



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Revisión sistemática de la biorremediación del cadmio, plomo,
arsénico y mercurio en suelos contaminados por la minería
artesanal**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR:

Ito Chalco, Emerson Jofrey (ORCID: 0000-0001-9606-5404)

ASESOR:

Mg. Lozano Sulca, Yimi Tom (ORCID: 0000-0002-0803-1261)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico con todo mi corazón a mi madre que está en el cielo, ya que sus consejos me ayudaron a formarme como persona. Ante todo, madre mía cumplí con la promesa que te hice antes de tu partida en ser un gran profesional.

Agradecimiento

Gracias a Dios por darme una gran familia y unos padres maravillosos, durante el desarrollo de la tesis me apoyaron emocionalmente y económicamente, y así lograr terminar esta etapa que es de vital importancia en mi formación profesional y agradezco también a mi asesor que durante el desarrollo de la tesis me brindó las herramientas necesarias para poder levantar las observaciones y con ello terminar la tesis.

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
Índice de abreviaturas	viii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación	14
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	14
3.3. Escenario de estudio	16
3.4. Participantes	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.6. Procedimiento	16
3.7. Rigor científico	18
3.8. Método de análisis de información	18
3.9. Aspectos éticos	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
V. CONCLUSIONES	28
VI. RECOMENDACIONES	29
REFERENCIAS	
ANEXOS	

Índice de tablas

Tabla 1. Tecnologías de biorremediación	12
Tabla 2. Matriz de categorización apriorística	15
Tabla 3. Especies biológicas usadas para la biorremediación	20
Tabla 4. Métodos de biorremediación	24

Índice de figuras

Figura 1. Contaminación y riesgos causados por Hg al medio ambiente y la salud humana en diferentes formas de minería artesanal de Au en la Amazonía brasileña	9
Figura 2. Efectos tóxicos sobre los microorganismos causados por el plomo	11

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Procedimientos de selección de artículos para el estudio</i>	17
<i>Gráfico 2. Promedios de remoción por especie biológica</i>	26

Índice de abreviaturas

MAPE	: minería artesanal y de pequeña escala
CT	: suelos contaminados
RC	: suelos recuperados
TEM	: microscopio electrónico de transmisión
Cd	: cadmio
Hg	: mercurio
Pb	: plomo
As	: arsénico

Resumen

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar cuál es el método eficiente para la biorremediación del cadmio, plomo, arsénico y mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal. La metodología es de tipo básica, donde los estudios recolectados fueron de en su mayoría del portal web sciencedirect.

Mediante los resultados se obtuvo que las especies biológicas usadas pertenecen al género *bacillus*. Pero también, la interacción planta-microbio es también usado por los investigadores. Los métodos de biorremediación se clasifican por la remediación con el uso de plantas y por el uso microbiano; siendo el segundo el más usado; con el 75% de estudios que lo confirman usando la bioaumentación, biosorción y bioprecipitación y el uso de plantas mediante la fitorremediación con un 25% y la bioaumentación es el método de biorremediación más usado. Por último, los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación se encuentran en un promedio de 40 a 60%, empleando plantas y en un promedio de 50 a 90% usando microorganismos. Además, se tiene que, el Cd y Pb son los metales más estudiados; debido a que son 2 de los 4 metales pesados más comunes que contaminan el suelo y el agua.

Palabras clave: biorremediación, Cadmio, Plomo, Arsénico, Mercurio, minería artesanal.

Abstract

The objective of this research work was to determine which is the efficient method for the bioremediation of cadmium, lead, arsenic and mercury in soils contaminated by artisanal mining. The methodology is of a basic type, where the studies collected were mostly from the sciencedirect web portal.

The results showed that the biological species used belong to the bacillus genus. But also, the plant-microbe interaction is also used by the researchers. Bioremediation methods are classified by remediation with the use of plants and by microbial use; the second being the most used; with 75% of studies confirming it using bioaugmentation, biosorption and bioprecipitation and the use of plants by phytoremediation with 25% and bioaugmentation is the most used bioremediation method. Finally, the average removal rates by biological species used for bioremediation are on average 40 to 60%, using plants, and on average 50 to 90% using microorganisms. In addition, Cd and Pb are the most studied metals, since they are 2 of the 4 most common heavy metals that contaminate soil and water.

Key words: bioremediation, Cadmium, Lead, Arsenic, Mercury, artisanal mining.

I. INTRODUCCIÓN

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) se ha convertido en una fuente de subsistencia en muchos países, esta actividad ha crecido considerablemente lo que ha desatado una nueva fiebre del oro (Rocha Román L. et al., 2018, p.2). Donde la MAPE es un modo de vida vital para más de 40 millones de personas en todo el mundo, indirectamente es de 3 a 5 veces mayor la cantidad que depende de la MAPE (Rupprecht S., 2017, p.3).

Es así que, en el mundo la minería artesanal tiene una relación compleja de componentes sociales, económicos, tecnológicos, medioambientales y de la salud (ONU, 2017, p. 12). Donde más de 15 millones de personas trabaja en este sector exponiéndose a la contaminación por metales pesados (UNEP, 2019, p.1).

En Perú la minería artesanal y de pequeña escala explota oro en depósitos aluviales en los ríos de la selva y en depósitos primarios en la Cordillera de los Andes, en las regiones de Madre de Dios, Puno, Ica, Ayacucho, Arequipa y La Libertad (Kahhat R. et al., 2019, p.1). Lo que lleva cada año a la liberación de 180 toneladas métricas de Hg por año al medio ambiente (Ramírez M. et al., 2021, p.1).

La evaluación del Hg, así como otros metales pesados generados por estas prácticas como el cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb) y arsénico (As) es importante ya que además de ser tóxicos, son acumulables (Soto, et al., 2020, p. 50). Así mismo, son persistentes, ya que, no pueden ser creados o degradados, ni por medio de procesos biológicos ni antropogénicamente (Reyes, et al., 2016, p.1).

Así, la acumulación de metales pesados en los suelos está generando mayores riesgos debido a la filtración a las aguas subterráneas y superficiales, la absorción por las plantas y la absorción directa o indirecta por la población humana (Khalil N. et al., 2016, p.2).

Y es que, los valores de concentración de cadmio normales en el suelo son menores de 1 mg kg⁻¹, que permanecen a un rango de 0,001 a 0,5 mg/kg, en el cual no tiene un alto poder toxicológico, pero un incremento de este metal en el suelo; con valores de concentraciones que llegan a 300 - 400 µg/L se considera suelo contaminado por estos metales (Mishra S. et al., 2016, p.4).

Como consecuencia, los altos niveles de contaminación por iones de metales pesados han afectado negativamente a las poblaciones microbianas y sus funciones relacionadas (Román Dañobeytia F. et al., 2021, p.3).

Además, la contaminación por iones metálicos también tiene un efecto nocivo en los sistemas biológicos y no sufre biodegradación, por lo que, los metales pesados tóxicos como Pb, Hg, Cd pueden diferenciarse de otros contaminantes, ya que no pueden biodegradarse, pero pueden acumularse en los organismos vivos, causando diversas enfermedades y trastornos incluso en concentraciones relativamente más bajas (Salas U. et al., 2021, p.1).

También se sabe que tienen un efecto sobre el crecimiento de las plantas, la cobertura del suelo y tienen un impacto negativo en la micro flora del suelo.

Por tales motivos, la realidad problemática de la tesis se enfocará en la contaminación de suelos por actividades mineras artesanales, ya que en la actualidad es una problemática ambiental a nivel mundial, siendo la mayor fuente de contaminación por metales pesados (As, Hg, Pb, Cd). Y una de las principales preocupaciones del uso excesivo del mercurio, teniendo la mayor concentración de 20% a 30% (Mantey, et al, 2020, p. 1).

A partir de la descripción de la realidad problemática se plantea el problema general para la tesis: ¿Cuál es el método eficiente para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?

Y como problemas específicos se tiene:

- **PE 1:** ¿Cuáles son las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?
- **PE 2:** ¿Cuáles son los métodos para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?
- **PE3:** ¿Cuáles son los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?

De igual manera se plantea como principal objetivo: Determinar cuál es el método eficiente para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.

Con ello los objetivos específicos de la revisión sistemática son:

- **OE 1:** Identificar cuáles son las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.
- **OE 2:** Analizar cuáles son los métodos de biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.
- **OE3:** Clasificar los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.

En la presente tesis se justificó ante la necesidad de conocer los métodos de biorremediación de metales pesados producto de la minería artesanal, esta necesidad de remediar llevo a la aplicación de nuevas tecnologías utilizando hongos, microorganismos, enzimas o plantas derivada de ellos basándose en la capacidad de degradación natural, para lo cual se realizó la revisión y recolección de diversas literaturas a nivel mundial, dando como justificación un estudio teórico. Con la finalidad de ayudar a reducir los residuos con potencial peligroso presentes en el ambiente, por tal motivo se tiene como incentivo la necesidad de realizar investigaciones con respecto a biorremediación que se ayude a lograr resolver algunas limitaciones para en estos estudios, con ello poder convertir la biorremediación en tecnología viable para los diversos sectores y niveles de desarrollo pudiendo formar parte de sistemas de tratamiento convencionales. (Garzón, et al, 2017, p. 313).

Para lo cual el presente estudio va enfocado a los futuros investigadores que puedan desarrollar estudios prácticos para ayudaran a minimizar los impactos hacia la sociedad.

II. MARCO TEÓRICO

Ante la revisión sistemática de determinar cuál es el método eficiente para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal, se estudiaron divisas literaturas experimentales a nivel nacional e internacional, donde los artículos más relevantes son mostrados mediante la clasificación de antecedentes internacionales, mostrando sus estudios a continuación:

Oziegbe O. et al., (2021), en su trabajo de investigación los aislamientos bacterianos de los vertederos se analizaron en función de su capacidad para utilizar metales pesados (Cd y Pb). Mediante la metodología de estudio el agar nutritivo se complementó con cinco concentraciones diferentes de cada metal (25 a 600 mgL⁻¹). Se tomaron recuentos viables de los aislados cuatro veces con un intervalo de dos días *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella edwardsii* y *Enterobacter cloacae* fueron seleccionadas en base a su tolerancia a metales pesados para el proceso de remediación. Donde los resultados mostraron que *Pseudomonas aeruginosa* exhibió el mayor potencial de biorremediación entre los aislados bacterianos con 58.80 y 33.67 porcentaje de remediación en 50 mg Cd L⁻¹ y 300 mg Pb L⁻¹. Sin embargo, el mayor porcentaje de remediación (79.87 y 92.41) fue observado por *Klebsiella edwardsii* mediante la adición de una fuente de carbono (5 g/L) y la variación del pH (6) del medio en el medio contaminado con metales pesados. Pudiendo concluir que la eficacia de las bacterias autóctonas en el proceso de remediación se puede mejorar mediante la adición de una fuente de carbono y el aumento del pH para una recuperación eficaz del suelo contaminado.

Audu Kalen E. et al., (2020); en su estudio presenta como objetivo principal determinar el potencial de las bacterias residentes en la eliminación de metales pesados de los suelos contaminados en Abare, ubicado en el gobierno local de Anka del estado de Zamfara, Nigeria. Para lo cual, este estudio empleó la técnica de biorremediación para la eliminación de metales pesados. Donde los resultados muestran que la preparación de los Medios de Cultivo y el Aislamiento de bacterias de los diferentes suelos contaminados se lograron por el método de difusión en placa. Considerando que, las concentraciones de los metales pesados (plomo (Pb), cobre (Cu) y hierro (Fe)) se determinaron mediante espectrofotómetro de absorción

atómica (AAS). *Pantoea agglomerans* se utilizó para el experimento de biosorción. Las concentraciones de Pb oscilaron entre $1,328 \pm 0,493$ a $2,326 \pm 2,093$ mg/L, Cu $0,234 \pm 0,117$ a $1,054 \pm 1,486$ mg/L y Fe $18,498 \pm 11,462$ a $27,754 \pm 57,510$ mg/L. Se encontró que la temperatura óptima para la condición de biosorción era de 35 ° C. Más aún, la temperatura óptima Se observó un pH de (7) para la máxima biosorción de iones Pb y Cu por parte de *Pantoea agglomerans* lo que puede atribuirse al fenómeno homeostático y la disponibilidad de sitios de unión de metales en los biosorbentes. El porcentaje de biosorción por captación de metales reveló que *Pantoea agglomerans* absorbió 99,6% de Pb, 60% de Cu y 96% de Fe.

Paniagua López M. et al., (2021), en su trabajo de investigación presentó como objetivo de estudio evaluar dos técnicas de remediación de suelos: la adición de lodos de mármol (tratamiento de encalado, LS) y la mezcla de suelos recuperados (RC) con suelos contaminados (CT) (tratamiento de biopila, BS). Tanto LS como BS reducen significativamente la solubilidad de Cu, Zn, As y Pb principalmente debido al aumento del pH y el contenido de materia orgánica, respectivamente. La metodología experimental consistió en utilizar la tasa de respiración basal del suelo y el bioensayo de germinación de semillas y elongación de raíces con *Lactuca sativase* para evaluar la toxicidad de la contaminación potencial en los suelos muestreados. Donde los resultados mostraron que las enmiendas del suelo aplicadas redujeron significativamente la toxicidad y la solubilidad de los metales pesados y la estructura de la comunidad bacteriana a nivel de phylum se recupera después de 20 años.

Babu A. et al., (2016); en su artículo presenta estudiar el uso potencial de *Pseudomonas koreensis* AGB-1 en asociación con *Miscanthus sinensis* para remediar el suelo del sitio minero contaminado con metales pesados (loides). Para lo cual las el análisis del microscopio electrónico de transmisión (TEM) reveló que AGB-1 secuestró HM extracelularmente y su acumulación fue visible como complejos de metal oscuro en las superficies bacterianas y fuera de las células. La secuenciación del ADN de los genes marcadores de resistencia a HM indicó una alta homología con las regiones apropiadas de los determinantes arsB, ACR3(1), aoxB y bmtA. Además, la inoculación del suelo del sitio minero con AGB-1 aumentó biomasa en un 54%, clorofila en un 27% y contenido de proteína en un

28%. Pudiendo concluir mediante los resultados que AGB-1 puede usarse en asociación con *M. sinensis* para promover la fitoestabilización y remediación de suelos contaminados con HM por actividad minera.

Jiang Juan et al., (2016), en su estudio investigó el efecto de remediación combinado de hongos (*Pleurotus cornucopiae*) y bacterias (FQ1, *Bacillus thuringiensis*) en suelos co-contaminados con Cd. Encontrándose que la inoculación de FQ1 mejoró el crecimiento de hongos (biomasa) y la acumulación de Cd con un incremento de 26.68–43.58% y 14.29–97.67% respectivamente. Se eliminó hasta el 100 % y el 95,07 % del fenantreno en el tratamiento bacteria-hongo (B+M) respectivamente enriquecido con 200 mg/kg y 500 mg/kg de fenantreno. Además, la inoculación bacteriana alivió el estrés oxidativo causado por la co-contaminación con disminuciones relativas en la peroxidación lipídica y la actividad enzimática, incluido el malondialdehído (MDA), la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la peroxidasa (POD). Pudiendo concluir que la estrategia de remediación integrada de bacterias y hongos es un método efectivo y prometedor para la biorremediación de suelos co-contaminados con Cd-fenantreno.

Zhang M. et al., (2022), en su estudio tiene como objetivo evaluar el potencial de cuatro especies de lombrices de tierra que se encuentran comúnmente en el sur de China para la biorremediación de suelos contaminados por Cu, Cd, Pb y Zn. Como metodología se investigaron las tasas de supervivencia y la acumulación de metales de *Eisenia fetida*, *Amyntas morrisi*, *A. robustus* y *A. corticis* y los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo en un experimento de incubación de 60 días con un suelo contaminado con metales. Al final del experimento, las tasas de supervivencia de *E. fetida*, *A. morrisi* y *A. robustus* fueron significativamente más altas que las de *A. corticis*. Los resultados mostraron que la actividad de las lombrices de tierra mejoró la calidad del suelo con un índice promedio de calidad del suelo de 0,66, 0,64, 0,56, 0,53 y 0,12 para los tratamientos de *A. corticis*, *A. morrisi*, *A. robustus*, *E. fetida* y control, respectivamente. El total más alto de Cd, Cu y Pb disponibles en los moldes se encontró en el tratamiento con *A. morrisi*, y esta especie acumuló la menor cantidad de metales. Concluyendo que *A.*

morrissi puede ser el mejor candidato para la biorremediación asistida por lombrices de suelos contaminados con metales en el sur de China.

Sobariu D. et al., (2017), en su investigación construyó un sistema que consta de poblaciones microbianas de *Azotobacter rizosférico* y *Lepidium sativum* plantas, que crecen en soluciones que contienen metales pesados en varias concentraciones. La metodología experimental se desarrolló a nivel de laboratorio y, en esta etapa, no evalúa las interacciones inherentes en condiciones reales que ocurren en campos contaminados con microflora autóctona y bajo diferentes condiciones pedoclimáticas y estrés ambiental. Presentando como resultado que las bacterias podrían estimular la eficiencia de germinación promedio de *Lepidium sativum* en casi un 7 %, la longitud promedio de la raíz en un 22 %, la longitud promedio del tallo en un 34 % y la biomasa seca en un 53 % y el crecimiento de *L. sativum* se ha visto más afectado en soluciones de Cd(II) debido a su mayor toxicidad en comparación con el Cr(VI).

Brito El et al., (2016), en su artículo investigó un pequeño tramo de la cuenca del río Lerma, fuertemente impactado por actividades industriales y descargas de aguas residuales urbanas. Donde la metodología experimental consistió en tomar una diversidad bacteriana en 6 muestras de sedimentos, tomadas aguas arriba y aguas abajo de las principales fuentes de contaminación industrial y urbana. Los resultados mostraron que al secuenciar el gen 16S rDNA, se identificaron como similares a *Mycobacterium goodii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas lundensis* o *Aeromonas veronii* y estas cepas mostraron alta capacidad para degradar naftaleno (entre 92 y 100% a 200 mg·L⁻¹), pireno (hasta 72% a 100 mg·L⁻¹) y/o fluoranteno (52% a 50 mg·L⁻¹) como su única fuente de carbono en experimentos in vitro.

Liu Peng et al., (2021), en su estudio utilizó el método de biorremediación por mezcla de *Sporosarcina pasteurii* (*S. pasteurii*) para remediar suelos contaminados con plomo (Pb), zinc (Zn) y cadmio (Cd). Donde se observó una reducción significativa de las concentraciones de lixiviación de metales pesados en *S. pasteurii* muestras biotratadas. Presentando como resultados que las bacterias que hidrolizan la ureasa tienen ventajas adicionales de acelerar la precipitación de metales al aumentar el pH. El Pb, Zn y Cd solubles intercambiables se redujeron

en un 33,3 % ~ 85,9 %, 21,4 % ~ 66,0 %, 13,6 % ~ 29,9 % respectivamente después de la biorremediación. Concluyendo la toxicidad de los metales del suelo contaminado se redujo después de la biorremediación con *S. pasteurii*. Cuando se sometió a condiciones ambientales severas, la biorremediación de *S. pasteurii* fue superior a la tecnología de precipitación química en términos de estabilidad a largo plazo.

Jeyasundar P. et al., (2021), en su artículo se presentó como objetivo principal determinar la biorremediación por usando consorcio bacteriano y *Brassica juncea*. Como resultado la solubilidad del consorcio mejoró significativamente la biodisponibilidad de los metales y *Bacteroidetes B. juncea* (DTPA extraíble) y movilización (fracción soluble en ácido), en relación con los del suelo no modificado; por lo tanto, mejoró significativamente la absorción de metales por raíces y brotes. Los índices de fitoextracción indicaron que es un acumulador eficiente de Cd y Zn y en general la aplicación conjunta de ACT y BC puede ser una solución eficaz para mejorar el potencial de fitorremediación y, por lo tanto, reducir el riesgo potencial para la salud humana del suelo contaminado por fundición.

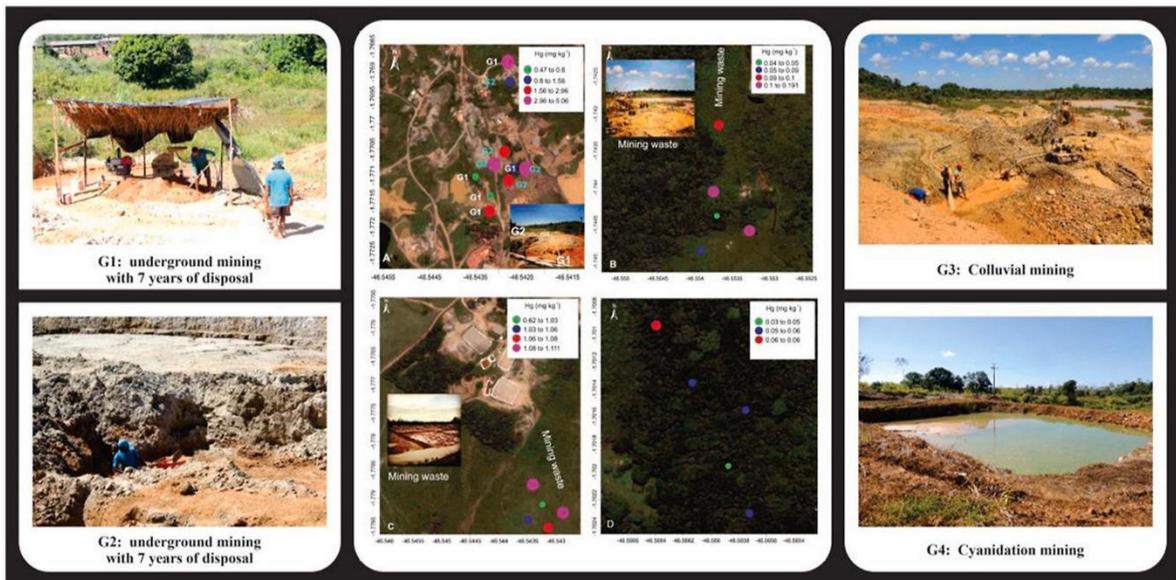
Ante los estudios expuestos sobre los diferentes métodos de biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal, se expone a continuación la problemática y propuestas de biorremediación.

En la literatura encontramos diferentes conceptos respecto a la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) a nivel regional, nacional e internacional (Zvaridavza T., 2018, p.1). Cabe destacar, que la MAPE es una actividad económica muy importante en más de 80 países en desarrollo de todo el mundo, que ofrece oportunidades de empleo a la población rural y tiene el potencial de crear medios de vida sostenibles y reducir la pobreza (O Faircheallaigh C. y Corbett T., 2016, p.2).

Sin embargo, las operaciones mineras han estado causando problemas ambientales y sociales en las áreas de influencia directa e indirecta, la mayoría de estas complicaciones son un resultado directo de la extracción de oro que operan

sin el mayor cuidado para el medio ambiente y la sociedad (Rupprecht S., 2017. p.2). Pero, aunque la industria de minería artesanal es importante para el desarrollo económico, ha sido identificada como una de las más controvertidas debido a los numerosos impactos que genera sobre los recursos naturales aire, suelo y agua (Ríos R. et al., 2018, p.2). (Ver figura 1).

Figura N°1. Contaminación y riesgos causados por Hg al medio ambiente y la salud humana en diferentes formas de minería artesanal de Au en la Amazonía brasileña



Fuente: Teixeira Renato A. et al., (2021)

En la figura 1 se observa que las concentraciones de Hg en los relaves mineros subterráneos fueron muy altas y excedieron los valores de prevención establecidos por la legislación ambiental brasileña, lo que indica un riesgo elevado para el ecosistema y la salud humana (fuente antropogénica) para las altas concentraciones de Hg.

Ante ello, los metales pesados se definen convencionalmente como elementos con propiedades metálicas y un número atómico mayor que veinte y los más comunes son Cd, Cr, Fe, Cu, Hg, Pb y Zn (Edogbo B. et al., 2020, p.3). Algunos de estos metales son micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como Zn, Cu, Mn, Ni y Co, mientras que otros tienen una función biológica no identificada, como Cd, Pb y Hg (Ihedioha J. et al., 2017, p.1).

Cuando están presentes en niveles elevados de biodisponibilidad, tanto los metales esenciales (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo) como los no esenciales (p. ej., Cd, Pb, Hg, Cr) son tóxicos (Wu Q. et al., 2016, p.2). Los metales están presentes en fase sólida y en solución, como iones libres o adsorbidos en partículas coloidales del suelo (Galazka A. et al., 2016, p.3).

Además, los metales como Hg, Pb, Cd y Cr se consideran tóxicos, mientras que Cu, Ni, Fe, Co y Zn no son tóxicos en concentraciones más bajas, pero debido al uso generalizado, su nivel aumenta en el medio ambiente, lo que puede generar una grave preocupación sobre el medio ambiente y la población mundial (Heredia, 2017, p. 4). No obstante, la concentración de plomo en el suelo, fue presentado en un informe por la OMS estimando un valor permitido de concentración de 25 mg/kg (Oriundo y Robles, 2009, p. 1).

Debido a ello, bajo ciertas condiciones ambientales, los metales pueden acumularse hasta niveles tóxicos y causar daños ecológicos; por ejemplo; los metales pesados afectan el número, la diversidad y las actividades de los microorganismos del suelo (Xia Shaopan et al., 2019, p.1). La toxicidad de estos metales sobre los microorganismos depende de una serie de factores, como la temperatura del suelo, el pH, los minerales arcillosos, la materia orgánica, los aniones y cationes inorgánicos y las formas químicas del metal (Liu Shao H. et al., 2017, p.2).

Siendo así que, los metales pesados pueden dañar las membranas celulares, alterar la especificidad de las enzimas, alterar las funciones celulares y dañar la estructura del ADN (Morris Sinead et al., 2018, p.3).

Así mismo, los metales pesados como el Pb y el Cd afectan el sistema endocrino, provocando alteraciones en las funciones fisiológicas (Hassan A. et al., 2020, p.1). Los metales pesados, con tiempos de residencia en el suelo de miles de años, representan además numerosos peligros para la salud de los organismos superiores (Oladipo O. et al., 2018, p.3).

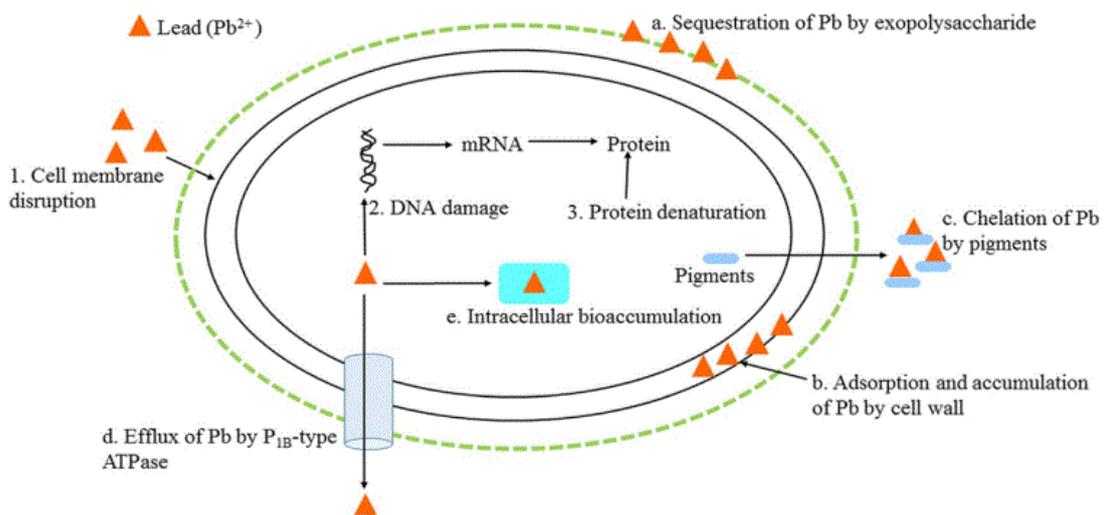
El transporte de estos contaminantes es por erosión hídrica y eólica, puesto que están formados por partículas muy finas que son fácilmente transportables a suelos

agrícolas; donde, la sobrexposición del cadmio, mercurio, plomo y arsénico son relativamente más tóxicos para los animales y seres humanos (FAO, 2019, p. 10). Así mismo, la capacidad acumulativa de estos metales de ion metálico no esencial resultado de la exposición ambiental en actividades mineras artesanales se puede cargar a concentraciones excesivas en tejidos y órganos blandos (Giovannella P. et al., 2017, p.2).

Adicionalmente, los estudios han demostrado que el plomo tiene efectos perjudiciales en la actividad microbiana del suelo, especialmente en la respiración microbiana (Ndeddy Aka et al., 2017, p.1). Así también se informó de que incluso la exposición a corto plazo al metal provoca una disminución significativa de la actividad microbiana (Chen Qingguo et al., 2021, p.4).

Debido a que la actividad enzimática del suelo es de naturaleza química y depende en gran medida de la diversidad microbiana (Pourfadakari S. et al., 2019, p.4). Además, de un grupo de enzimas, la fosfatasa es una de las enzimas importantes que ayudan a catalizar la hidrólisis del fosfato de los enlaces orgánicos monoéster, siendo que el fosfato liberado es muy importante tanto para las plantas como para los microorganismos (Varjani S. et al., 2020, p.3). Ver Fig. 2.

Figura N°2. Efectos tóxicos sobre los microorganismos causados por el plomo



Fuente: Kushwaha A. et al., (2018)

De acuerdo con la figura 2 la toxicidad del plomo y mecanismos de desintoxicación en bacterias; la toxicidad del plomo incluye (1) la alteración de la membrana celular, (2) el daño del ADN y (3) la desnaturalización de las proteínas. Los mecanismos de desintoxicación incluyen (a) el secuestro del Pb por el exopolisacárido, (b) la adsorción y acumulación de Pb por la pared celular, (c) la quelación por los pigmentos, (d) el eflujo por la ATPasa de tipo P1B, y (e) la bioacumulación intracelular.

Ante la problemática expuesta los organismos que son capaces de sobrevivir y permanecer activos en ambientes extremos pueden ser identificados y potencialmente seleccionados para propósitos de biorremediación (Abioye O. et al., 2018, p.2). Siendo la una tecnología inventiva y optimista que es aplicable para la recuperación y reducción de metales pesados en el agua y las tierras contaminadas (Verma S. et al., 2019, p.1). Así también, como se observa en la tabla 1, las tecnologías de biorremediación se pueden clasificar en dos categorías generales: ex situ e in situ.

Tabla N°1. Tecnologías de biorremediación

Bioaumentación	Adición de cultivos bacterianos a un medio contaminado; de uso frecuente en biorreactores y sistemas ex situ
Biofiltros	Uso de columnas de extracción microbiana para tratar (principalmente) emisiones al aire u olores (compuestos volátiles)
Bioaspersión	La inyección de aire a presión puede potenciar la degradación biológica; generalmente realizado in situ; no invasivo
Bioestimulación	Estimulación de poblaciones microbianas autóctonas en suelos o aguas subterráneas; que se puede realizar in situ o ex situ
 biorreactores	Biodegradación en un contenedor o reactor; puede usarse para tratar varios desechos líquidos o lodos; cinética de degradación rápida pero costo de capital y operativo relativamente alto.
Bioventilación	Método de tratamiento de suelos contaminados extrayendo oxígeno a través del suelo para estimular el crecimiento y la actividad microbiana.
Compostaje	Proceso de tratamiento aerobio, termofílico; se puede realizar utilizando pilas estáticas, pilas aireadas o reactores de alimentación continua; bajo costo pero tiempo de tratamiento extendido
El cultivo de la tierra	Sistema de tratamiento en fase sólida para suelos contaminados; puede realizarse in situ o en una celda de tratamiento de suelo construida; rentable

Fuente: Zouboulis A. et al., (2019)

Ante ello, los microorganismos juegan un papel esencial en la biorremediación de metales pesados (John R. et al., 2021, p.4).

Pero también, el proceso de biorremediación podría mejorarse utilizando diferentes enfoques, dependiendo del estado del medio ambiente contaminado (Randelović D. et al., 2016, p.2) Uno de estos enfoques es la bioestimulación, que consiste en promover el crecimiento de microorganismos en el sitio contaminado, con el fin de introducir sustancias correctoras de pH, nutrientes, tensioactivos y oxígeno (Raimondo E. et al., 2020, p.1).

De tal manera, la adición de nutrientes y la modificación de los parámetros ambientales permiten el crecimiento microbiano y aceleran los procesos de biorremediación (Nwinyi O. y Akinmulewo B., 2019, p.3).

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

Esta investigación es de tipo básica, de acuerdo con (Nicomedes, 2018, p. 1) este tipo de investigación también recibe el nombre de pura o fundamental ya que en ella se halla el cimiento para la investigación aplicada, esta busca la expansión de conocimientos respecto a un tema, así como conocer la verdad sobre un fenómeno natural con el propósito de ofrecer valiosos aportes a la sociedad, para ello buscará información sobre algún tema en específico para poder hallar una solución a un problema. Por ello, en este trabajo de investigación se buscará los métodos más eficientes de biorremediación para los metales pesados: Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por minería artesanal a modo de dar solución a un problema como es la contaminación de suelos por este tipo de minería.

La presente investigación tiene un diseño de revisión sistemática que analiza y discierne, los estudios relevantes de un fenómeno específico respondiendo así la pregunta de investigación científica, su hallazgo es confiable ya que en la conclusión generan conocimientos nuevos para la toma de decisiones (Antonio Q. et al., 2021, p. 95). En este caso se descubrirá qué métodos de biorremediación son más eficientes para descontaminar suelos con metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) a través de la recolección de información obtenida de los artículos científicos indexados a modo de abordar los objetivos planteados.

3.2. Categorías, sub – categorías y matriz de categorización apriorística

Título: Revisión sistemática de la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal

Objetivo general: Determinar cuál es el método eficiente para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.

Tabla 2. Matriz de categorización apriorística

Objetivo específico	Problema específico	Categoría	Sub categorías	Criterio
Identificar cuáles son las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.	¿Cuáles son las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?	Especies biológicas usadas	<i>Brassica</i> <i>Thiaspi</i> <i>Eichhornia</i> <i>Pleurotus</i> <i>Bacillus</i> <i>Pseudomonas</i>	De acuerdo al metal pesado presente
Analizar cuáles son los métodos de biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.	¿Cuáles son los métodos para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?	Métodos de biorremediación	Fitoextracción Micorremediación Fitovolatilización Remediación Bacteriana Fitoestimulación	De acuerdo a la concentración absorbida en el proceso y tiempo de proceso
Clasificar los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal	¿Cuáles son los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal?	Promedios de remoción por especie biológica usadas	Remoción alta Remoción media Remoción baja	De acuerdo a la especie biológica usada

Elaboración propia

3.3. Escenario de estudio

Siles, (2020, p. 1), indica que la selección del lugar de investigación o también conocido como el escenario de estudio, se conoce como la decisión sobre el lugar donde se obtendrá la información a usar, cabe resaltar que definir un adecuado escenario de estudio dará como resultado el éxito de la investigación, por lo que es necesario tener en cuenta que un buen escenario se caracteriza por ser accesible, en este caso se considera como escenario los lugares en donde se realizaron los artículos científicos con un carácter altamente relevante, sobre biorremediación de suelos contaminados por la minería artesanal con los siguientes metales pesados: Cadmio, plomo, arsénico y mercurio

3.4. Participantes

UJAEN, (2020, p.1), señala que en la investigación cualitativa no se toca temas acerca de representación estadística ni de muestreo, lo que se desea cuando se analiza el escenario de estudio es conocer lo que tienen que decir sus actores sociales (p. 1). De acuerdo a ello, en el presente trabajo se consideran a los participantes como las fuentes de información pertenecientes a artículos de investigación publicados en revistas indexadas como: Scopus, ScienceDirect, Dialnet y Scielo; debido a que estos centros de información, contienen gran diversidad de artículos que poseen estándares de calidad de revisiones.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

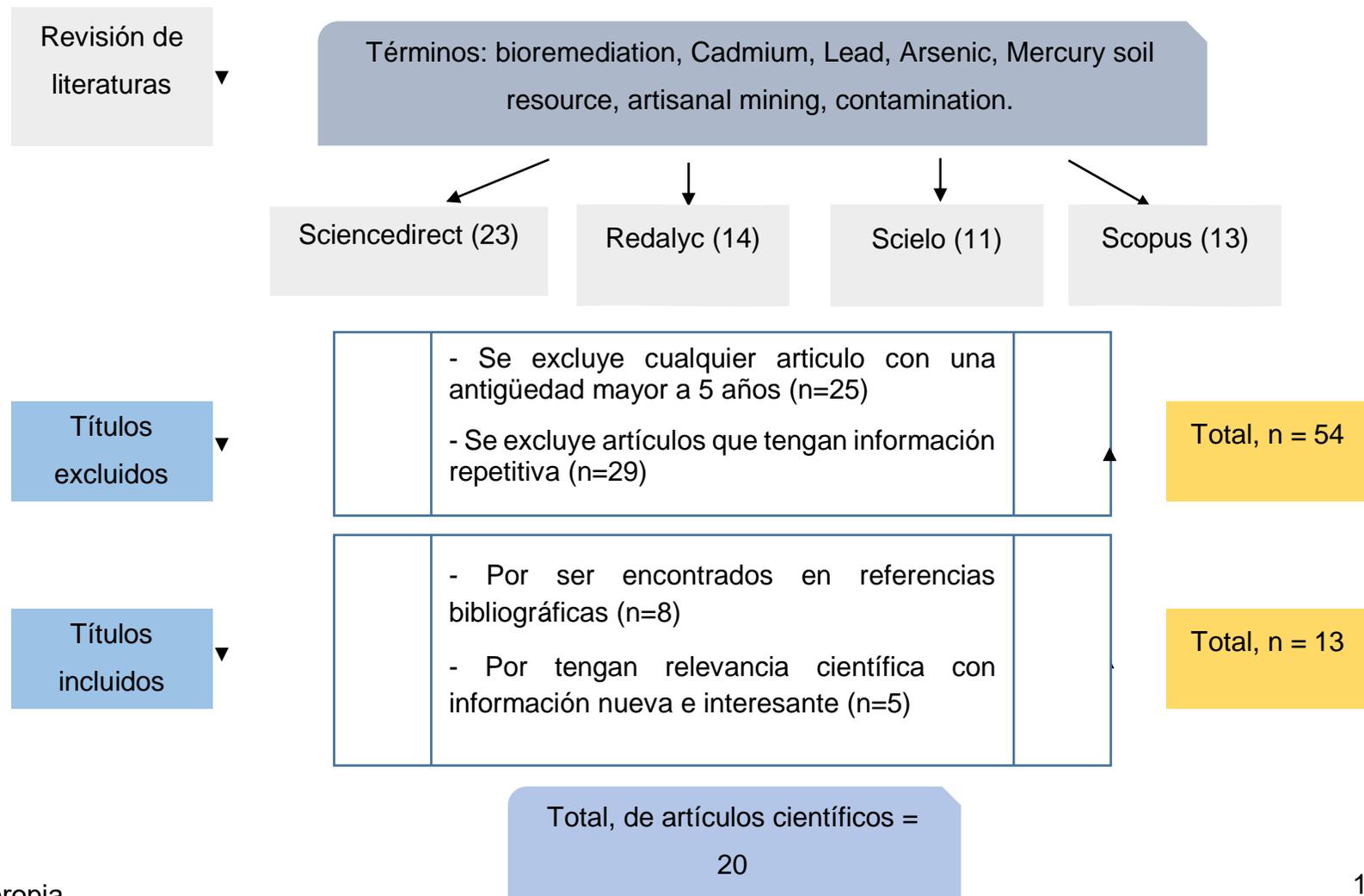
La técnica de recolección de datos a utilizar es el análisis documental, Siendo descrito por Tamayo (2019, p.5), que a través de esta técnica se obtiene datos de fuentes primarias y secundarias como libros, boletines, revistas, folletos, entre otros, para analizarlas y generar un nuevo documento del cual se pueda facilitar su posterior recuperación. Así también se detalla que el instrumento de recolección de datos a utilizar para esta técnica es la ficha de registro de datos.

3.6. Procedimiento de la investigación

De acuerdo con Huanuco & Temoche (2020, p.20), para poder elaborar un procedimiento de la investigación es necesario considerar múltiples criterios para así poder estructurar la información y poder organizarla para un mejor

procesamiento de datos, siendo estos criterios los siguientes: Sobre la fuente de información, sobre la búsqueda de información, sobre la elección de artículos relevantes, sobre la exclusión (p.20)

Gráfico N°1. Procedimientos de selección de artículos para el estudio



3.7. Rigor científico

De acuerdo con Suárez, (2017, p. 647), se describen los criterios empleados en el presente estudio:

Credibilidad, Este criterio implica la valoración de aquellas situaciones en las cuales un trabajo investigativo pueda ser reconocido como “creíble”, es por ello que resulta esencial realizar una pesquisa de argumentos fiables y a la vez estos ser demostrados en los resultados del estudio realizado; en concordancia con el proceso seguido en la investigación, para ello la credibilidad se apoya en los siguientes aspectos: Valoración de juicio de expertos sobre los instrumentos de investigación utilizados, respeto por los hechos y situaciones generados en el contexto temporal y espacial de la investigación, y además la experiencia del investigador. En el presente trabajo se aplicó este criterio recaudando la información sin interponer juicios críticos sino plasmándolos en su originalidad.

Auditabilidad, o también conocido como confirmabilidad; este criterio permite que los futuros investigadores puedan continuar con el trabajo siguiendo las informaciones dejadas que serán tomadas en forma de pistas para el lector. Este criterio fue aplicado en la información necesaria dejada en la metodología del estudio, para que así, los futuros investigadores puedan desarrollar la continuación del estudio aplicándolo a otros aspectos o contextos.

Transferibilidad, este criterio permite que el futuro lector pueda transferir un estudio a otro contexto, y ya que, un estudio se da en un tiempo y espacio específico, lo que este criterio genera es que se permita brindar la mayor información del escenario de estudio y hechos suscitados para que no queden dudas de la información brindada y se brinde la información detallada (Castillo E. y Vásquez M.L, 2003, p.166). En el presente estudio se cumplió con dicho criterio dejando mediante las referencias bibliográficas cada autor de quién se utilizó la información usada, así como el link o doi que permite llegar con mayor facilidad hacia el estudio original.

3.8. Método de análisis de datos

Para poder analizar los datos se escogió la categoría especies biológicas, métodos de biorremediación y promedios de remoción por especie biológica usadas.

Para poder analizar la categoría métodos de biorremediación se analizaron las siguientes sub categorías: Brassica, Thiaspi, Eichhornia, Pleurotus, Bacillus, Pseudomonas; Fitoextracción, Micorremediación, Fitovolatización, Remediación Bacteriana y Fitoestimulación; Remoción alta, Remoción media y Remoción baja.

3.9. Aspectos éticos

Para poder tener en cuenta los aspectos éticos en la investigación es necesario cumplir primeramente con citar correctamente a todos los autores utilizados en el presente trabajo, así como los autores de los artículos científicos que serán seleccionados, además de que se hará un correcto parafraseado y respeto por las ideas de los investigadores evitando por completo el plagio de ideas, siendo también necesaria el correcto referenciación en estilo ISO 690.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método eficiente para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal se determina de acuerdo a la especie biológica usada para la biorremediación, de acuerdo a los métodos usados y los promedios de remoción obtenidos; siendo estos presentados en las tablas 3, 4 y el gráfico 2.

En la tabla 3 se identifican las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal.

Tabla N°3. Especies biológicas usadas para la biorremediación

ESPECIES BIOLÓGICAS	MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN	CONTAMINANTE	% DE REMOCIÓN	AUTOR (ES)
<i>Pseudomonas</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	bioaumentación	Metales pesados	cepa bacteriana (B2) = 98%	Khalil L. et al., 2016
alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.)	fitorremediación	Zn y Pb	68% y 59%	Agnello A. et al., 2016
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	bioaumentación	56% y 100%	(47%) y (37%)	
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Klebsiella edwardsii</i> y <i>Enterobacter cloacae</i>	Biorremediación	Cd y Pb	79.87% y 92.41 %	Oziegbe O. et al., 2021
<i>Pantoea agglomerans</i>	biosorción	Cu, Fe y Pb	99,6% de Pb, 60% de Cu y 96% de Fe	Audu Kalen E. et al., 2020
<i>Lactuca sativase</i>	fitorremediación	Cu, Zn, As y Pb	No indica	Paniagua López M. et al., 2021
<i>Pseudomonas koreensis</i> AGB-1, <i>Miscanthus sinensis</i>	bioaumentación	Cd y Pb	64%	Babu A. et al., 2016

<i>Pleurotus cornucopiae</i> y FQ1, <i>Bacillus thuringiensis</i>	bioaumentación	Cd	14.29–97.67%	Jiang Juan et al., 2016
<i>Eisenia fetida</i>, <i>Amyntas morrisi</i>, <i>A. robustus</i> y <i>A. corticis</i>	bioaumentación	Cu, Cd, Pb y Zn	92%, 90%, 87% y 83%	Zhang M. et al., 2022
<i>Azotobacter rizosférico</i> y <i>Lepidium sativum</i> plantas	bioaumentación	Cd(II) y Cr(VI)	34% y 53%	Sobariu D. et al., 2017
<i>Brassica juncea</i>	fitorremediación	Cd y Zn	68% y 71%	Jeyasundar P. et al., 2021
<i>Streptomyces sp</i>	bioaumentación	Zn, Cd y Pb	57%, 50% y 49%	Zloch M. et al., 2017
<i>Pseudomonas brassicacearum</i>, <i>Rhizobium leguminosarum</i>	bioaumentación	Zn	90%	Adediran G. et al., 2016
<i>Miscanthus sinensis</i> con adición de <i>Chaetomium cupreum</i>	Fitorremediación + Bioaumentación	Al	87%	Haruma T. et al., 2019
<i>Bacillus subtilis</i>, <i>Citrobacter</i> y <i>Bacillus cereus</i>	Bioaumentación	U y Cd	89% y 81%	Qi Xin et al., 2018
<i>Paenibacillus</i>, <i>Burkholderia</i>, <i>Ensifer</i>, y dos <i>Cupriavidus</i>	Biosorción	Cd, Cr	Cd 2+ (17–33%) y Cr 6+ (60–70%).	Minari G. et al., 2020
Cepas C2-Z y P2-Z	Biosorción y bioprecipitación	Cd y Pb	Biosorción: (24,5%, 46,98%) Bioprecipitación: (25,9%, 47,07%)	Zhang L. et al., 2022

<i>Sporosarcina pasteurii</i> (<i>S. pasteurii</i>)	Bioaumentación	Pb, Zn y Cd	Pb: 33,3 % ~ 85,9 % Zn: 21,4 % ~ 66,0 % Cd: 13,6 % ~ 29,9 %	Liu P. et al., 2021
<i>Acinetobacter baumannii</i> <i>Bacl43</i>, <i>Bacillus sp. Bac134</i>, <i>Enterobacter sp. Bac114</i>, <i>Klebsiella pneumoniae Bac120</i>, <i>Pantoea sp. Bac123</i>, <i>Pseudomonas sp. Bac17</i>, <i>Pseudomonas sp. Bac138</i> y <i>Serratia marcescens Bac156</i>.	Fitorremediación + Bioaumentación	Hg	Las plantas inoculadas con <i>Serratia marcescens</i> <i>Bacl56</i> y <i>Pseudomonas sp. Bac138</i> aumentó la volatilización de mercurio a 47,16% y 62,42%, respectivamente.	Mello I. et al., 2020
<i>Simplicillium chinense</i> y <i>Phragmites communis</i>	Fitorremediación + Biosorción	Cd y Pb	Biosorción fue de 88,5 y 57,8 g/kg para Cd y Pb, respectivamente.	Jin Z. et al., 2019
<i>Bacillus cereus</i> y <i>Vetiveria zizanioides</i>	Fitorremediación	Cr(VI), Fe, Mn, Zn, Cd, Cu Y Ni	82 % para Cr + 6(100), 92% de Fe (100), 67% de Mn(50), 36% de Zn (50), 31% de Cd (30), 25% de Cu (30) y 43% de Ni (50)	Nayak A. et al., 2018

Elaboración propia

Las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal, de acuerdo

con la comparación de la tabla 3, se dan mediante especies microbianas, siendo el género *Bacillus* de bacterias la más empleada.

Siendo corroborado por Minari G. et al., 2020, Zhang L. et al., 2022, Liu P. et al., 2021, Zloch M. et al., 2017, Adediran G. et al., 2016, Haruma T. et al., 2019, Qi Xin et al., 2018, Babu A. et al., 2016, Jiang Juan et al., 2016, Zhang M. et al., 2022, Sobariu D. et al., 2017, Khalil L. et al., 2016, Agnello A. et al., 2016, Oziegbe O. et al., 2021, Audu Kalen E. et al., 2020.

Pero también, la interacción planta-microbio es también usado por los investigadores; debido a que, los microorganismos asociados a las plantas hacen que estos metales pesados estén biodisponibles para la metilación, la alteración del pH del suelo, las reacciones redox, la producción y la secreción de sideróforos, ácidos orgánicos y biosurfactantes para hacer más eficiente el proceso de fitorremediación.

Los resultados mostraron que el U y el Cd se eliminaron de manera efectiva de las soluciones acuosas mediante cuatro tipos de mezclas bacterianas; en particular, una mezcla de cantidades iguales de *Bacillus subtilis*, *Citrobacter* y *Bacillus cereus* dio como resultado la mejor tasa de eliminación. Concluyendo que la tecnología de microorganismos inmovilizados tiene aplicaciones potenciales en la remediación de contaminantes de metales pesados presentes en el suelo.

Así lo demuestra también Nayak et al., (2018), quien informa que una cepa aislada de *Bacillus cereus* es altamente eficaz en la reducción de metales pesados (Cr, Fe, Cd, etc.) y la cepa mejora significativamente la capacidad de fitorremediación de la *Vetiveria zizanoides* - una hierba hiperacumuladora de Cr.

Así Haruma T. et al., (2019), realiza una prueba de inoculación de *C. cupreum* sobre *m _ sinensis* en suelo ácido de mina mostrando que *C. cupreum* promovió el crecimiento de las plántulas y mejoró la tolerancia al Al mediante la inducción de la producción de ácido clorogénico y la producción de oosporeína. Estos resultados sugieren que *C. cupreum* podría mejorar químicamente la tolerancia al Al y podría promover el crecimiento al reducir el exceso de Al en las paredes celulares, el sitio principal de acumulación de Al. Además, la mejora química de la tolerancia al Al

por parte de *C. cupreum* podría ser importante para *M. sinensis* para adaptarse a sitios mineros ácidos.

Así también apoyando los resultados mostrados, Zhang L. et al., (2022), para su estudio realizó la remediación del suelo de relaves aislando dos cepas (C2-Z y P2-Z) del suelo, donde, los experimentos de ecosistemas a mediana escala revelaron que los consorcios bacterianos CP podían reducir el Pb soluble en ácido (5,72 %) y el Cd (16,72 %) en el suelo de relaves. Por lo tanto, la cepa aislada C2-Z y P2-Z podría servir como candidata potencial para la remediación de suelos contaminados con Cd y Pb debido a su significativa eficiencia de eliminación de Cd y Pb y capacidad de inmovilización.

Por otro lado, los métodos de biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal, se detallan en la tabla 4, respecto a la tabla 3.

Tabla N° 4. Métodos de biorremediación

Tecnología de remediación de suelos	Tipos		Funciones de reparación
Biorremediación	Fitorremediación	Reparación microbiana	I. Bajo costo, fácil de implementar y amigable con el medio ambiente
Autores	Agnello A. et al., 2016; Paniagua López M. et al., 2021; Jeyasundar P. et al., 2021, Haruma T. et al., 2019, Nayak A. et al., 2018	Khalil L. et al., 2016; Agnello A. et al., 2016; Oziegbe O. et al., 2021; Audu Kalen E. et al., 2020; Babu A. et al., 2016; Jiang Juan et al., 2016; Zhang M. et al., 2022; Sobariu D. et al., 2017, Adediran G. et al., 2016, Haruma T. et al., 2019, Qi Xin et al., 2018, Minari G. et al., 2020, Zhang L. et al., 2022, Liu P. et al., 2021	ii. Suelos superficiales con grandes áreas contaminadas y bajos niveles de contaminación

Promedio de método de biorremediación	25%	75%	
--	-----	-----	--

Fuente: Cheng C. et al., 2022

Los métodos de biorremediación en suelos contaminados por la minería artesanal se clasificaron por la remediación con el uso de plantas y por el uso microbiano; siendo el segundo el más usado; con el 75% de estudios que lo confirman usando la Bioaumentación, Biosorción y bioprecipitación y el uso de plantas mediante la fitorremediación con un 25%.

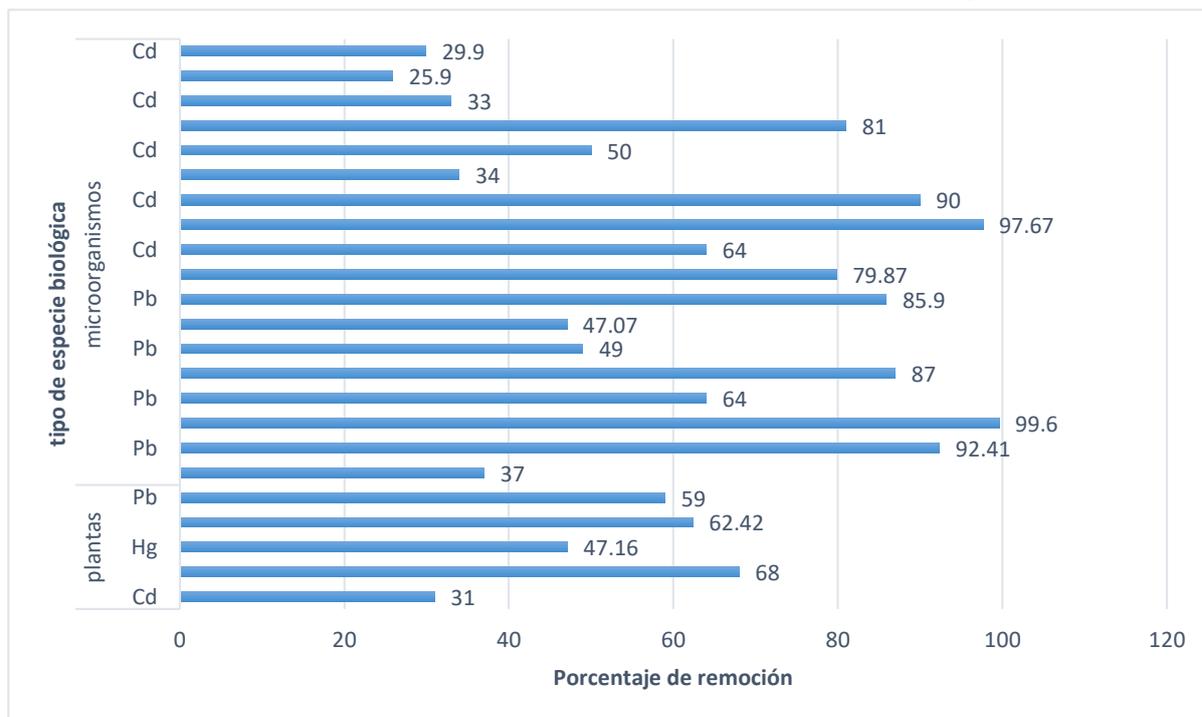
La bioaumentación es el método de biorremediación más usado, siendo este, la adición de cultivos microbianos precultivados para mejorar las poblaciones microbianas en un sitio para mejorar la limpieza de contaminantes y reducir el tiempo y el costo de limpieza (Speight J., 2017, p.389).

Pero también existen estudios que se inclinan por la combinación de la fitorremediación y la adición microbiana; siendo ello corroborado por Jin Z. et al., 2019, Mello I. et al., 2020, Zhang L. et al., 2022, Haruma T. et al., 2019 y Agnello A. et al., 2016.

Donde, así también, Jin Z. et al., (2019), señala que mediante la fitorremediación mediada por hongos la remoción de Cd y Pb de los suelos mineros incrementó de 28,6–48,0 % más y ello debido a que la interacción rizosfera-hongos explica el rendimiento mejorado de la fitorremediación.

Así también, el promedio de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal mediando la tabla 3 se expresó en el gráfico 2; teniendo como criterio la especie biológica usada.

Gráfico N°2. Promedios de remoción por especie biológica



Elaboración propia

De acuerdo con el gráfico 2 respecto a la tabla 3, se tiene que los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal, se encuentran en un promedio de 40 a 60%, empleando plantas y en un promedio de 50 a 90% usando microorganismos.

Además, se tiene que, el Cd y Pb son los metales más estudiados; debido a que son 2 de los 4 metales pesados más comunes que contaminan el suelo y el agua.

La capacidad de eliminación (mg L^{-1}) de la cepa T1B3 fue del 82 % para Cr + 6(100), 92% de Fe (100), 67% de Mn (50), 36% de Zn (50), 31% de Cd (30), 25% de Cu (30) y 43% de Ni (50) durante el ciclo de crecimiento activo en medio de extracto modificado con HM. Los resultados indican que la inoculación de *V. zizanioides* nativa con la cepa T1B3 mejora su eficiencia de fitorremediación de HM (Nayak A. et al., 2018).

Así también, se puede respaldar la afirmación hecha con los resultados presentados en el estudio de Qi Xin et al., 2018, donde se generó un porcentaje de

remoción del 81% para el Cd mediante la bioaumentación de *Bacillus subtilis*, *Citrobacter* y *Bacillus cereus*.

Así mismo, Zhang L. et al., 2022, comprobó que la cepa C2-Z y P2-Z mediante la biosorción incrementó la adsorción del Cd del suelo en un 24,5% y el Pb en un 46,98% y mediante la bioprecipitación se generó un porcentaje del 25,9% para el Cd y un 47,07% para el Pb.

Pero también, la capacidad de biosorción microbiana de metales pesados ayuda a un mejor resultado de la fitorremediación; siendo ello corroborado por: Haruma T. et al., 2019, Zhang L. et al., 2022, Mello I. et al., 2020 y Jin Z. et al., 2019.

Respaldando lo mencionado, se tiene el estudio de Jin et al. (2019), quien en un suelo con actividad minera realizó la fitorremediación con bioaumentación de bacterias, donde se encontraron que la capacidad de biosorción de Cd y Pb de una cepa fúngica *Simplicillium chinense* QD10 mejora significativamente la fitoextracción de Cd y Pb en presencia de *Phragmites communis*. Así también, en otro estudio, la capacidad de biosorción de cromo de *Bacillus sp.* MH778713 ayudó a la fitorremediación a través de *Prosopis laevigata* (Ramírez et al., 2019).

V. CONCLUSIONES

El método eficiente para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal es el método que emplea el uso de microbios mediante la bioaugmentación, biosorción y bioprecipitación y la especie biológica más usada es el *basillus*, siendo comprobado ello mediante la eficiencia de remoción alta que presenta su aplicación; así mismo, se detallan las conclusiones que llevaron a la conclusión del objetivo principal del estudio:

Las especies biológicas usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesana son las especies microbianas, siendo el género *bacillus* de bacterias la más empleada. Pero también, la interacción planta-microbio es también usado por los investigadores; debido a que, los microorganismos asociados a las plantas hacen que estos metales pesados estén biodisponibles para la metilación, la alteración del pH del suelo, las reacciones redox, la producción y la secreción de sideróforos, ácidos orgánicos y biosurfactantes para hacer más eficiente el proceso de fitorremediación.

Los métodos de biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal se clasifican por la remediación con el uso de plantas y por el uso microbiano; siendo el segundo el más usado; con el 75% de estudios que lo confirman usando la bioaugmentación, biosorción y bioprecipitación y el uso de plantas mediante la fitorremediación con un 25% y la bioaugmentación es el método de biorremediación más usado.

Los promedios de remoción por especie biológica usadas para la biorremediación del Cadmio, Plomo, Arsénico y Mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal se encuentran en un promedio de 40 a 60%, empleando plantas y en un promedio de 50 a 90% usando microorganismos. Además, se tiene que, el Cd y Pb son los metales más estudiados; debido a que son 2 de los 4 metales pesados más comunes que contaminan el suelo y el agua.

VI. RECOMENDACIONES

En base a la investigación realizada y los estudios analizados se concluyó que los mecanismos de la interacción de los diferentes contaminantes en la biorremediación y/o los procesos de fitorremediación necesitan más investigación. Así mismo, se detallan las siguientes recomendaciones:

La mayoría de estudios se han realizado en condiciones de laboratorio y el diseño de los parámetros experimentales debería intentar simular las condiciones naturales, incluyendo las condiciones climáticas, meteorológicas y de los contaminantes; por ello, se sugiere realizar más trabajos para verificar la eficacia de la biorremediación en condiciones de campo en lugar de en los experimentos en laboratorio.

Así también, las aplicaciones de campo deberían realizarse en diferentes lugares, y también es necesario examinar posibles nuevas especies hiperacumuladoras de forma natural o artificial con aplicaciones prácticas.

Así mismo, se sugiere trabajos experimentales centrados en la producción in situ y en el desarrollo de un bioproceso eficiente mediante estudios a gran escala para lograr la máxima producción y purificación de la biorremediación.

Así también, se deberían de estudiar los microorganismos para evaluar y ampliar el conocimiento acerca de las características estructurales y su eficiencia.

REFERENCIAS

1. ABIOYE, Olabisi Peter, et al. Biosorption of lead, chromium and cadmium in tannery effluent using indigenous microorganisms. 2018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.21472/bjbs.050903>.
2. ADEDIRAN, Gbotemi A., et al. Mechanisms behind bacteria induced plant growth promotion and Zn accumulation in Brassica juncea. Journal of hazardous materials, 2015, vol. 283, p. 490-499. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.064>
3. Adewumi, A., & Laniyan, T. (2020). Contaminación, fuentes y evaluaciones de riesgo de metales en medios del área de extracción de oro artesanal de Anka, noroeste de Nigeria. *ScienceDirect*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137235>
4. AGNELLO, Ana Carolina, et al. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 563, p. 693-703. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>
5. AUDU, Kalen Ephraim; ADENIJI, Shola Elijah; OBIDAH, John Solomon. Bioremediation of toxic metals in mining site of Zamfara metropolis using resident bacteria (*Pantoea agglomerans*): A optimization approach. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no 8, p. e04704. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04704>
6. BABU, A. Giridhar, et al. Potential use of *Pseudomonas koreensis* AGB-1 in association with *Miscanthus sinensis* to remediate heavy metal (loid)-contaminated mining site soil. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 151, p. 160-166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.045>
7. Birane, N., Naresh, D., John, P., & Robert, M. (2019). Cuantificación y caracterización de bacterias resistentes al mercurio en sedimentos contaminados por actividades de extracción de oro artesanal a pequeña

- escala, región de Kedougou, Senegal. *ScienceDirect - Revista de exploración geoquímica*, 205. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106353>
8. BRITO, Elcia MS, et al. Impact of hydrocarbons, PCBs and heavy metals on bacterial communities in Lerma River, Salamanca, Mexico: investigation of hydrocarbon degradation potential. *Science of The Total Environment*, 2015, vol. 521, p. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.098>
 9. CHENG, Conghui, et al. Progress of uranium-contaminated soil bioremediation technology. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, vol. 241, p. 106773. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106773>
 10. CHEN, Qingguo, et al. Removal of Pb and Hg from marine intertidal sediment by using rhamnolipid biosurfactant produced by a *Pseudomonas aeruginosa* strain. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 22, p. 101456. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101456>
 11. EDOGBO, Blessing, et al. Risk analysis of heavy metal contamination in soil, vegetables and fish around Challawa area in Kano State, Nigeria. *Scientific African*, 2020, vol. 7, p. e00281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00281>
 12. FAO. (2021). *Suelo*. Retrieved from <https://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm>
 13. GAŁĄZKA, Anna; GAŁĄZKA, Rafał. Phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils artificially polluted using plant-associated-endophytic bacteria and *Dactylis glomerata* as the bioremediation plant. *Pol. J. Microbiol*, 2015, vol. 64, p. 241-252. Disponible en: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.2119>
 14. GIOVANELLA, Patricia, et al. Metal resistance mechanisms in Gram-negative bacteria and their potential to remove Hg in the presence of other

- metals. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 140, p. 162-169. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.010>
15. HARUMA, Toshikatsu, et al. Root-endophytic *Chaetomium cupreum* chemically enhances aluminium tolerance in *Miscanthus sinensis* via increasing the aluminium detoxicants, chlorogenic acid and oosporein. *PLoS One*, 2019, vol. 14, no 2, p. e0212644. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212644>
 16. HASSAN, Auwalu, et al. Effective bioremediation of heavy metal–contaminated landfill soil through bioaugmentation using consortia of fungi. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no 1, p. 66-80. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02394-4>
 17. IHEDIOHA, J. N.; UKOHA, P. O.; EKERE, N. R. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in soil of a municipal solid waste dump in Uyo, Nigeria. *Environmental geochemistry and health*, 2017, vol. 39, no 3, p. 497-515. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9830-4>
 18. JEYASUNDAR, Parimala Gnana Soundari Arockiam, et al. Green remediation of toxic metals contaminated mining soil using bacterial consortium and *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 277, p. 116789. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116789>
 19. JIANG, Juan, et al. Combined remediation of Cd–phenanthrene co-contaminated soil by *Pleurotus cornucopiae* and *Bacillus thuringiensis* FQ1 and the antioxidant responses in *Pleurotus cornucopiae*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2015, vol. 120, p. 386-393. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.06.028>
 20. JIN, Zhongmin, et al. Application of *Simplicillium chinense* for Cd and Pb biosorption and enhancing heavy metal phytoremediation of soils. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 697, p. 134148. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134148>

21. JOHN, Racheal; THATAI, Sheenam; JEYASEELAN, Christine. Bioremediation of heavy metal polluted environments using biosurfactants. En Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science. Elsevier, 2021. p. 163-183. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822696-4.00005-X>
22. KAHHAT, Ramzy, et al. Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. Science of The Total Environment, 2019, vol. 662, p. 940-951. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.246>
23. Kalen, E., Shola, E., Adeniji, J., & Solomon, O. (2020). Biorremediación de metales tóxicos en el sitio minero de la metrópolis de Zamfara utilizando bacterias residentes (*Pantoea agglomerans*): un enfoque de optimización. *ScienceDirect*, 6(8). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04704>
24. KHALIL, N. M.; EL-SHESHTAWY, H. S.; AMAN, D. Elimination of different heavy metals in contaminated soil using indigenous microorganisms and nanoparticle in the El-Rahawy village, Egypt. J. Mat. Environ. Sci, 2016, vol. 7, p. 2603-2616. ISSN : 2028-2508
25. LIU, Peng, et al. Bioremediation of metal-contaminated soils by microbially-induced carbonate precipitation and its effects on ecotoxicity and long-term stability. Biochemical Engineering Journal, 2021, vol. 166, p. 107856. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107856>
26. LIU, Shao-Heng, et al. Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: A mini review. Bioresource technology, 2017, vol. 224, p. 25-33. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.095>
27. LIU, Xiangyu, et al. Bioremediation of Cd-contaminated soil by earthworms (*Eisenia fetida*): Enhancement with EDTA and bean dregs. Environmental Pollution, 2020, vol. 266, p. 115191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115191>

28. MANTEY, J., et al. Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). *Heliyon*, 2020, vol. 6, no 6, p. e04312. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312>
29. MELLO, Ivani Souza, et al. Endophytic bacteria stimulate mercury phytoremediation by modulating its bioaccumulation and volatilization. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 202, p. 110818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110818>
30. MINARI, Guilherme Deomedesse, et al. Bioremediation potential of new cadmium, chromium, and nickel-resistant bacteria isolated from tropical agricultural soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, vol. 204, p. 111038. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111038>
31. MORRIS, Sinead, et al. Bioremediation of landfill leachate using isolated bacterial strains. *Int. J. Environ. Bioremed. Biodegrad*, 2018, vol. 6, no 1, p. 26-35. Disponible en: <https://doi.org/10.12691/ijebb-6-1-4>
32. NAYAK, A. K., et al. Enhancement of toxic Cr (VI), Fe, and other heavy metals phytoremediation by the synergistic combination of native *Bacillus cereus* strain and *Vetiveria zizanioides* L. *International journal of phytoremediation*, 2018, vol. 20, no 7, p. 682-691. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1413332>
33. NDEDDY AKA, Robinson Junior; BABALOLA, Olubukola Oluranti. Identification and characterization of Cr-, Cd-, and Ni-tolerant bacteria isolated from mine tailings. *Bioremediation Journal*, 2017, vol. 21, no 1, p. 1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10889868.2017.1282933>
34. NWINYI, Obinna C.; AKINMULEWO, B. A. Remediation of soil polluted with spent oil using cow dung. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. p. 012058. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/331/1/012058>
35. O'FAIRCHEALLAIGH, Ciaran; CORBETT, Tony. Understanding and improving policy and regulatory responses to artisanal and small scale

- mining. The Extractive Industries and Society, 2016, vol. 3, no 4, p. 961-971. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.11.002>
36. OLADIPO, Oluwatosin Gbemisola, et al. Tolerance and growth kinetics of bacteria isolated from gold and gemstone mining sites in response to heavy metal concentrations. Journal of environmental management, 2018, vol. 212, p. 357-366. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.038>
37. Ortiz, J. (2017). Ecotoxicología del cadmio, riesgo para la salud por la utilización de suelos ricos en cadmio. *Universidad Complutense*, 1-22.
38. PANIAGUA-LÓPEZ, M., et al. Soil remediation approach and bacterial community structure in a long-term contaminated soil by a mining spill (Aznalcóllar, Spain). Science of The Total Environment, 2021, vol. 777, p. 145128. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145128>
39. POURFADAKARI, Sudabeh, et al. Remediation of PAHs contaminated soil using a sequence of soil washing with biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* strain PF2 and electrokinetic oxidation of desorbed solution, effect of electrode modification with Fe₃O₄ nanoparticles. Journal of hazardous materials, 2019, vol. 379, p. 120839. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120839>
40. QI, Xin, et al. In situ remediation of U-and Cd-contaminated soils by immobilized microorganisms and biochar. Journal of Agro-Environment Science, 2018, vol. 37, no 8, p. 1683-1689. ISSN: 1672-2043
41. QUISPE, Antonio M.; HINOJOSA-TICONA, Yessica; MIRANDA, Herbert A. y SEDANO, Claudia A. Serie de redacción científica: Revisiones Sistemáticas. Rev. Cuerpo Med. HNAAA [online]. 2021, vol.14, n.1 [citado 2022-05-17], pp.94-99. ISSN 2225-5109. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.141.906>
42. RAIMONDO, Enzo E., et al. Bioremediation of lindane-contaminated soils by combining of bioaugmentation and biostimulation: Effective scaling-up from microcosms to mesocosms. Journal of Environmental Management, 2020,

- vol. 276, p. 111309. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111309>
43. RANDELOVIĆ, D., et al. Remediation of Copper from Copper Mine Wastes and Contaminated Soils Using (S, S)-Ethylenediaminedisuccinic Acid and Acidophilic Bacteria. *Bioremediation Journal*, 2016, vol. 19, no 3, p. 231-238. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10889868.2014.995370>
44. Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., & Díaz, M. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 66-77. 2016.
45. RÍOS, Ricardo Viana. Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 2018, vol. 21, no 2, p. 617-631. Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>
46. RUPPRECHT, S. M. Bench mining utilizing manual labour and mechanized equipment-a proposed mining method for artisanal small-scale mining in Central Africa. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017, vol. 117, no 1, p. 25-31. Disponible en: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n1a5>
47. SINGH, Pardeep, et al. Bioremediation: a sustainable approach for management of environmental contaminants. En *Abatement of environmental pollutants*. Elsevier, 2020. p. 1-23. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00001-1>
48. SOTO-BENAVENTE, Margarita, et al. Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 2020, vol. 11, no 1, p. 49-59. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>
49. Speight, J. G. Removal of Organic Compounds From the Environment. *Environmental Organic Chemistry for Engineers*, 2017, 387–432. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804492-6.00009-5>

50. Suárez, M. *El saber pedagógico de los profesores de la Universidad de los Andes Táchira y sus implicaciones en la enseñanza*. 2017, Retrieved from Universidad Rovira Virgili: <https://tdx.cat/bitstream/handle/10803/8922/10CapituloXElcaracterCientificodelainvestigaciontfc.pdf?sequence=3&isAllowed=y#:~:text=El%20rigor%20cient%C3%ADfico%20en%20torno,concordancia%20con%20el%20proceso%20seguido>
51. TEIXEIRA, Renato Alves, et al. Artisanal gold mining in the eastern Amazon: Environmental and human health risks of mercury from different mining methods. *Chemosphere*, 2021, vol. 284, p. 131220. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131220>
52. UJAEN. (2020). *Investigación cualitativa*. Retrieved from Participantes: <http://www.ujaen.es/investiga/ticstfg/pdf/cualitativa/participantes.pdf>
53. VARJANI, Sunita; UPASANI, Vivek N.; PANDEY, Ashok. Bioremediation of oily sludge polluted soil employing a novel strain of *Pseudomonas aeruginosa* and phytotoxicity of petroleum hydrocarbons for seed germination. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 737, p. 139766. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139766>
54. VERMA, Samakshi; KUILA, Arindam. Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, vol. 14, p. 100369. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>
55. WU, Qihang, et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 506, p. 217-225. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
56. XIA, Shaopan, et al. A critical review on bioremediation technologies for Cr (VI)-contaminated soils and wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, vol. 49, no 12, p. 1027-1078. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1564526>

57. ZVARIVADZA, T. Artisanal and small-scale mining as a challenge and possible contributor to sustainable development. *Resources Policy*, 2018, vol. 56, p. 49-58. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.01.009>
58. ZHANG, Lu, et al. Immobilization of Pb and Cd by two strains and their bioremediation effect to an iron tailings soil. *Process Biochemistry*, 2022, vol. 113, p. 194-202. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.12.026>
59. ZHANG, Menghao, et al. Assessment of bioremediation potential of metal contaminated soils (Cu, Cd, Pb and Zn) by earthworms from their tolerance, accumulation and impact on metal activation and soil quality: A case study in South China. *Science of the Total Environment*, 2022, p. 152834. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152834>
60. ZŁOCH, Michał, et al. Modeling of phytoextraction efficiency of microbially stimulated *Salix dasyclados* L. in the soils with different speciation of heavy metals. *International journal of phytoremediation*, 2017, vol. 19, no 12, p. 1150-1164. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1328396>
61. ZOUBOULIS, Anastasios I.; MOUSSAS, Panagiotis A.; PSALTOU, Savvina G. *Groundwater and soil pollution: bioremediation*. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11246-1>

ANEXOS

Anexo 1. Instrumento de recolección de datos

 Universidad César Vallejo	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)		
PÁGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACIÓN	LUGAR DE PUBLICACIÓN
TIPO DE INVESTIGACIÓN:		
CÓDIGO/ISBN:		
PALABRAS CLAVES:		
MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN:		
ESPECIES BIOLÓGICAS:		
METAL USADO:		
RESULTADOS:		
CONCLUSIONES:		