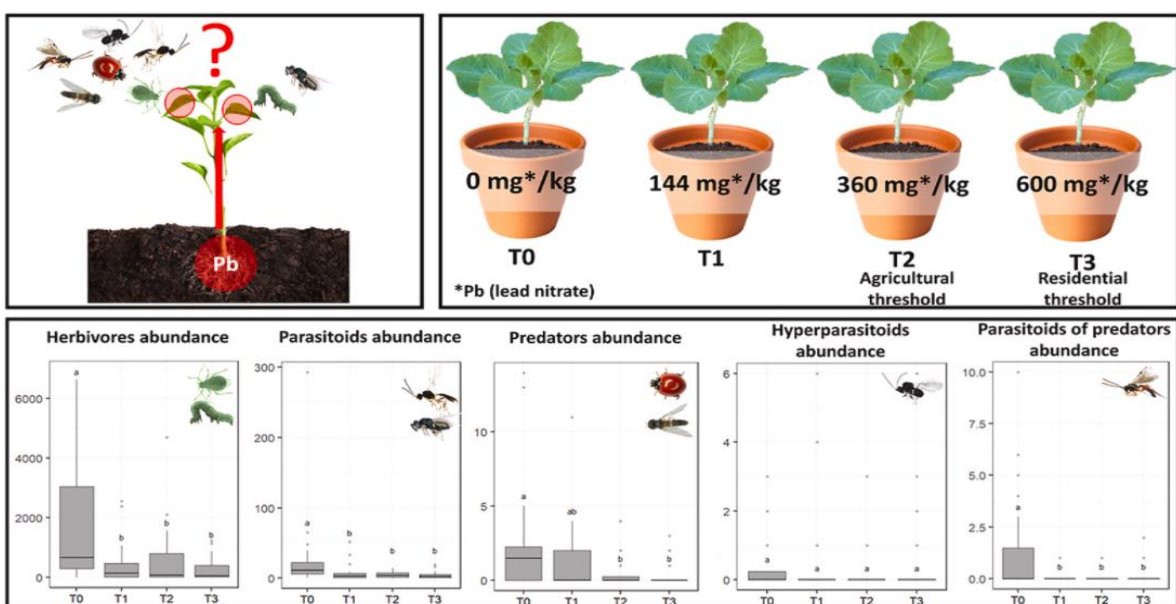
II. MARCO TEÓRICO

La contaminación del suelo se refiere a la presencia de algunas sustancias en el suelo causadas por las actividades humanas, que pueden cambiar la calidad y la función del suelo, provocar la degradación del suelo, dañar las estructuras básicas del mismo y tener el potencial de perjudicar la salud humana y medioambiental (Liu L et al., 2018, p.1).

La contaminación del suelo ha sido identificada como una prioridad nacional clave en China, con un aumento de informes sobre las tierras agrícolas y la salud humana afectadas por la contaminación del suelo (Tóth G. et al., 2016, p.1). En China, se calcula que casi 20 millones de hectáreas de tierra cultivable han sido contaminadas por metales pesados, como el Cd y Pb, lo que representa aproximadamente el 20% de la superficie total superficie de tierra cultivable (Sun Y. et al., 2019, p.1).

En el Perú las regiones de Ancash, Apurímac, Arequipa, Cajamarca, Huancavelica, Junín, Pasco y Puno son las zonas que concentran la mayor cantidad de sitios MEL (Pasivos Ambientales Mineros) (Bech J. et al., 2016, p.1). La cordillera de los Andes se ve afectada por procesos erosivos que conducen al arrastre de suelos hacia valles agrícolas y ríos durante la época de lluvias (Egeric M. et al., 2019, p.241).

Figura N°1. Contaminación de los suelos

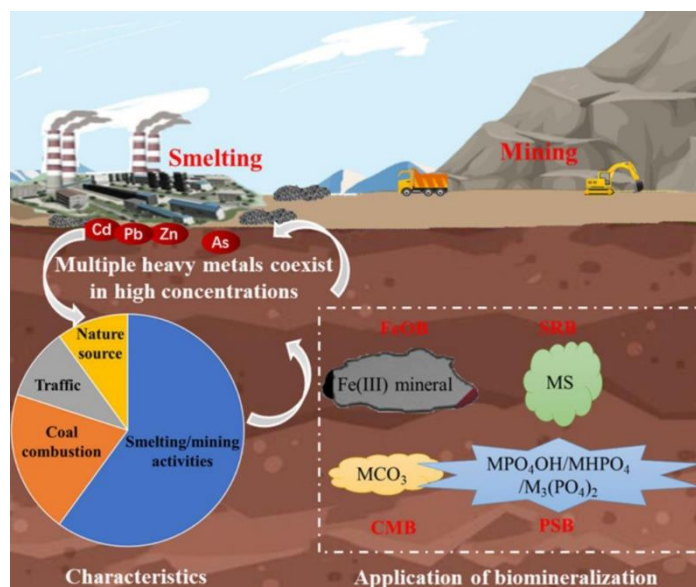


Fuente: Morales S. et al., 2022

Los metales pesados tienden a acumularse, en general, en la parte superior de los perfiles de suelo (horizontes superficiales) y posteriormente migran hacia horizontes más profundos (Chen Y. et al., 2018, p.1). Hay numerosos lugares en los países industrializados que están contaminados con plomo (Pb), Cadmio (Cd) y otros metales (Rui D. et al., 2019, p.1). Las fuentes de Pb incluyen las pinturas, los aditivos de la gasolina, la fundición y el reciclaje de Pb fundición y refundición, demolición de automóviles, producción de producción de pesticidas, la rotura de baterías de ácido de Pb y la eliminación de baterías (Fajardo C. et al., 2019, p.57).

La contaminación por metales pesados debido a actividades antrópicas es un grave problema ambiental debido a sus numerosas fuentes, su toxicidad, su no biodegradabilidad y su comportamiento acumulativo (Ghosh A. et al., 2019, p.1). Por ejemplo, la contaminación en instalaciones de reciclaje de baterías de Pb es compleja (He L. et al., 2021, p.1). Resultante del enterramiento de las carcasas de las pilas, la eliminación de residuos de control de la contaminación atmosférica o de escorias de altos hornos escoria de altos hornos, las emisiones de las chimeneas y las emisiones fugitivas (Hamid Y. et al., 2019, p.259). En la figura N°2 se aprecia la contaminación de suelos por metales pesados como el Cd y Pb.

Figura N°2. Contaminación del suelo por Cd y Pb



Fuente: Luo X. et al., 2022

El plomo (Pb) es el principal contaminante en el suelo y en los depósitos de residuos; Sin embargo, otros metales, incluido el cadmio (Cd), se encuentran normalmente en

concentraciones más bajas (Lahori A. et al., 2017, p.1). Los iones de metal en el suelo por lo general migran y se difunden a través de ríos, meteorización y otros métodos, causando daños a la calidad del suelo en las áreas circundantes y poniendo en peligro la salud de las comunidades humanas a través de efectos de acumulación (Zheng X. et al., 2022, p.1). Se sabe que varias especies de plantas, incluyendo árboles, cultivos vegetales hierbas y malas hierbas son conocidas por acumular una amplia metales pesados (Narendrula K. et al., 2017, p.13).

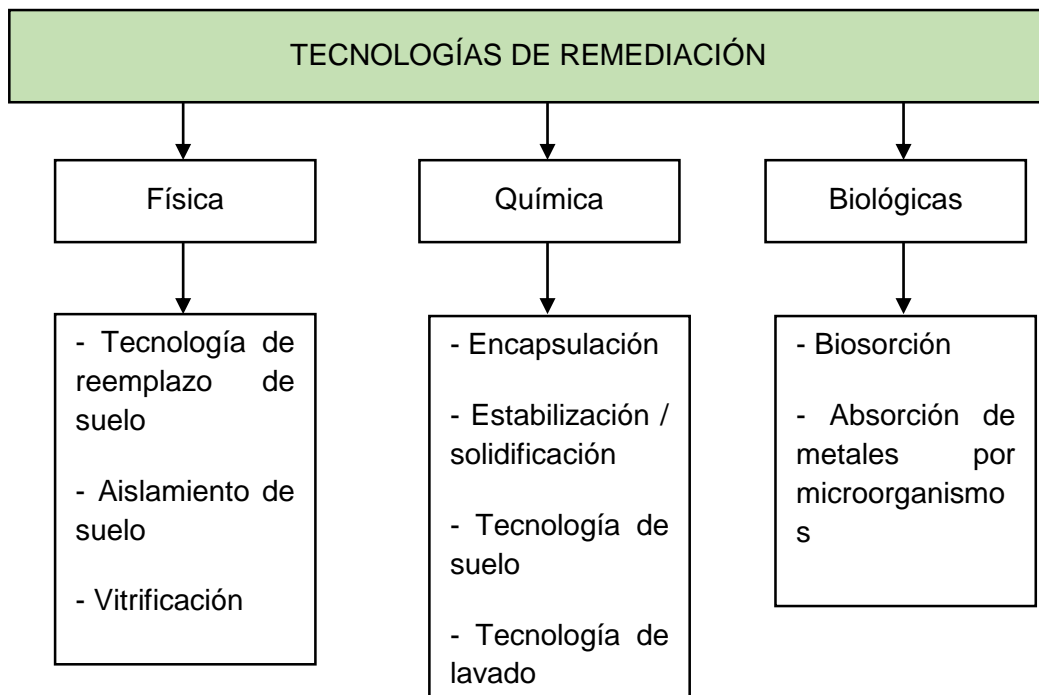
La evaluación del grado y la toxicidad de la contaminación del suelo es importante para controlar los riesgos del sitio contaminado, prevenir más daños al suelo y delinear estrategias de remediación (Mazurek R. et al., 2019, p.13). Los índices de contaminación proporcionan una herramienta útil para la cuantificación de la calidad del suelo y la identificación de las fuentes de contaminación (Liang J. et al., 2017, p.1). Además, pueden ayudar durante los esfuerzos de gestión y remediación (Angst G, et al., 2018, p.216).

Las instalaciones de reprocesamiento y eliminación de baterías de automóviles pueden ser fuentes significativas localizadas de peligro de Pb para la salud pública y el medio ambiente (Wang F. et al., 2021, p.1).

En la actualidad, los contaminantes de metales pesados debido a sus características a largo plazo, acumulativas, ocultas, latentes e irreversibles no sólo dañan el entorno ecológico, sino que también ponen en peligro la seguridad de la vida a través de la contaminación de la cadena alimentaria (Tang J. et al., 2020, p.1). Las concentraciones elevadas de metales pesados en los suelos pueden introducirse en la flora, la fauna o los seres humanos a través de las cadenas alimentarias, lo que representa una amenaza directa o indirecta para la salud humana (Midhat L. et., 2019, p.150).

De igual forma, los metales pesados son elementos no esenciales para las plantas en crecimiento, y sus altas concentraciones en el suelo pueden causar daños y, en algunos casos, pueden provocar la muerte de las plantas con niveles muy altos de metales pesados (Oves M. et al., 2016, p.1). En general, las tecnologías de remediación se pueden clasificar en tres grupos principales (Park B. et al., 2017, p.1)

Gráfico N°1. Clasificación de tecnologías de remediación



Elaboración Propia

La fitorremediación es una técnica prometedora y económicamente efectiva que utiliza especies vegetales para descontaminar sitios acuáticos o terrestres contaminados por metales pesados (Yin S. et al., 2022, p.1). Esta tecnología es rentable, sencilla y respetuosa con el medio ambiente, con una alteración medioambiental mínima (Rezania S. et al., 2016, p.587). La tecnología de fitorremediación involucra rutas de fitoextracción, fitoestabilización y fitovolatilización para la eliminación de iones metálicos de suelos y agua (Govarthanan M, et al., 2018, p.1).

Las plantas difieren en su capacidad para acumular metales pesados; por esta preocupación, la selección de especies vegetales para la fitoextracción de metales pesados depende principalmente de la capacidad tolerante y de la biomasa de la planta seleccionada (Shen X. et al., 2021, p.1). La fitoextracción es una herramienta efectiva para remover metales pesados del suelo contaminado hacia los tejidos vegetales; posteriormente, puede ser procesado o reciclado de forma fácil y segura, mediante incineración, compostaje o secado (Jaswal R. et al., 2022, p.240).

La alta biomasa de la planta elimina los iones metálicos altos del suelo tratado (Jesitha K. et al., 2021, p.463). Algunas especies de plantas pueden acumular altos contenidos de metales pesados en sus tejidos; sin embargo, producen poca biomasa y son

plantas de crecimiento lento, lo que hace inviable el uso de estas especies en fitorremediación (Hou D. et al., 2020, p.1).

Por ejemplo, se reveló una disminución en la producción de biomasa de *B. napus* cultivado en suelo contaminado con Cd (Upcraft T. et al., 2020, p.326). Por lo tanto, la producción de biomasa de especies de plantas seleccionadas para la hiperacumulación es un factor importante que controla el éxito de la tecnología de fitorremediación (Shen Z. et al., 2020, p.121).

Los estudios previos demostraron que el girasol muestra una alta tolerancia a los metales pesados (Kumar R. et al., 2017, p.1). Debido a que el girasol es una planta anual de los nativos americanos que pertenece a la familia de las Asteraceae con una gran cabeza floral (inflorescencia), y crece en una amplia gama de tipos de suelo (Ramakrishnan S. et al., 2021, p.1). El tallo de la flor puede crecer hasta 3 m de altura, con la cabeza de la flor alcanzando hasta 30 cm de diámetro con las semillas "grandes" (Pramanik K. et al., 2021, p.1).

El mamoun I. et al., 2020; en su estudio analizó la tolerancia y acumulación de zinc, plomo y cadmio en *Cistus libanotis*, *Cistus albidus* y *Cistus salviifolius*. Las plantas fueron cultivadas en condiciones hidropónicas y expuestas a diferentes concentraciones de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (100 y 200 μM), ZnSO_4 (100 y 200 μM), o CdCl_2 (10 y 20 μM) durante 3 semanas. La biomasa vegetal y la acumulación de metales en las raíces y partes aéreas variaron mucho entre las especies. Las tres especies parecían ser sensibles a Zn. Sin embargo, *C. albidus* mostró una fuerte tolerancia al Pb y acumuló grandes cantidades de Pb y Cd en sus raíces. *C. libanotis* acumuló grandes cantidades de Pb y Cd en sus partes aéreas. Por lo tanto, *C. libanotis* puede clasificarse como una especie acumuladora de Pb y Cd. Los resultados del estudio muestran que *C. albidus* es adecuada para la fitoestabilización de suelos contaminados con Pb, mientras que *C. libanotis* puede utilizarse para la fitoextracción tanto de Pb como de Cd.

Palitoglu M. et al., 2018; investigó la translocación y acumulación de cadmio (Cd) del suelo en 11 plantas nativas. Se recolectaron muestras de plantas y suelo del campo, y las concentraciones de Cd se analizaron mediante espectroscopía de masas de plasma acoplado inductivamente. Los valores medios de Cd en suelo, raíces y brotes de plantas nativas en el área de estudio fueron $82,8 \pm 5$, $55,4 \pm 6$ y $43,5 \pm 4$ mg kg⁻¹

1, respectivamente. Las plantas se separaron en varios grupos de acuerdo con los coeficientes de enriquecimiento para los valores de brotes y raíces de las plantas. Estos grupos mostraron *Carduus nutans* y *Phlomis* podrían ser plantas potencialmente bioacumuladoras útiles para la fitorremediación de suelos mineros contaminados por Cd.

Wu M. et al., 2018; tiene como objetivo principal de estudio buscar plantas ornamentales con una capacidad excepcional para acumular y translocar iones Cd, así como biomasa suficiente para la cosecha. En cuanto a biomasa aérea, biomasa radical, altura de planta e índice de tolerancia (TI), *Malva rotundifolia* mostró tolerancia alta a Cd y *Malva crispa*, *Sida rhombifolia*, *Celosia argentea* y *Celosia cristata* tolerancia media; *Althaea rosea* y *Abutilon theophrasti* fueron más sensibles a Cd que las otras plantas. Una respuesta hormética fue inducida por Cd en *M. crispa*, *C. argentea*, *C. cristata* y *M. rotundifolia*. Con base en su capacidad de acumulación de Cd, coeficientes de bioacumulación (BCF) y factores de translocación (TF), se seleccionó *M. rotundifolia* de plantas candidatas después de 60 días de exposición a suelo contaminado con Cd y se encontró que había acumulado más de 200 mg kg⁻¹ Cd en sus raíces y 900 mg kg⁻¹ en sus brotes. Además, *M. rotundifolia* Los BCF y los TF fueron superiores a 1,0, oscilando el primero entre 1,41 y 3,31 y el segundo entre 1,03 y 7,37. En conjunto, estos resultados indican que *M. rotundifolia* se puede clasificar como un hiperacumulador modelo.

Sidhu G. et al., 2017; investigó por primera vez el potencial de una planta salvaje y desagradable al paladar, *Coronopus didymus*, en términos de su capacidad para tolerar y acumular cadmio (Cd) con fines de fitorremediación. Se realizó un experimento de invernadero durante 6 semanas para evaluar el efecto de Cd de 100 a 400 mg kg⁻¹ sobre el crecimiento, la biomasa, el aparato fotosintético, la absorción y acumulación de Cd en plantas de *C. didymus*. La aplicación de Cd facilita el crecimiento de las plantas mientras que a niveles más altos se notó una ligera reducción. La concentración de Cd en raíces y brotes alcanzó un máximo de 867.2 y 864.5 mg kg⁻¹ DW respectivamente, a 400 mg kg⁻¹ tratamiento de Cd. La exposición a Cd incrementó la generación de anión superóxido (O₂^{•-}), el contenido de H₂O₂, el nivel de MDA y la respuesta antioxidante (SOD, CAT y POD) en raíces y brotes de *C. didymus*. Sin embargo, se notó una ligera disminución en las

actividades de SOD y CAT en las raíces con el tratamiento más alto de Cd (400 mg kg⁻¹).

Wan X. y Lei M., 2017; presentó un estudio con dos posibles hiperacumuladores de metales múltiples encontrados en cuatro sitios mineros en la provincia de Hunan, China. Donde los contenidos de As, Pb, Zn, Cd, Cu y Sb mostraron una alta contaminación por HM. En comparación con el segundo estándar nacional de calidad ambiental del suelo, las tasas superiores al estándar de As, Pb, Zn, Cd, Cu y Sb fueron 97,8 %, 80,0 %, 82,2 %, 68,9 %, 88,9 % y 73,3 %, respectivamente. La fitoextracción es una tecnología de remediación emergente para suelos contaminados con HM. Sin embargo, rara vez se han informado hiperacumuladores que puedan extraer simultáneamente varios metales. Por ello, también realizó un reconocimiento de campo en los cuatro sitios mineros; Los resultados mostraron que *Pteris vittata* L. y *Viola principis* H. de Boiss eran dos posibles extractores multimetal. Dos especies de plantas podrían prosperar en suelos severamente contaminados con múltiples metales. *P. vittata* acumuló 4106 mg As kg⁻¹, 499.5 mg Pb kg⁻¹, y 321.5 mg Sb kg⁻¹ en las partes aéreas; en comparación, *V. principis* acumuló 1032 mg As kg⁻¹, 2350 mg Pb kg⁻¹ y 1201 mg Cd kg⁻¹ en las partes aéreas. El factor de bioacumulación de *P. vittata* para As, Pb, Zn y Sb fue > 1. El factor de bioacumulación de *V. principis* para As, Pb, Zn y Cd también fue > 1. Por lo tanto, *P. vittata* es un hiperacumulador de As y un acumulador de Pb y Sb. Por el contrario, *V. principis* es un hiperacumulador de Cd, Pb y As.

Koptsik G. et al., 2015; analizó el estado actual, los problemas y las perspectivas de la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Se presta especial atención a la fitoextracción y la fitoestabilización como los métodos más extendidos y alternativos de fitorremediación de suelos. Obteniendo que la eficiencia de la fitorremediación está relacionada con la capacidad natural de las plantas para la acumulación y translocación de metales, su tolerancia a un alto contenido de metales, la biomasa vegetal y las enmiendas aplicadas. Se consideran las ventajas y desventajas de la fitorremediación en comparación con otros métodos de remediación de suelos contaminados in situ. Ejemplos de fitoextracción y fitominería exitosos para la limpieza de suelos contaminados en Rasteburg (Sudáfrica) y la fitoestabilización de páramos tecnogénicos cerca de las plantas de cobre-níquel en Sudbury (Ontario).

Manzoor M. et al., 2018; tuvo como objetivo la detección de especies de plantas ornamentales expuestas al gradiente de Pb en suelos enriquecidos para la fitoextracción de Pb. Se seleccionaron veintiuna especies de plantas ornamentales que crecen actualmente en Pakistán para evaluar su potencial de acumulación de Pb. Se realizaron experimentos en macetas para evaluar las propiedades acumulativas de las diferentes especies de plantas en suelos de control sin enriquecimiento ($Pb = 0$) y enriquecidos con diferentes niveles de Pb a 500, 1000, 1500 y 2000 $mg\ Pb\ kg^{-1}$ del suelo. Se calcularon el factor de biotranslocación (TF), el factor de enriquecimiento (EF) y el factor de bioconcentración (CF) para evaluar el potencial de fitorremediación de las especies de plantas analizadas después de siete semanas de exposición. De 21 especies de plantas, *Pelargonium hortorum* y *Mesembryanthemum criniflorum* se desempeñaron mejor y acumularon más de 1000 $mg\ Pb\ kg^{-1}$ de biomasa seca de brotes cuando se cultivaron en suelos contaminados con 500, 1000 y 1500 $mg\ Pb\ kg^{-1}$. Ambas plantas no tuvieron una variación significativa ($P < 0.05$) en la biomasa seca total con el aumento de la concentración de Pb en el suelo indicando una alta tolerancia al Pb.

Han Y. et al., 2018; estudió el efecto del ácido cítrico (AC) y EDTA sobre el crecimiento, estructura anatómica de raíces y hojas, propiedades fotosintéticas y acumulación de plomo (Pb) en plántulas de *Iris halophila* cultivadas en relaves de minas de Pb durante 30 días. Los resultados mostraron que los pesos secos de las partes aéreas y subterráneas de *I. halophila* bajo los tratamientos de 2 $mmol\ kg^{-1}$ CA aumentaron significativamente y el valor del índice de tolerancia (IT) tratado con 2 $mmol\ kg^{-1}$ EDTA fue un 19 % más bajo que el mando. Los contenidos de pigmentos fotosintéticos aumentaron y disminuyeron significativamente con 0,5 $mmol\ kg^{-1}$ CA y 2,0 $mmol\ kg^{-1}$ EDTA, respectivamente. La estructura anatómica de la hoja se vio afectada negativamente por 2,0 $mmol\ kg^{-1}$ de EDTA. El tratamiento de 2 $mmol\ kg^{-1}$ CA mejoró la acumulación de Cd y Zn en las partes aéreas, y la acumulación de Pb, Cu, Cd y Zn en las partes subterráneas.

Yan L. et al., 2017; realizó un experimento de microcosmos para comparar cómo diferentes agentes quelantes mejoran la fitoextracción de plomo (Pb) por *Mirabilis jalapa* de un suelo contaminado artificialmente con Pb. Los agentes quelantes utilizados incluyeron ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), ácido nitrilotriacético (NTA), ácido etilendiaminodisuccínico (EDDS), ácido oxálico, ácido húmico, ácido

cítrico y ácido tartárico, con concentraciones que oscilan entre 0 y 2000 mg/kg. Los resultados muestran que con concentraciones crecientes de agentes quelantes, las concentraciones, los coeficientes de bioacumulación y los factores de translocación de Pb en *M. jalapa* aumentaron gradualmente. De todos los agentes quelantes utilizados, las concentraciones, coeficientes de bioacumulación y factores de translocación de Pb en *M. jalapa* fueron mayores para EDTA y NTA que para los otros agentes quelantes.

Zhi J. et al., 2020; en su estudio, clonó el gen *PaMT3-1* que codifica una proteína inestable de 63 aminoácidos del hiperacumulador de cadmio *Phytolacca americana*. El gen se insertó en un vector de expresión vegetal y se introdujo en plantas de tabaco. El contenido de cadmio de las plantas transgénicas se midió después del tratamiento con CdCl_2 100 mM durante 7 días. Las raíces transgénicas y de tipo salvaje tenían contenidos de cadmio similares, mientras que el contenido de cadmio de las hojas transgénicas era del 66,28 al 78,70 % del tipo salvaje. El coeficiente de transporte de cadmio en plantas transgénicas se redujo entre un 23,31% y un 35,52% en relación con el tipo salvaje. De acuerdo con varios índices fisiológicos, incluido el contenido de malondialdehído, la fuga relativa de electrolitos, la actividad de la raíz y el contenido de azúcar soluble, las plantas transgénicas se desempeñaron mejor que las de tipo salvaje. El gen *PaMT3-1* puede mejorar significativamente la resistencia de las plantas al cadmio y tiene potencial como recurso genético importante en la fitorremediación.

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

El presente estudio presentó un enfoque cualitativo; donde Berk Michael et al., (2016, p.2); señala que los estudios cualitativos buscan responder el porqué de los fenómenos buscando responderlas mediante la investigación, así también, este tipo de método de investigación brinda puntos de vista únicos sobre los acontecimientos suscitados.

Por otro lado, el tipo de investigación es aplicada, debido a que, este tipo de investigación no asume o hace supuesto de algo, por lo contrario, genera conocimientos sobre comportamientos; siendo así que la investigación aplicada a diferencia de los estudios básicos va a generar conocimientos de a la ciencia básica para resolver algún problema (Edgar T. y David O., 2017, p.1). Es así que se aplica este tipo de investigación, ya que, se recolectaran y estudiaran estudios científicos acerca de la aplicación de microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción para resolver el problema de estudio.

El diseño usado fue el sistemático; siendo este definido por Baloyi W., (2016, p.1); como una revisión de una pregunta claramente formulada que utiliza métodos sistemáticos y explícitos para identificar, seleccionar y evaluar críticamente la investigación relevante, y para recopilar y analizar datos de los estudios que se incluyen en la revisión.

3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

Las categorías y sub categorías planteadas fueron elaborados en la Tabla 1, de acuerdo con los 3 objetivos y problemas específicos que resolverán el problema principal; ello mediante el uso de la matriz apriorística.

Tabla N°1. Tabla de la matriz de categorización

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CRITERIO 1	CRITERIO 2
Clasificar cuáles son las plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo	¿Cuáles son las plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo?	plantas hiperacumuladores	<ul style="list-style-type: none"> • Planta hiperacumuladora para el Pb • Planta hiperacumuladora para el Cd <p>Mosgaard M. et al., (2022)</p>	De acuerdo a la especie de planta	De acuerdo a la concentración de la planta hiperacumuladora
Analizar cuáles son los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la fitoextracción	¿Cuáles son los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la fitoextracción?	microorganismos usados como tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Bacterias autóctonas • Cepas fúngicas <p>(Bravi L. et al., 2020, p.4)</p>	De acuerdo al tipo de bacteria usada.	De acuerdo a tipo de hongo usado
Identificar cuáles son los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb	¿Cuáles son los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb?	mecanismos implicados en la remediación asistida	<ul style="list-style-type: none"> • Bioacumulación • Biosorción • Biolixiviación <p>(Ma, Zhang y Yin, 2020, p.2)</p>	De acuerdo al tipo de adsorción.	De acuerdo a la cantidad de estudios aplicados

3.3 Escenario de estudio

De acuerdo con Magallanes, Colaneri, y Rodríguez, (2013, p.587), el escenario de estudio es el espacio o lugar donde se llevan a cabo los estudios experimentales para descubrir un fenómeno. Ante ello, el presente trabajo contó con los escenarios de las diversas literaturas usadas para el desarrollo del estudio.

3.4 Participantes

Para llevar a cabo el estudio se consideró a las plataformas virtuales como participantes del trabajo; siendo los usados: Sciencedirect, Pubmed y redalyc.

Estas plataformas son consideradas ya que son fuentes confiables por presentar estudios científicos indizados, y permiten la exploración de todo tipo de documento a nivel mundial.

3.5 técnica e instrumento de recolección de datos

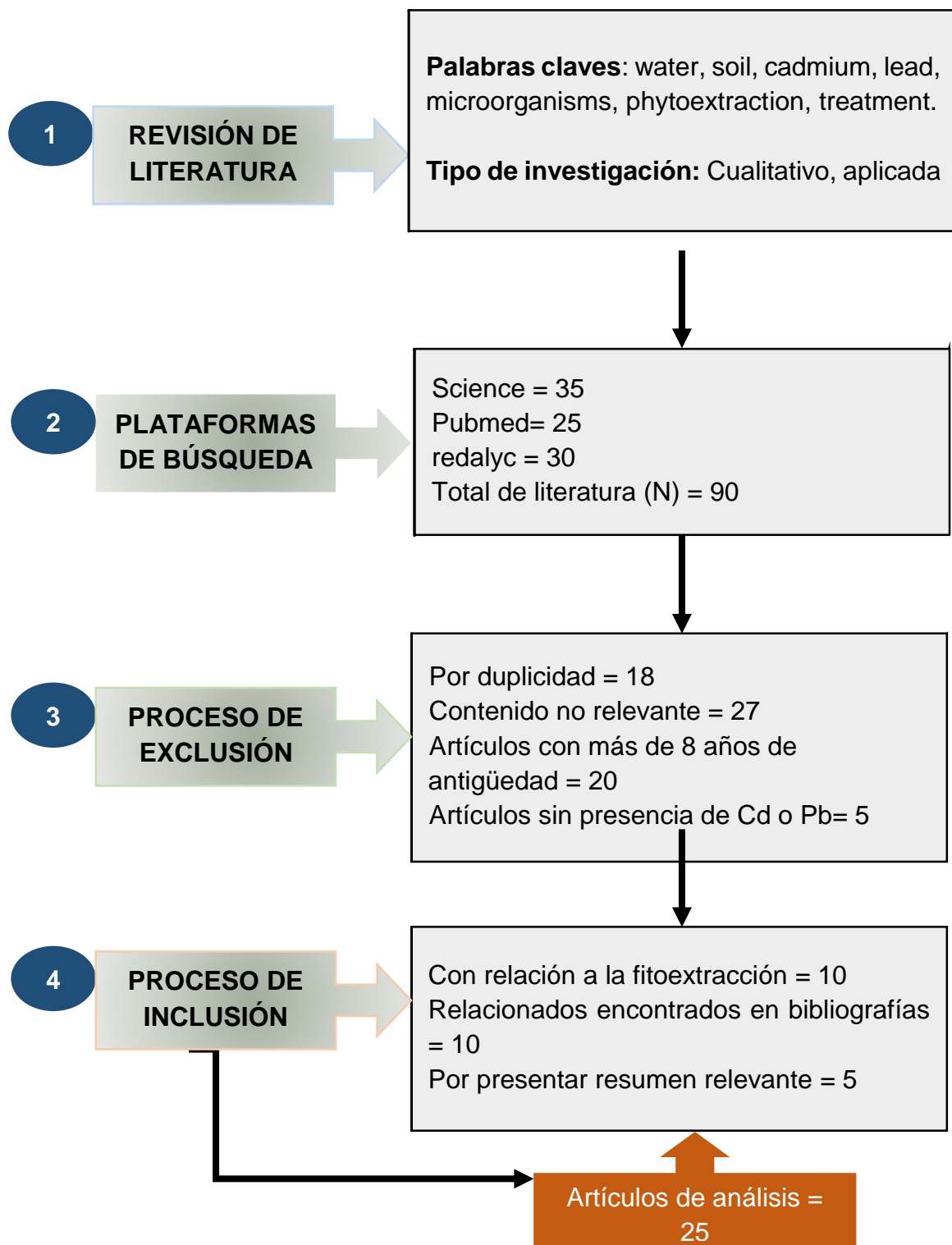
Para la investigación y desarrollo del presente estudio se debe emplear una técnica, para recolectar la información necesaria e importancia que ayudarán a la resolución del objetivo planteado. Estos también se pueden llevar mediante la observación, entrevista, recolección bibliográfica, etc., con las cuales se realizará la extracción de información básica para investigación. (Niño, 2011, p.29).

El instrumento que se usa en cada estudio sirve de instrumento para la ejecución de técnicas (Sánchez, reyes y Mejía, 2018, p78). Siendo el instrumento utilizado la ficha de análisis de contenido.

Para ello, el presente estudio utilizó la técnica de análisis documental o análisis de contenido cuyo fin fue ser usado para generar la síntesis de los artículos científicos seleccionados mediante el proceso de selección, mientras que el instrumento de recolección de datos estuvo dado por una "ficha de análisis de contenido", la cual está contenida de diferentes puntos estratégicos que permitieron recolectar información básica y resaltante para el desarrollo del estudio.

3.6 Procedimiento

Gráfico N° 2. Procedimiento de recolección y selección de estudios



Elaboración propia

3.7 Rigor científico

El rigor científico está determinado por criterios científicos, el cual a través de una serie de conocimientos e información obtenida permitirá establecer lineamientos teóricos, metodológicos y procedimientos que darán respuesta o solución al problema planteado (Quiroz, 2020, p.31).

Dicho esto, Noreña, et al., (2012), considera 4 criterios; los cuales contribuyen con un rigor científico apto para dar calidad en el desarrollo del estudio:

Primero considera a la credibilidad; este criterio busca dar a conocer los descubrimientos en su realidad; es decir, aproximar la solución en relación con el problema, así mismo este criterio permite comparar los resultados de un estudio con los de otros similares, no obstante, este rigor se muestra veraz cuando los estudios incluyen a personas e individuos que han formado parte de la experiencia o el fenómeno investigado.

Segundo criterio es la transferencia; este criterio permite utilizar los datos que un autor obtuvo en su estudio experimental para ser aplicados en contextos similares teniendo en cuenta el contexto inicial donde se generan los resultados, con el fin de realizar comparaciones.

Tercer criterio es la consistencia; este criterio tiene como objetivo estabilizar los datos, es tener en cuenta las condiciones en las que la información ha sido generada, las fuentes con las que se realizó el estudio y la verificación de los participantes, además este criterio toma en cuenta que por la naturaleza de la investigación cualitativa siempre tendrá un cierto grado de inestabilidad.

Finalmente, la confirmación; criterio por el cual mediante un proceso se garantiza la veracidad de los resultados, sin que estos estén influenciados por motivación, interés e inclinación del investigador, para ello se aplica técnicas de triangulación, reflexión epistemológica y verificación.

3.8 Método de análisis de datos

El método de análisis de este estudio utilizó diversas teorías y conceptos, por lo cual se empleó el método de triangulación; permitiendo este el uso de la matriz apriorística; en la cual se describen las siguientes categorías y sub categorías:

- C. 1: plantas hiperacumuladores
- C.2: microorganismos usados como tratamiento
- C.3: mecanismos implicados en la remediación asistida

Sub categorías:

- Planta hiperacumuladora para el Pb
- Planta hiperacumuladora para el Cd
- Bacterias autóctonas
- Cepas fúngicas
- Bioacumulación
- Biosorción
- Biolixiviación

3.9 Aspectos éticos

Este estudio cumplió con el código de ética de la universidad cesar vallejo, donde asegura las buenas prácticas, responsabilidad y honestidad del investigador. Así mismo, se cumplió con el respeto a la autoría, siguiendo con la debida cita de los investigadores de quienes se utilizó sus estudios, ello mediante la cita con la norma ISO 690 -2.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los puntos más sobresalientes del tratamiento de aguas y suelos contaminados por cadmio y plomo utilizando microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción se demuestran mediante las tablas 2, 3 y 4; donde se detallan las plantas hiperacumuladores empleadas, los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados y los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios.

Siendo en la tabla 2, clasificado las plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo, teniendo como criterios la especie de planta y la concentración de la planta hiperacumuladora usada.

Tabla N°2. Plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb

Especies de plantas	Concentración en brote de planta (mg kg ⁻¹)	Fuente
Cadmio (Cd)		
<i>Cistus libanotis</i>	440	El mamoun I. et al., 2020
<i>Carduus nutans L</i>	110	Palitoglu M. et al., 2018
<i>Malva rotundifolia</i>	900	Wu M. et al., 2018
<i>Coronopus didymus</i>	864	Sidhu G. et al., 2017
<i>Viola principis</i>	1201	Wan X. y Lei M., 2017
<i>Thlaspi caerulescen</i>	5000	Koptsik G. et al., 2015
<i>Pelargonium roseum</i>	1957	Mahdieh et al., 2014
<i>Eleocharis acicularis</i>	239	Sakakibara et al., 2013
<i>Solanum photeinocarpu</i>	158	Zhang et al., 2013
<i>Phytolacca americana</i>	2 100	Zhi J. et al., 2020
<i>Brassica napus</i>	-	Ma ying et al., 2016
<i>Glycine max</i>	-	Guo J. y Chi J., 2015
<i>Zea may</i>		Moreira H. et al., 2015
Plomo (Pb)		
<i>Mesembryanthemum criniflorum</i>	1269	Manzoor M. et al., 2018
<i>Pelargonium hortorum</i>	1028	
<i>Viola principis</i>	2350	Wan Xiaoming et al., 2017
<i>Brassica juncea</i>	10 300	Koptsik G. et al., 2015
<i>Chlorophytum comosum</i>	1054	Simek et al., 2018
<i>Callisis fragrans</i>	1263	
<i>Iris halophila</i>	2000	Han Y. et al., 2018
<i>Mirabilis jalapa</i>	2000	Yan L. et al., 2017
<i>Glycine max</i>	-	Ma ying et al., 2016

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 2, se tiene que las plantas hiperacumuladores empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo son las *Lamiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Poaceae*, *Asteraceae*, *Fabaceae* y *Brassicaceae*; siendo entre las familias identificadas, la familia *Brassicaceae* la predominante.

Así también se tiene que las plantas hiperacumuladoras reportadas suelen ser hierbas, plantas silvestres y cultivos, como lo demuestran en sus estudios El mamoun I. et al., 2020, Palitoglu M. et al., 2018, Wu M. et al., 2018, Sidhu G. et al., 2017, Wan X. y Lei M., 2017, Koptsik G. et al., 2015.

Además, de acuerdo con Mahar A. et al., (2016, p.1), el potencial de acumulación de los diferentes hiperacumuladores varía según el tipo de metales, donde, las plantas se consideran hiperacumuladoras de Cd y Pb cuando acumulan >100 mg Cd kg⁻¹ y 1000 mg Pb kg⁻¹ en los brotes lo que equivale al 0,01% para el Cd y al 0,1% para el Pb.

Además, debido a que, las plantas que crecen en suelos contaminados por metales pesados tienen una variedad de microorganismos que pueden aumentar el crecimiento de la planta y aumentar su resistencia al estrés por metales (Etesami H., 2018, p.1). Así mismo, Liu et al, (2019, p.1), señala en su estudio que *Lantana camara* L. (una planta con flores) mostró todas las características deseables de una planta hiperacumuladora, incluyendo el factor de translocación (TF) > 1 y una concentración de Cd > 100 mg kg⁻¹ en las partes aéreas, Por lo tanto, se propuso como un hiperacumulador de Cd.

Ocurriendo lo mismo en los casos de: El mamoun I. et al., 2020, Palitoglu M. et al., 2018, Wu M. et al., 2018, Sidhu G. et al., 2017, Wan X. y Lei M., 2017, Koptsik G. et al., 2015, Mahdieh et al., 2014, Sakakibara et al., 2013, Zhang et al., 2013, Zhi J. et al., 2020 en la tabla 2, ya que, la acumulación de Cd es superior a 100 mg/ Kg en todos los casos.

Como lo presentan en la tabla 2 con concentraciones de 440, 110, 900, 864, 1201, 5000, 1957, 239, 158 y 2 100.

Así también Koptsik G. et al., 2015, afirma que la planta *Brassica juncea* es un excelente hiperacumulador del Pb ya que presenta una concentración de acumulación en 10 300 mg/Kg.

Así mismo, Han Y. et al., 2018 y Yan L. et al., 2017 presentando el doble de la cantidad deseable; presentando 2000 mg/Kg para las especies *Iris halophila* y *Mirabilis jalapa*.

Por otro lado, se buscó analizar cuáles son los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la fitoextracción, para lo cual se elaboró la tabla 3, teniendo como criterios de análisis el tipo de microorganismo empleado como bacteria u hongo.

Tabla N°3. Microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados

Género de microorganismo	Recurso	Porcentaje de remoción	Fuente
<i>Pseudomonas</i>	Suelo	Pn: 95%	Abou Shanab R. et al., 2020
<i>Bacillus sp. CIK-512</i>	Suelo	Pb: 92%	Ahmad Iftikhar et al., 2018
<i>Bacteroidetes</i> (Ba), <i>Pseudomonas fluorescens</i> (Pf) y <i>Variovorax sp.</i> (Va)	Suelo contaminado de depósitos aluviales	Pb: 50 mM (50%) Cd: 50 mM (50%)	Dabrwka G. et al., 2017
<i>Bacillus sp. SC2b</i>	Suelo	Cd: 300 mg/L (35%) Pb: 1400 mg/L (75%)	Ma ying et al., 2016
<i>Bradyrhizobium sp.</i>	Suelo	Cd: 69%	Guo J. y Chi J., 2015
<i>Ralstonia eutropha</i>	Suelo	Cd: 76%	Moreira H. et al., 2015
<i>Pseudomonas</i>	Suelo	Cd: 31.0% Pb: 44.1%	Habibul N. et al., 2016
<i>Bacillus gibsonii</i> (PM11) y <i>Bacillus xiamenensis</i> (PM14)	Suelo	Cd: 61% Pb: 78%	Zainab N. et al., 2020
<i>Brassica chinensis</i> L.	Suelo	Cd: 58,8 % Pb: 62,2 % En suelo	Han Hui et al., 2020
		Cd: 79,7 % Pb: 83,5% En las hojas	

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 3, se tiene que los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la Fito

extracción son las bacterias donde el género de *Bacillus* y *Pseudomonas* son las más vistas por los investigadores.

Además, el ion metálico Cd a diferencia del Pb presenta menores porcentajes de remoción con la aplicación de microorganismos, ello debido a que la resistencia al Cd en las bacterias se basa principalmente en la efusión activa de iones metálicos para evitar los efectos tóxicos en la célula y la resistencia al Cd puede estar mediada por cromosomas, plásmidos o los transportes.

Ello debido a que es probable que los microorganismos endófitos (incluidas las bacterias y los hongos) interactúen estrechamente con sus huéspedes y estén más protegidos de los cambios adversos en el medio ambiente. Así también Deng Z. y Cao L., (2017, p.1); apoya lo mencionada señalando que la microbiota contribuye al crecimiento, la productividad, la captura de carbono y la fitorremediación de las plantas.

Lo que es respaldado por Meena et al., (2017, p.1), quien señala que las PGPRs pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Variovorax*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Klebsiella* y *Aeromonas* son capaces de aumentar el crecimiento de las plantas en condiciones ambientales adversas.

Además, los autores Guo J. y Chi J., (2015, p.1) y Ma ying et al., (2016, p.1), señalan que la inoculación con las cepas PGPRs incrementa las concentraciones de Cd en raíces y las concentraciones de Cd extraíble en la rizosfera, mientras que las concentraciones de Cd en raíces y brotes, siendo estas bacterias más tolerantes que otros microorganismos al Cd.

Así Ahmad Iftikhar et al., (2018, p.1), señala que la disminución de la actividad de los antioxidantes junto con la acumulación de Pb en la parte aérea del rábano indica la mejora de la fitotoxicidad del Pb a través de la aplicación sinérgica de compost y *Bacilo sp.* CIK-512. Así también Gopalakrishnan et al., (2016, p.1), señala que los microorganismos asociados a las plantas con capacidad genética y metabólica inherente pueden aliviar el estrés ambiental en las plantas.

Por su parte Han Hui et al., (2020, p1); realizó la comparación de la adsorción del Cd y Pb usando *Brassica chinensis L.*, donde los contenidos de Cd extraíble con DTPA fueron de (35,3 % a 58,8 %) y de Pb (37,8 % a 62,2 %) en los suelos de la rizosfera

pakchoi mientras que el Cd (76,5 %–79,7 %) y contenido de Pb (76,3%–83,5%) en las hojas (tejido comestible) de pakchoi fueron también mayores para el Pb.

Por último, buscando identificar los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb se elaboró la tabla 4, donde el criterio empleado fue el tipo de adsorción.

Tabla N°4. Mecanismos implicados en la remediación

Mecanismo	Descripción	Fuentes
Bioacumulación	Los contaminantes son absorbidos por microorganismos, transferidos y concentrados en el célula de biomasa a través del metabolismo activo	Diep Patrick et al., 2018
Biosorción	Unión y concentración de contaminantes a la superficie de la célula y metabolismo activo no está involucrado	Patel S: y Kasture A., 2015
Biolixiviación	Transformación de metales en forma soluble mediante el uso de la capacidad natural de microorganismos	Fathollahzadeh H. et al., 2019
Biomíneralización	Formación de precipitados mediante la combinación de metales tóxicos con aniones producidos por microorganismos	El mamoun I. et al., 2020
Biotransformación	La conversión de sustancia tóxica a una forma menos tóxica por la reacción química. En este proceso, las propiedades químicas de la sustancia tóxica cambiaron debido a la adición o eliminación de electrones	Smitha M. et al., 2017
Quimisorción asistido por microbios	Están involucradas una serie de reacciones, en primer lugar, la precipitación del metal no objetivo (metal primario).	Medfu Tarekegn et al., 2020

	depósito), luego el depósito primario actúa como nucleación para la deposición de metal objetivo	
--	--	--

Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 4, se tiene que los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb son la bioacumulación; biosorción; biolixiviación; biomineralización; biotransformación; y quimisorción de metales pesados asistida por microbios.

Entre los cuales, la biolixiviación es de gran importancia ya que mejora el proceso de fitoextracción cuando se combina con plantas hiperacumuladoras. Así mismo, Etesami, (2018, p.1), señala que los microorganismos resistentes pueden aumentar la movilidad, la captación y la translocación de Cd y Pb mediante la fitoextracción a través de la lixiviación heteroautotrófica, y secreción de biosurfactantes, ácidos orgánicos y sideróforos.

Ante lo mencionado, se tiene que la combinación de un sistema único planta-microbio juega un papel clave en el proceso de remediación; por lo cual para Medfu Tarekegn et al., (2020, p.1), menciona en su estudio que la quimisorción asistido por microbios es el mejor mecanismo implicado en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb. Así también lo respaldan; Oprea Alexandru et al., (2019, p.2), Adeleke O. et al., (2019, p.5).

Pero para Diep Patrick et al., (2018, p.1), la bioacumulación permite una mayor captación y secuestro de iones de metales pesados; ya que, se viene estudiando durante más de dos décadas para aplicaciones biorremediadoras. Pero, por lo contrario, Ilyas Sadia et al., (2017, p.1); señala que la bioacumulación implica el termino metabólicamente activo, lo que señala que se requiere que la célula huésped esté viva, lo que impone desafíos únicos, como: alimentación de nutrientes para mantener y propagar la biomasa, nivel de aireación para adaptarse a las necesidades aeróbicas/anaeróbicas y liberación accidental de GEM en el medio ambiente.

Siendo así que, investigadores como Patel S: y Kasture A., (2015, p.1) y Ayangbenro A. et al., (2017, p.3); aclaran que la biosorción y la bioacumulación no son lo mismo

y no deben usarse indistintamente, ya que, la biosorción es la adsorción de partículas a una matriz biológica mediante interacciones físicas (fuerzas electrostáticas), interacciones químicas (desplazamiento de iones o protones), complejación o quelación y a pH neutro, la superficie extracelular de los microorganismos contiene restos aniónicos que proporcionan sitios de unión para los HM catiónicos y es uno de los mecanismo más implicados en la remediación asistida por microbios en medios con metales pesados.

Así también, Fathollahzadeh H. et al., (2019, p.1), menciona que el uso de microorganismos solubilizadores de fosfato para la biolixiviación de REE (elementos de tierras raras) proporciona un enfoque biotécnico para la recuperación de REE de fuentes primarias y secundarias; sin embargo, gestionar y comprender las interacciones microbiano-minerales para desarrollar un método exitoso para la biolixiviación de REE sigue siendo un gran desafío.

V. CONCLUSIONES

Los puntos más sobresalientes del tratamiento de aguas y suelos contaminados por cadmio y plomo utilizando microorganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción están en lo indispensable de las plantas hiperacumuladoras debido a sus propiedades excepcionales con respecto a la captación, translocación y acumulación de mayores cantidades de Cd/Pb sin síntomas fitotóxicos. Así mismo, la notable mejora con la adición de microorganismos en la eficacia del método.

Así también se concluye que las plantas hiperacumuladoras empleadas para la fitoextracción de Cd y Pb del medio hídrico y suelo son las Lamiaceae, Caryophyllaceae, Poaceae, Asteraceae, Fabaceae y Brassicaceae; siendo entre las familias identificadas, la familia Brassicaceae la predominante. Así también se tiene que las plantas hiperacumuladoras reportadas suelen ser hierbas, plantas silvestres y cultivos.

También, los microorganismos empleados como tratamiento de aguas y suelos contaminados con Cd y Pb para mejorar la fitoextracción son las bacterias donde el género de Bacillus y Pseudomonas son las más vistas por los investigadores. Además, el ion metálico Cd a diferencia del Pb presenta menores porcentajes de remoción con la aplicación de microorganismos, ello debido a que la resistencia al Cd en las bacterias se basa principalmente en la efusión activa de iones metálicos para evitar los efectos tóxicos en la célula y la resistencia al Cd puede estar mediada por cromosomas, plásmidos o los transportes.

Por último, los mecanismos implicados en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb son la bioacumulación; biosorción; biolixiviación; biomineralización; biotransformación; y quimisorción de metales pesados asistida por microbios. Teniendo que, la combinación de un sistema único planta-microbio juega un papel clave en el proceso de remediación por lo cual la quimisorción asistida por microbios es el mejor mecanismo implicado en la remediación asistida por microbios del Cd y Pb.

VI. RECOMENDACIONES

Aunque el uso de microorganismos para mejorar la eficacia de las plantas genera buenos resultados, se trata de un proceso que lleva más tiempo para lograr una recuperación completa del emplazamiento, por lo cual se recomienda utilizar plantas modificadas genéticamente, ya que, esto podría ser una opción prometedora para acelerar el proceso de rehabilitación gracias a sus propiedades mejoradas.

Así mismo, mediante los estudios analizados se tiene que se necesita un enfoque integrado para la limpieza de los suelos que contienen Cd/Pb, y lo mismo se aplica a los suelos que se encuentran con contaminación de múltiples elementos; siendo así un sistema integrado de fitorremediación que incorpore bacterias y hongos junto con enmiendas del suelo para mejorar la tasa de fitoextracción de Cd y Pb.

Así mismo, se sugiere que mayores estudios se enfoquen en la aplicación de ensayos de campo para explorar el potencial en condiciones reales, junto con evaluaciones de viabilidad económica.

Por último, se recomienda a los futuros investigadores del área explorar especies novedosas que tengan un gran potencial, como biosorventes que presenten oportunidades atractivas como un medio de bajo costo para proteger el medio ambiente de la contaminación.

REFERENCIAS

1. ABOU-SHANAB, Reda Al, et al. Indigenous soil bacteria and the hyperaccumulator *Pteris vittata* mediate phytoremediation of soil contaminated with arsenic species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 195, p. 110458. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110458>
2. AHMAD, Iftikhar, et al. Aplicación combinada de compost y *Bacillus* sp. CIK-512 mejoró la toxicidad del plomo en el rábano al regular la homeostasis de los antioxidantes y el plomo. *Ecotoxicología y seguridad ambiental*, 2018, vol. 148, pág. 805-812. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.054>
3. ANGST, Gerrit, et al. Fast accrual of C and N in soil organic matter fractions following post-mining reclamation across the USA. *Journal of environmental management*, 2018, vol. 209, p. 216-226. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.050>
4. ARSHAD, Muhammad, et al. Lead phytoextraction by *Pelargonium hortorum*: comparative assessment of EDTA and DIPA for Pb mobility and toxicity. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 748, p. 141496. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141496>
5. AYANGBENRO, Ayansina Segun; BABALOLA, Olubukola Oluranti. A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents. *International journal of environmental research and public health*, 2017, vol. 14, no 1, p. 94. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
6. BALOYI, Wilma ten Ham. Systematic review as a research method in postgraduate nursing education. *health sa gesondheid*, 2016, vol. 21, no 1, p. 120-128. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hsag.2015.08.002>
7. BECH, Jaume, et al. Screening for new accumulator plants in potential hazards elements polluted soil surrounding Peruvian mine tailings. *Catena*, 2016, vol. 136, p. 66-73. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.009>

8. BERK, Michael, et al. The use of mixed methods in drug discovery: Integrating qualitative methods into clinical trials. En Clinical trial design challenges in mood disorders. Academic Press, 2016. p. 59-74. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405170-6.00006-3>
9. CABRAL, Mathilde, et al. Effects of environmental cadmium and lead exposure on adults neighboring a discharge: Evidences of adverse health effects. Environmental Pollution, 2015, vol. 206, p. 247-255. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.032>
10. CHEN, Yong, et al. Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments. Science of the Total Environment, 2018, vol. 637, p. 1400-1412. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.109>
11. DABROWSKA, G., et al. El efecto de las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas en la fitoextracción de Cd y Zn por Brassica napus L. International Journal of Phytoremediation , 2017, vol. 19, nº 7, pág. 597-604. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1244157>
12. DENG, Zujun; CAO, Lixiang. Fungal endophytes and their interactions with plants in phytoremediation: a review. Chemosphere, 2017, vol. 168, p. 1100-1106. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.097>
13. DIEP, Patrick; MAHADEVAN, Radhakrishnan; YAKUNIN, Alexander F. Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 2018, vol. 6, p. 157. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00157>
14. EGERIC, Marija, et al. Interactions of acidic soil near copper mining and smelting complex and waste-derived alkaline additives. Geoderma, 2019, vol. 352, p. 241-250. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.015>
15. EL MAMOUN, Ibtihaj, et al. Zinc, lead, and cadmium tolerance and accumulation in Cistus libanotis, Cistus albidus, and Cistus salviifolius:

- Perspectives on phytoremediation. *Remediation Journal*, 2020, vol. 30, no 2, p. 73-80. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/rem.21638>
16. ETESAMI, Hassan. Bacterial mediated alleviation of heavy metal stress and decreased accumulation of metals in plant tissues: mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, vol. 147, p. 175-191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.032>
17. FAJARDO, Carmen, et al. Pb, Cd, and Zn soil contamination: monitoring functional and structural impacts on the microbiome. *Applied Soil Ecology*, 2019, vol. 135, p. 56-64. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.022>
18. FATHOLLAHZADEH, Homayoun, et al. Role of microorganisms in bioleaching of rare earth elements from primary and secondary resources. *Applied microbiology and biotechnology*, 2019, vol. 103, no 3, p. 1043-1057. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9526-z>
19. GAUTAM, Aishvarya; KUSHWAHA, Anamika; RANI, Radha. Microbial remediation of hexavalent chromium: An eco-friendly strategy for the remediation of chromium-contaminated wastewater. En *The Future of Effluent Treatment Plants*. Elsevier, 2021. p. 361-384. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822956-9.00020-9>
20. GHOSH, Avijit, et al. Long-term in situ moisture conservation in horti-pasture system improves biological health of degraded land. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 248, p. 109339. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109339>
21. GOSWAMI, Shivani, et al. Biological treatment, recovery, and recycling of metals from waste printed circuit boards. En *Environmental Management of Waste Electrical and Electronic Equipment*. Elsevier, 2021. p. 163-184. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822474-8.00009-X>
22. GOVARTHANAN, M., et al. Myco-phytoremediation of arsenic-and lead-contaminated soils by *Helianthus annuus* and wood rot fungi, *Trichoderma* sp. isolated from decayed wood. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018,

vol. 151, p. 279-284. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.020>

23. GUL, Iram, et al. Enhanced phytoremediation of lead by soil applied organic and inorganic amendments: Pb phytoavailability, accumulation and metal recovery. *Chemosphere*, 2020, vol. 258, p. 127405. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127405>
24. GUO, Junkang; CHI, Jie. Effect of Cd-tolerant plant growth-promoting rhizobium on plant growth and Cd uptake by *Lolium multiflorum* Lam. and *Glycine max* (L.) Merr. in Cd-contaminated soil. *Plant and soil*, 2014, vol. 375, no 1, p. 205-214. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1952-1>
25. HABIBUL, Nuzahat; HU, Yi; SHENG, Guo-Ping. Microbial fuel cell driving electrokinetic remediation of toxic metal contaminated soils. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 318, p. 9-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.041>
26. HAMID, Yasir, et al. Comparative efficacy of organic and inorganic amendments for cadmium and lead immobilization in contaminated soil under rice-wheat cropping system. *Chemosphere*, 2019, vol. 214, p. 259-268. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.113>
27. HAN, Hui, et al. Heavy metal-immobilizing bacteria increase the biomass and reduce the Cd and Pb uptake by pakchoi (*Brassica chinensis* L.) in heavy metal-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 195, p. 110375. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110375>
28. HAN, Yulin, et al. Citric acid and EDTA on the growth, photosynthetic properties and heavy metal accumulation of *Iris halophila* Pall. cultivated in Pb mine tailings. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, vol. 128, p. 15-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.05.011>
29. HE, Lizhi, et al. Attapulgitic and processed oyster shell powder effectively reduce cadmium accumulation in grains of rice growing in a contaminated acidic paddy field. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 209, p. 111840. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111840>

30. HOU, D.; O'CONNOR, D. Chapter 1—Green and sustainable remediation: Concepts, principles, and pertaining research. In Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater; Hou. Tesis Doctoral. D., Ed. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00001-X>
31. ILYAS, Sadia, et al. Bio-reclamation of strategic and energy critical metals from secondary resources. *Metals*, 2017, vol. 7, no 6, p. 207. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/met7060207>
32. JAIS, N. M., et al. The dual roles of phycoremediation of wet market wastewater for nutrients and heavy metals removal and microalgae biomass production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, vol. 19, no 1, p. 37-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1235-7>
33. JASWAL, Rajdeep, et al. Phytoremediation of soil and water. En *Phytoremediation*. Academic Press, 2022. p. 239-262. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89874-4.00027-3>
34. JESITHA, K.; JASEELA, C.; HARIKUMAR, P. S. Nanotechnology enhanced phytoremediation and photocatalytic degradation techniques for remediation of soil pollutants. En *Nanomaterials for Soil Remediation*. Elsevier, 2021. p. 463-499. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822891-3.00027-X>
35. KOPTSIK, G. N. Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: a review. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 47, no 9, p. 923-939. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/S1064229314090075>
36. KUMAR REDDY, D. H.; LEE, S. M. Water Pollution Control Technologies. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 2017, vol. 2, p. e103. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10163-0>
37. KUMAR, R. Vinoth, et al. Dairy wastewater treatment using a novel low cost tubular ceramic membrane and membrane fouling mechanism using pore blocking models. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, vol. 13, p. 168-175. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.08.012>
38. KUMAR, Sazal, et al. Lead and other elements-based pollution in soil, crops and water near a lead-acid battery recycling factory in Bangladesh.

- Chemosphere, 2022, vol. 290, p. 133288. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133288>
39. LAHORI, Altaf Hussain, et al. Beneficial effects of tobacco biochar combined with mineral additives on (im) mobilization and (bio) availability of Pb, Cd, Cu and Zn from Pb/Zn smelter contaminated soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 145, p. 528-538. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.071>
40. LIANG, Jie, et al. Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated wetland soil remediated with combined biochar-compost. *Chemosphere*, 2017, vol. 181, p. 281-288. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.081>
41. LIU, Lianwen, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 633, p. 206-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
42. LUO, Xinghua, et al. Soil heavy metal pollution from Pb/Zn smelting regions in China and the remediation potential of biomineralization. *Journal of Environmental Sciences*, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.029>
43. MA, Ying, et al. Inoculation with metal-mobilizing plant-growth-promoting rhizobacterium *Bacillus* sp. SC2b and its role in rhizoremediation. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2016, vol. 78, no 13-14, p. 931-944. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15287394.2015.1051205>
44. MAHAR, Amanullah, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2016, vol. 126, p. 111-121. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>
45. MANZOOR, Maria, et al. Optimization of integrated phytoremediation system (IPS) for enhanced lead removal and restoration of soil microbial activities. *Chemosphere*, 2021, vol. 277, p. 130243. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130243>

46. MANZOOK, Maria, et al. Screening of indigenous ornamental species from different plant families for Pb accumulation potential exposed to metal gradient in spiked soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2018, vol. 27, no 5, p. 439-453. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2018.1488238>
47. MAZUREK, Ryszard, et al. Pollution indices as comprehensive tools for evaluation of the accumulation and provenance of potentially toxic elements in soils in Ojców National Park. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 201, p. 13-30. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.03.001>
48. MEDFU TAREKEGN, Molalign; ZEWDU SALILIH, Fikirte; ISHETU, Alemitu Iniyehu. Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture*, 2020, vol. 6, no 1, p. 1783174. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1783174>
49. MIDHAT, Laila, et al. Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 169, p. 150-160. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.009>
50. MORALES-SILVA, Tiago; DA SILVA, Bruna C.; FARIA, Lucas DB. Soil contamination with permissible levels of lead negatively affects the community of plant-associated insects: A case of study with kale. *Environmental Pollution*, 2022, p. 119143. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119143>
51. MOREIRA, Helena, et al. Phytomanagement of Cd-contaminated soils using maize (*Zea mays* L.) assisted by plant growth-promoting rhizobacteria. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol. 21, no 16, p. 9742-9753. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2848-1>
52. NARENDRULA-KOTHA, Ramya; NKONGOLO, Kabwe K. Bacterial and fungal community structure and diversity in a mining region under long-term metal exposure revealed by metagenomics sequencing. *Ecological Genetics and*

Genomics, 2017, vol. 2, p. 13-24. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.egg.2016.11.001>

53. OPREA, Alexandru, et al. Basics of semiconducting metal oxide–based gas sensors. *Gas Sensors Based on Conducting Metal Oxides*, 2019, p. 61-165. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811224-3.00003-2>
54. OVES, M., et al. Heavy metals: biological importance and detoxification strategies. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 2016, vol. 7, no 2, p. 1-15. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.1000334>
55. PALUTOGLU, Mahmut, et al. Phytoremediation of cadmium by native plants grown on mining soil. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2018, vol. 100, no 2, p. 293-297. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2220-5>
56. PARK, Beomguk; SON, Younggyu. Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils. *Ultrasonics sonochemistry*, 2017, vol. 35, p. 640-645. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.002>
57. PATEL, Shuchi; KASTURE, Avani. E (electronic) waste management using biological systems-overview. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, 2014, vol. 3, no 7, p. 495-504. ISSN 2349-7688
58. PRAMANIK, Krishnendu; MAITI, Tushar Kanti; MANDAL, Narayan Chandra. Potential role of heavy metal-resistant plant growth-promoting rhizobacteria in the bioremediation of contaminated fields and enhancement of plant growth essential for sustainable agriculture. En *Recent Advancement in Microbial Biotechnology*. Academic Press, 2021. p. 357-385. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822098-6.00014-8>
59. ADELEKE, O. Abdulrahman, et al. Principles and mechanism of adsorption for the effective treatment of palm oil mill effluent for water reuse. En *Nanotechnology in Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, 2019. p. 1-33. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813902-8.00001-0>

60. RAMAKRISHNAN, Srinivasan, et al. Nanomaterials in integrated methods for soil remediation (biological/physiological combination processes). En *Nanomaterials for Soil Remediation*. Elsevier, 2021. p. 445-462. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822891-3.00026-8>
61. REZANIA, Shahabaldin, et al. Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 318, p. 587-599. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.053>
62. RUI, Dahu, et al. Remediation of Cd-and Pb-contaminated clay soils through combined freeze-thaw and soil washing. *Journal of hazardous materials*, 2019, vol. 369, p. 87-95. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.038>
63. SHEN, Xing, et al. A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. *Chemosphere*, 2021, p. 132979. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979>
64. SHEN, Zhengtao, et al. The use of biochar for sustainable treatment of contaminated soils. En *Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater*. Butterworth-Heinemann, 2020. p. 119-167. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00006-9>
65. SIDHU, Gagan Preet Singh, et al. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb *Coronopus didymus* (L.) Sm.(Brassicaceae). *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 135, p. 209-215. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.10.001>
66. SMITHA, M. S.; SINGH, S.; SINGH, R. Microbial biotransformation: a process for chemical alterations. *J Bacteriol Mycol Open Access*, 2017, vol. 4, no 2, p. 85. Disponible en: <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2017.04.00085>
67. SUN, Yiming, et al. Soil contamination in China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 251, p. 109512. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109512>

68. TANG, Jiayi, et al. Physicochemical features, metal availability and enzyme activity in heavy metal-polluted soil remediated by biochar and compost. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 701, p. 134751. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134751>
69. Thomas W. Edgar David O. Manz. Chapter 3 - Starting Your Research. *Research Methods for Cyber Security*. 2017, Pages 63-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805349-2.00003-0>
70. TÓTH, Gergely, et al. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment international*, 2016, vol. 88, p. 299-309. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
71. UPCRAFT, Thomas; GUO, Miao. Phytoremediation value chains and modeling. *Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater*, 2020, p. 325-366. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00013-6>
72. WANG, Feng, et al. The effects of vermicompost and shell powder addition on Cd bioavailability, enzyme activity and bacterial community in Cd-contaminated soil: a field study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 215, p. 112163. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112163>
73. WAN, Xiaoming; LEI, Mei; YANG, Junxing. Two potential multi-metal hyperaccumulators found in four mining sites in Hunan Province, China. *Catena*, 2017, vol. 148, p. 67-73. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.005>
74. 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>
75. YADAV, Ajit Pratap Singh, et al. Leveraging the biosorption potential of *Leptolyngbya boryana* for Cr (VI) removal from aqueous solution. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 4, p. 100198. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100198>

76. YAN, Li, et al. Enhanced phytoextraction of lead from artificially contaminated soil by *Mirabilis jalapa* with chelating agents. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, vol. 99, no 2, p. 208-212. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2127-1>
77. YIN, Shiqian, et al. Current knowledge on molecular mechanisms of microorganism-mediated bioremediation for arsenic contamination: A review. *Microbiological Research*, 2022, p. 126990. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.126990>
78. ZAINAB, Nida, et al. Deciphering metal toxicity responses of flax (*Linum usitatissimum* L.) with exopolysaccharide and ACC-deaminase producing bacteria in industrially contaminated soils. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, vol. 152, p. 90-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.039>
79. ZHENG, Xiongkai, et al. Remediation of Cd-, Pb-, Cu-, and Zn-contaminated soil using cow bone meal and oyster shell meal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, vol. 229, p. 113073. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113073>
80. ZHI, Junkai, et al. Overexpression of the metallothionein gene PaMT3-1 from *Phytolacca americana* enhances plant tolerance to cadmium. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2020, vol. 143, no 1, p. 211-218. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01914-2>

ANEXOS

Anexo 1. Instrumento de recolección de datos

 Universidad César Vallejo	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO
---	---

DATOS DEL AUTOR: HANCCO ROJAS, ELENA PAOLA		
PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACION	LUGAR DE PUBLICACION
TIPO DE INVESTIGACION:		
CÓDIGO:		
PALABRAS CLAVES:		
PLANTAS HIPERACUMULADORES:		
MICROORGANISMOS:		
MECANISMOS:		
RESULTADOS:		
CONCLUSIONES:		