



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“Efectividad de las técnicas de biorremediación en suelos
contaminados con metales pesados usando
microorganismos”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA AMBIENTAL

AUTORAS:

Asunción Rodríguez, Katherine Thalía (ORCID: 0000-0002-3767-6229)

Rondo Lopez, Yanela Lisbeth (ORCID: 0000-0002-8177-7705)

ASESOR:

Dr. Cruz Monzón, José Alfredo (ORCID: 0000-0001-9146-7615)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

TRUJILLO – PERÚ

2021

Dedicatoria

La presente investigación lo dedicamos especialmente:

A Dios, por guiarnos en el camino de la sabiduría para así poder lograr nuestras metas, sueños y aspiraciones, por la paciencia, serenidad y tolerancia para la elaboración de nuestra tesis y así superar las dificultades que se nos presentó.

A nuestros padres, por ser nuestros motores que nos impulsan a seguir adelante día a día con su incondicional amor, apoyo y confianza, quienes siempre están a nuestro lado en todo momento; a nuestros hermanos, por darnos el ánimo y el apoyo para lograr nuestros objetivos.

A nuestro asesor el Dr. Cruz Monzón, José Alfredo; por habernos brindado su apoyo, sabiduría y comprensión, así como también por haber tenido la dedicación y tolerancia para guiarnos en el transcurso de todo el proceso de nuestra tesis.

Las Autoras.

Agradecimiento

La realización de la presente investigación se lo agradecemos especialmente:

A Dios, por brindarnos vida, salud y seguridad, para poder seguir adelante con nuestras metas y sueños.

A nuestros padres, por estar presentes durante este largo camino, por su apoyo incondicional y amor infinito, por ser quienes nos han motivado constantemente con sus consejos, por su comprensión y palabras de aliento en continuar con nuestros estudios universitarios, quienes nos han brindado sus esfuerzos diarios para una buena educación y formación profesional.

A nuestro asesor de Tesis el Dr. Cruz Monzón, José Alfredo; por compartirnos sus conocimientos, su buena voluntad y disponibilidad para apoyarnos, así poder realizar y culminar nuestra tesis.

Las Autoras

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de gráficos y figuras.....	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
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:.....	13
3.3. Escenario de estudio:.....	13
3.4. Participantes:	14
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:	14
3.6. Procedimientos:	14
3.7. Rigor científico:	16
3.8. Método de análisis de la Información:	16
3.9. Aspectos éticos:.....	17
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS	32
ANEXOS	

Índice de tablas

Tabla 1.	Ordenamiento de las técnicas de biorremediación según el agente biológico usado.	7
Tabla 2.	Criterios de inclusión de revistas científicas	14
Tabla 3.	Palabras claves utilizadas para la investigación.....	15
Tabla 4.	Número de artículos utilizados en la investigación	16
Tabla 5.	Eficiencia de remoción de metales pesados en suelos contaminados según el tipo de técnica de biorremediación.....	18
Tabla 6.	Promedios de remoción de metales pesados según la técnica de biorremediación.....	21
Tabla 7.	Capacidad de remoción según el tipo de microorganismos en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados.....	23
Tabla 8.	Utilización de las técnicas de biorremediación según el tipo de suelo.	27
Tabla 9.	Promedios de remoción de metales pesados según el tipo de suelo.	29
Tabla 10.	Matriz de categorización apriorística.	43
Tabla 11.	Clasificación de las especies a géneros de los microorganismos ...	46
Tabla 12.	Clasificación de los géneros a familias de los microorganismos	47
Tabla 13.	Utilización de géneros de bacterias en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados. ...	50
Tabla 14.	Utilización de géneros de hongos en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados.	51
Tabla 15.	Utilización de géneros de microalgas en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados. ...	52

Índice de gráficos y figuras

Figura1.	Clasificación de los procesos de biorremediación.....	7
Figura2.	Clasificación de técnicas de biorremediación según ubicación.	8
Figura3.	Clasificación de técnicas de biorremediación según metodología de implementación.	9
Figura4.	Procesos de búsqueda de información	15
Figura5.	Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo	49

Resumen

La actividad minera se ha caracterizado durante muchos años por la generación de distintos impactos entre los que se encuentra la liberación de metales pesados en distintos entornos ambientales, generando problemas de contaminación tanto en suelos como en las fuentes de agua. La presente investigación se propuso evaluar la efectividad de las distintas técnicas de biorremediación de suelos contaminados con metales pesados, que han sido reportadas en la literatura científica indexada de acceso libre. Se utilizó un diseño no experimental, del tipo revisión sistemática sin meta-análisis. Se consultaron las bases de datos Scielo, Redalyc, Sciencedirect, Eric y Research Gate, utilizando palabras clave de búsqueda y aplicando criterios de inclusión, se retuvieron 35 artículos. Los resultados mostraron que la técnica más eficiente en biorremediación de As, Cd, Cu, Zn y Pb fue la micorremediación, de la cual se obtuvieron porcentajes de 85%, 82.8%, 52.7%, 53.5% y 72.3% respectivamente, mientras tanto la técnica menos eficiente fue la ficorremediación por lo que no se pudieron registrar porcentajes altos en remoción de metales pesados, mientras tanto las familias de microorganismos más predominantes en la remoción de metales fueron Entre las familias de microorganismos más efectivas en cuanto a la remoción de metales pesados fueron: *Trichocomaceae* con 85% de As, *Mucoraceae* con 88% de Cd, *Trichocomaceae* con 70% de Cr, *Mucoraceae* con 75% de Cu, *Bacillaceae* con 80% de Zn, *Flavobacteriaceae* con 80% de Zn, *Mucoraceae* con 90% de Pb, *Flavobacteriaceae* con 90% de Hg, *Pseudomonas* con 90% de Hg, *Staphylococcaceae* con 90% de Hg y *Enterobacterias* con 90% de Ni. Y, por último, el tipo de suelo que tuvo una eficaz remoción de metales pesados fue el suelo arcilloso, en cuanto a: 87.5%, 71% y 82% de Cd, Cr y Hg respectivamente. Finalmente se concluye que microorganismos son capaces de reducir grandes cantidades de metales pesados en suelos contaminados, dependiendo del tipo de técnica de biorremediación y del tipo de suelo a tratar.

Palabras clave: Metales pesados, microorganismos, técnicas de biorremediación y contaminación de suelos.

Abstract

Mining activity has been characterized for many years by the generation of different impacts, among which is the release of heavy metals in different environmental settings, generating pollution problems both in soils and in water sources. The present research set out to evaluate the effectiveness of the different bioremediation techniques for soils contaminated with heavy metals, which have been reported in the open access scientific indexed literature. A non-experimental design was used, of the systematic review type without meta-analysis. The Scielo, Redalyc, Sciencedirect, Eric and Research Gate databases were consulted, using search keywords and applying inclusion criteria, 35 articles were retained. The results showed that the most efficient technique in bioremediation of As, Cd, Cu, Zn and Pb was micoremediation, of which percentages of 85%, 82.8%, 52.7%, 53.5% and 72.3% respectively were obtained, meanwhile the The least efficient technique was phytoremediation, so high percentages in the removal of heavy metals could not be recorded, meanwhile the most predominant families of microorganisms in the removal of metals were among the most effective families of microorganisms in terms of the removal of heavy metals. where: Trichocomaceae with 85% As, Mucoraceae with 88% Cd, Trichocomaceae with 70% Cr, Mucoraceae with 75% Cu, Bacillaceae with 80% Zn, Flavobacteriaceae with 80% Zn, Mucoraceae with 90% Pb, Flavobacteriaceae with 90% Hg, Pseudomonas with 90% Hg, Staphylococcaceae with 90% Hg and Enterobacteria with 90% Ni. And, finally, the type of soil that had an effective removal of heavy metals was clay soil, in terms of: 87.5%, 71% and 82% of Cd, Cr and Hg respectively. Finally, it is concluded that microorganisms are capable of reducing large amounts of heavy metals in contaminated soils, depending on the type of bioremediation technique and the type of soil to be treated.

Keywords: Heavy metals, microorganisms, bioremediation techniques and soils contamination.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las empresas mineras se han caracterizado durante muchos años por la generación de grandes cantidades de residuos que contienen EPT (elementos potencialmente tóxicos), que son dispersados en la biósfera con la consecuente agravante de los suelos y sedimentos, poniendo así en riesgo a la salud de las poblaciones y al equilibrio eco-sistémico (Pérez y Martín, 2015, p. 2).

El Perú es uno de los países potencialmente rico en minerales, esto hoy en día da lugar a que la labor minera se posicione como la primordial manufacturera productora de ingresos económicos del país, ocasionando que se convierta en una de las actividades más importante y contaminante, ya que estas industrias causan estragos en el recurso suelo, debido a sus diversos procesos y a la utilización de diferentes sustancias químicas – tóxicas; muchas de estas industrias después de haber sobreexplotado los recursos minerales, abandonan sus instalaciones y no hacen un adecuado Plan de Cierre de Mina (Delgado, 2016, p. 10).

La afectación por metales pesados al suelo es un problema grave para la actividad productiva de alimentos y la humanidad. Las técnicas de biorremediación pueden lograr eliminar o reducir la contaminación y proveer suelos saludables. Estos procesos antes mencionados son absolutamente naturales con efectos poco dañinos. Son realizados *in situ* y producen muy escasos subproductos nocivos. Ya que son procesos mucho más baratos que otras técnicas de remediación por lo que no requieren equipo ni mano de obra considerables (Verma, 2021, p.11).

La biorremediación o remediación biológica, son técnicas implican la purificación por vía biológica. Aprovechando la capacidad de inmovilización o movilización que tienen los microorganismos con estos contaminantes. Los principales seres vivos capaces de lograr estos procesos de biorremediación son los hongos, las bacterias y microalgas. Los procesos de remediación biológica utilizados para la

remoción de metales pesados en suelos degradados son: biovolatilización, bioprecipitación, biolixiviación (autotrófica y heterotrófica) y biosorción (Covarrubias, García y Peña, 2015, p. 41).

Asimismo, los procesos biológicos que implican la utilización de las capacidades metabólicas de hongos y bacterias, es así como se utilizan en la remoción de metales pesados en suelos contaminados, son una opción adicional a las técnicas usuales. Aun así, son precisas más investigaciones sobre la variedad de microorganismos dentro de las áreas degradadas por metales pesados, ya que es *in situ* donde será posible que surjan cepas con superiores capacidades para ser manipuladas y mejor adaptadas para remover a estos contaminantes (Covarrubias, García y Peña, 2015, p. 43).

El recurso suelo no se puede recuperar por sí solo, puesto que necesita de sus componentes naturales, estos se desequilibran ya que este medio se ve afectado por la minería, a causa de que es degradado en gran parte, dejándole sin sus propiedades físicas, químicas y biológicas, solo por generar pérdida para la humanidad, sin recibir beneficio alguno, abandonando a este recurso sin nutrientes para la producción agrícola o si es posible cultivar algo, esta vegetación se convierte en algo dañino para la parte biótica que habita en él (INIA, 2015, p. 6-7).

Un eminente contaminante son los metales pesados como el As y Pb que son los metales más peligrosos que se acumulan en las diferentes capas del suelo generando un gran daño significativo a este recurso y al mismo tiempo causan perjuicios en la salud de la población. Es por esta razón que investigamos la efectividad de las técnicas de biorremediación de metales pesados del suelo, que garantice la recuperación de este recurso que es tan necesitado por la humanidad para su sobrevivencia y es beneficioso para la vida microbiana, flora y fauna que habitan en él (Covarrubias y Peña, 2017, p. 8-10).

Los microorganismos cumplen un rol muy trascendental, porque cumplen funciones determinantes en la eliminación de elementos inorgánicos y orgánicos del suelo, estos están compuestos por algas, hongos, bacterias, protozoos y

levaduras, posibles soluciones para reparar el daño ocasionado por los metales pesados (BELTRÁN, Mayra et al., 2017, p. 159).

Una de las tantas tareas de los ingenieros ambientales es velar por la subsistencia de nuestros bienes naturales, con la asistencia del conocimiento y la tecnología, empleando diferentes técnicas para así dar solución a los problemas ambientales. Es por ello que se planteó la siguiente interrogante: ¿Qué efectividad tendrán las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos? Esta investigación se enfocó en buscar investigaciones realizadas anteriormente donde se emplearon técnicas de biorremediación en superficies degradadas con metales pesados con la utilización de microorganismos que ayuden a contrarrestar la gran problemática que viven hoy en día muchas localidades a causa de los impactos significativos que ocasiona la actividad minera debido a la sobreexplotación de los minerales, afectando severamente al recurso suelo y dentro de este a la biodiversidad que existe en él. Incitando la infertilidad, lesiones paisajísticas y afectando la eficacia de la existencia de la población.

Así mismo, la investigación realizada permitirá mostrar la efectividad que tuvieron estas técnicas de biorremediación en suelos contaminados, como también profundizar los conocimientos teóricos sobre los procesos biorremediadores que realizan los microorganismos dependiendo al tipo de suelo. Además, ofrecer una mirada integral del daño ocasionado por la mano del hombre; y poder apoyar a las poblaciones que viven alrededor de las compañías mineras que afrontan día con día los estragos que ocasionan estos cimientos mineros.

Como investigadores tuvimos el objetivo general de evaluar la efectividad de las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos. Asimismo, se plantearon como objetivos específicos evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados en suelos contaminados según el tipo de técnica; evaluar la eficiencia de las principales técnicas de biorremediación en suelos contaminados según el tipo de microorganismo utilizado y evaluar la remoción de metales pesados según el tipo de suelo contaminado.

II. MARCO TEÓRICO

Según Rodríguez, Her et al. (2017, p. 353-354), se refiere a las labores mineras, en diversas partes mexicanas se han registrado concentraciones muy altas de As, teniendo como objetivo ejecutar un estudio general concerniente a la biorremediación del arsénico mediante microorganismos. Con la utilización de bacterias sulfato reductoras de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Aspergillus* y microalgas, es posible y son capaces de resistir elevadas acumulaciones de metales pesados o incluso los necesitan en sus procedimientos biológicos.

Por otro lado, Flores, Amairani et. al (2020), realizó una investigación observacional característica, fraccionada en 125 muestras (25 por matriz ambiental). Las muestras del terreno y todas las cepas se sembraron en agar LB con la siguiente concentración, estando en el rango de 0.5 a 20 mm dependiendo de la sal metálica. Seguidamente, se seleccionó una colonia de microorganismos para asegurar la bioacumulación de Cd, Cr y Pb, se observa reducción en 9% de Zn^{2+} , 24% Pb^{2+} y 39% de Ag^{2+} correspondientemente, estos metales están en superior acumulación en el área siendo controladas con una estirpe de *B. sphaericus*, *B. cereus* y *B. subtilis* (p. 69-70).

Ávila, José y Quito, David (2019), teniendo el objetivo de reconocer a las especies microbianas fúngicas que están vigentes en el campo de la actividad metalúrgica de Loma Larga. Las muestras de suelo, sirvieron para aislar hongos filamentosos, por siembra directa utilizando: Sabouraud, Malt Extract Agar (MEA) y Potato Dextrosa Agar (PDA). Teniendo como especies más sobresalientes: tres cepas de *Trichoderma sp* (14.2%), siete cepas de *Penicillium sp* (33.3%) y once cepas de *Aspergillus sp* (52.3%) (p. 08-09).

Así mismo, Muñoz, Loyer et al. (2019), se extrajeron cuatro muestras del terreno de aproximadamente de un kilo, a 25 centímetros de fondo correspondientes a las instalaciones pasivas mineras de la empresa concentradora Santa Rosa de Jangas. Entre todos los metales, se obtuvo en mayor concentración el plomo (Pb). Posteriormente se registraron un total de 41 familias, teniendo como

resultado: dieciocho bacterias, una levadura y veintidós hongos filamentosos. En la determinación filogenética de las bacterias se identificó la existencia de siete especies reunidas en cuatro géneros, en los cuales el género *Bacillus* estuvo conformada por tres especies: *B. subtilis*, *B. licheniformis* y *B. cereus*; se aislaron variedades de *Enterobacter*, *Staphylococcus epidermidis* y *Serratia*. Además, una especie de *Staphylococcus capitis*, que demostraron la capacidad de reducir al cromo (IV), níquel, cobre, zinc, plomo y cadmio en porcentajes aproximados al 80% (p. 109-114).

A continuación, Fazekas, Juraj et al. (2019) se realizó un trabajo de experimentación con pruebas de laboratorio para determinar la diversidad funcional de microorganismos en suelos contaminados con metales. Donde se examinaron los efectos de componentes ambientales expuestos a la diversidad de microorganismos en los montones y depósitos de relaves de minas de mineral de hierro. Se encontraron metales como: Hg, Cu, Zn, Cd, Pb y Cr que excedieron el límite permisible. La reacción del suelo fue extremadamente ácida; la capacidad de biodegradación de los microorganismos fue diferente en las áreas investigadas, obteniendo significativamente hallazgos concluyentes para percibir la diversidad microbiana en suelos contaminados con metales y que se pueden utilizar para evaluar la calidad y salud del suelo, así como para aplicaciones científicas de técnicas de remediación (p. 31-32).

Según Zegarra, Regina (2017), determino que lo primordial fue emplear el *Pleurotus ostreatus* para así dar tratamiento a la superficie degradada con Plomo (Pb) y el aserrín como complemento, en el cual se sembró junto el hongo *Pleurotus ostreatus* con el trigo; la muestra de suelo fue de relave minero. Para evaluar qué cantidad de concentración de Pb se redujo en las muestras, el tratamiento se conservó con una temperatura de 22 °C y una humedad de 33% en la incubadora. Las consecuencias más efectivas en la disminución de bioacumulación de Pb en el suelo fueron, el procedimiento T1 con tres semillas, logrando 792.00 mg/kg y así reduciendo al Pb en un 29.4% en las muestras (p. 12-13).

Por último, Solano, Gianella (2018), usó microorganismos como técnica de

tratamiento. Teniendo como meta señalar la eficacia de la conglomeración de *actinomyce*tos relacionado con la eliminación de metales pesados en suelos contaminados. Estuvo compuesto por dos procedimientos que son: *actinomyce*to + muestra de suelo contaminado y un blanco. En las muestras de terreno se presentaron grandes cantidades de: 357.3 mg/kg de Cu, 1120.1 mg/kg de As, 2717.4 mg/kg de Zn y 747.60 mg/kg de Pb, estos valores fueron antes del tratamiento, luego que el procedimiento con *actinomyce*to se procesó, se obtuvo superior eficacia a una concentración de 6x10⁹ UFC/ml por 36h, teniendo como resultado lo siguiente: Cu (7.54%), Pb (33.1%), As (48.79%), Zn (77.41%) (p. 09-10).

La biorremediación es considerada como un proceso, que emplea individuos biológicos para la reducción o remoción de sustancias nocivas presentes en un determinado ecosistema. La aplicación de estos procesos son una solución para los problemas ambientales asociados a contaminantes tóxicos, ya que se basa en el empleo de microorganismos que son tolerantes o resistentes a metales pesados; se entiende que un organismo es resistente cuando este posee una estructura específica para mantenerse vivo luego de sufrir la exhibición a un elemento tóxico, por otro lado, un organismo tolerante tiene la capacidad propia de lo resguarda de un elemento contaminante (Chiriví et al., 2019, p. 15).

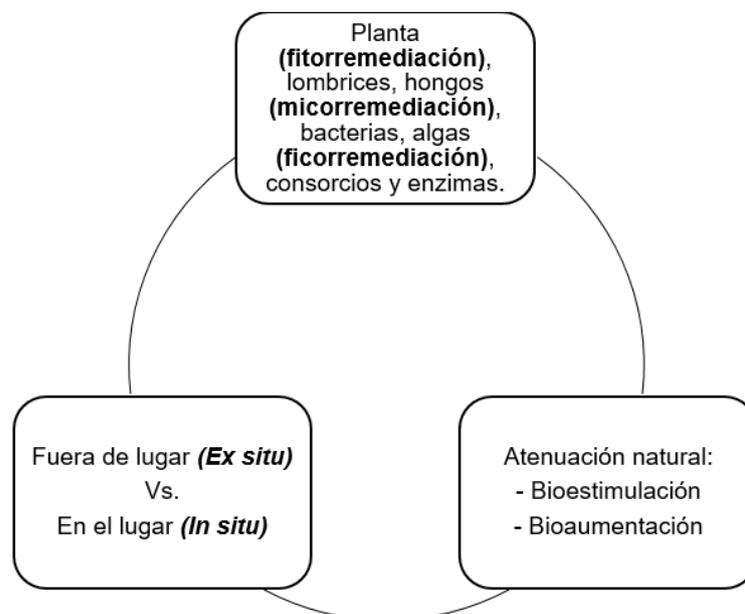


Figura1. Clasificación de los procesos de biorremediación.

Las técnicas de biorremediación son utilizadas para la inhibición, la reducción o eliminación de contaminantes tóxicos en suelos de una forma prácticamente económica, de manera efectiva y como un proceso ecoamigable con el ambiente. En estos procesos se usan una variedad de organismos que pueden acumular o transformar sustancias contaminantes derivadas de las industrias mineras. La categorización de estas técnicas está regida por la utilización del agente remediador como hongos, bacterias, consorcios, plantas, mezclas o enzimas; por la ubicación del desarrollo de la técnica *ex situ* o *in situ*; y por la metodología de implementación: bioestimulación o bioaumentación. La combinación de estas categorías logra proporcionar una selección del adecuada para el proceso de biorremediación para eliminar o reducir un contaminante de manera práctica (Chiriví et al., 2019, p. 16).

Tabla 1. Ordenamiento de las técnicas de biorremediación según el agente biológico usado.

Biorremediación					
Técnicas:					
Compostaje y Lombricultivo	Fitorremediación	Micorremediación	Ficorremediación	Biorremediación bacteriana	Biorremediación enzimática
Organismos utilizados					
Lombrices de tierra	Arabidopsis, escarola, álamos, girasoles, canola, sauces y pastos, entre otras.	Mohos y levaduras y setas.	Microalgas	Bacterias (<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> y <i>Lysinibacillus</i>)	Enzimas hidrolíticas

Fuente: elaboración propia.

Según la ubicación de la técnica de biorremediación, se establecieron dos categorías: *ex situ*, cuando el proceso de la técnica se realiza en un lugar diferente al ecosistema afectado por sustancias tóxicas, en esta situación se escava una muestra de suelo a tratar y tal procedimiento se manipula en un procedimiento controlado como un biorreactor o una celda de land farming; por otro lado, *in situ*, es cuando la técnica se ejecuta directamente en el ecosistema afectado, es decir que los tratamientos no demandan procesos de excavación, perturban en lo mínimo el lugar afectado y son los más utilizados porque son menos costos (Chiriví et al., 2019, p. 19).

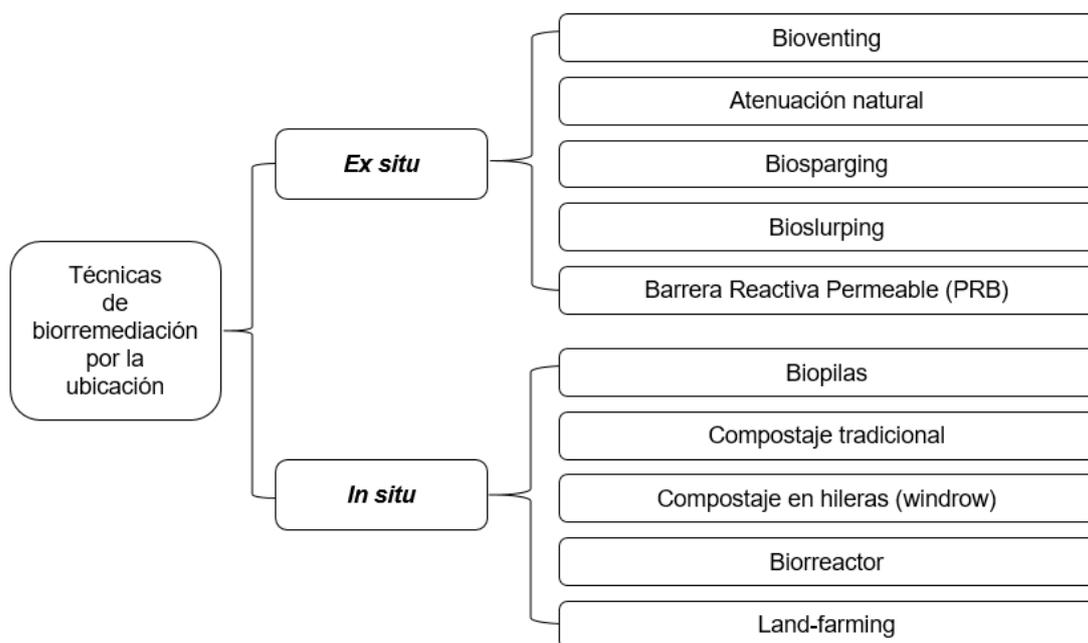


Figura2. Clasificación de técnicas de biorremediación según ubicación.

También existen las técnicas de bioestimulación reside en la introducción de nutrientes para fomentar y favorecer el desarrollo de los microorganismos propios con la capacidad de remover sustancias tóxicas; y la bioaumentación es la suministración de microorganismos que pueden ser exógenos o nativos con la cabida de remover agentes tóxicos (Chiriví et al., 2019, p. 22).

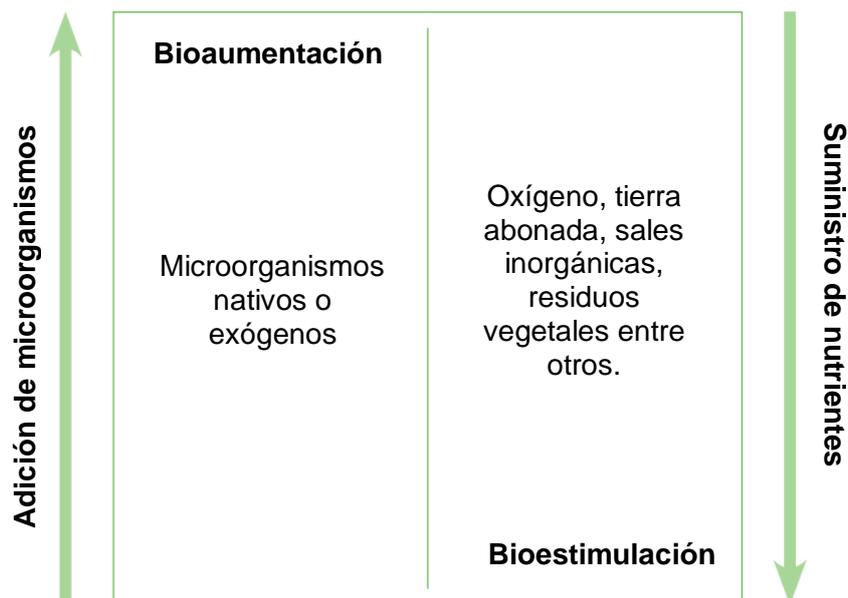


Figura3. Clasificación de técnicas de biorremediación según metodología de implementación.

Se afirma que los microorganismos pertenecen a una parte biótica bastante minúscula que no pueden ser observados a escueta vista, son investigados e identificados por los microbiólogos con el empleo equipos científicos especializados para su estudio. Estos seres minúsculos son: arqueas, bacterias, eucariotas como, algas, levaduras y protozoarios, hongos y virus. Algunos de ellos son peligrosos (causan contaminaciones y enfermedades) y bastantes de estos son aliados de la humanidad y del medio ambiente. Estos se localizan en diversos lugares, en el aire que inhalamos, en la superficie que pisamos, en los insumos alimenticios, e intervienen en todos los seres vivos e intervienen en métodos físicos y químicos del mundo (López et al., 2015, p.84).

Por otro lado, Beltrán et al. (2016, p. 159), los conjuntos eficaces de microorganismos abarcados en determinados períodos de los lapsos de nutrientes son fracción integral de las técnicas de repoblación de vegetación y logran ser utilizados como indicadores de la disposición del terreno o como un instrumento biotecnológico útil para oprimir su degradación en general.

La impregnación de metales pesados en el medio ambiente afecta el funcionamiento de los microorganismos e incita cambios morfológicos y

fisiológicos en las estructuras de la población microbiana y ejerce una presión selectiva sobre la microbiota del suelo (Mohammadian et al., 2017, p. 10).

Los microorganismos son agentes inmovilizadores capaces de extraer metales directamente en su biomasa por su bioadsorción, bioacumulación y biomineralización. La bioadsorción es un mecanismo metabólicamente independiente que permite a los microorganismos absorber contaminantes en su estructura celular y la Bioacumulación depende de factores medioambientales y de las características propias de los hongos y bacterias utilizados en las investigaciones anteriormente desarrolladas; en los factores medio ambientales se consideran las peculiaridades químicas del suelo tales como: la materia orgánica, el pH, la cabida de adsorción del suelo, la textura y las concentraciones de los metales. Por otro lado, las características de los hongos y bacterias son el nivel de capacidad de extraer metales pesados bioasimilables, dejando a estos menos disponibles para el suelo. (Cornu et al., 2017, 04).

Según Burbano (2016, p. 118-119), El suelo es un medio originario definido y no reversible que facilita amplios productos ecosistémicos, los cuales son el referente para la contribución de compuestos claves para los procesos biogeoquímicos para la existencia de: nitrógeno, fósforo, carbono, etc., por consecuencia de la energía aprovechable, pasa del medio vivo a ser un elemento no vivo del mundo. Además, se destaca que el suelo es el medio natural para la fabricación de comestibles y bienes primarios, de estos dependemos los seres humanos.

Por otro lado, la contaminación del suelo se refiere a aquel suelo cuyos elementos químicos, son perturbados negativamente por la existencia de partículas degradantes introducidas por la mano del hombre procedentes de las actividades industriales diarias. Por otro lado, el deterioro del suelo se especifica por la existencia de un limitado grado de sustancias contaminantes líquidos y sólidos que estropean la superficie terrestre o el desgaste de sus funciones. Se determina que un terreno está deteriorado cuando hay tipos de variaciones o desequilibrio en la estructura natural del suelo. Los contaminantes pueden estar químicamente conexos a las funciones de este (Ministerio del Ambiente, 2016,

p. 16).

La contaminación industrial, tecnológica, agropecuaria y minera en el área terrestre con metales pesados, que se concentran posteriormente en arroyos, flora, ganados y bienes alimenticios afectan la sostenibilidad del enlace trófico, incitando peligros potenciales en la naturaleza y en las poblaciones, produciendo serios problemas en la salud humana, en la diversidad de flora y fauna, degradación del paisaje, etc. La existencia de una superior proporción de metales pesados como: cadmio, arsénico, plomo, mercurio, etc. en el entorno, favorece al aumento de los perjuicios de la problemática antes citada. Y verdaderamente estos metales pesados no son sólo de tipologías químicas, sino que los valores en los que pueden existir en el medio ambiente son severamente nocivos (Londoño, Londoño y Muñoz, 2016, p.146-147).

Según Awa y Hadibarata (2019, p. 06) Los metales pesados los cuales son: Cu, Cd, Zn, Pb, Cr y As son utilizados por agricultura e industrias y son altamente tóxicos en muy bajas concentraciones.

Estos metales son los componentes naturales que se pueden encontrar en el suelo, pero ocurre contaminación cuando la concentración de metales es alta debido a la minería según figura 6. La saturación por metales pesados en los ecosistemas se engloba en un problema general; a medida que se introducen concentraciones enormes de metales a la diversidad de suelos, afectando la calidad de este, causando enseguida una disminución de productividad e inseguridad alimentaria siendo esto una amenaza para las personas y los ecosistemas que nos rodean (Xiao, 2017, p. 05).

La acumulación de metales pesados en un terreno contaminado tiene como efecto que los microorganismos sean más sensibles que los animales y las plantas, cuando se someten a estrés por metales pesados, su biomasa, actividades enzimáticas y su estructura, convierten a la comunidad microbiana en indicadores sensibles de los ecosistemas del suelo (Zhao, et al, 2020, p. 14).

Cuando el suelo está contaminado con metal, el efecto puede ser perjudicial, especialmente en el suelo microbiano y diversidad de suelos con respecto a taxonomía y funcionalidad (Emenike et al., 2018, p. 02).

Para López (2019, p. 07) La industria metalúrgica a cielo abierto, ocasiona enormes impactos significativos ambientales, a la población y culturales, que se fundamentan en el aprovechamiento de insumos no renovables encontrados subterráneamente de la corteza superficial de la tierra y el nivel de impacto se determinará directamente por la tipología de mineral que se intente extraer. La minería es una industria económica de gran importancia mundial. La explotación de minerales y su posterior comercialización son decisivas para la economía global. Uno de los fundamentales países exportadores de metales como oro, cobre y plata es el Perú.

Metales pesados es un término que generalmente se refiere a metales y metaloides, con alta densidad a $5\text{g}/\text{cm}^3$ que contienen Zn, Cd, Cu, As, Pb, Hg, Fe, Ag, Cr. Están ampliamente involucrados en labores humanas, como la combustión de hidrocarburos, la minería, fertilizantes y otras actividades industriales, liberando en gran cantidad en el medio ambiente diariamente a través de aguas residuales u otras vías. Debido a sus características no biodegradables, los metales pesados tienden a permanecer en la naturaleza, lo que lleva a la bioacumulación en el medio ambiente (Sana Ashraf et al., 2019, p. 06).

Según Salwinder et al. (2019, p. 04), los metales pesados representan un elemento que tienen un mayor peso atómico a $4 - 5\text{g}/\text{cm}^3$ y es tóxico para el ser humano incluso en muy baja concentración. Los metales pesados son el elemento presente en el grupo del Fe, Pb, As, Hg, Ag, Cr, Zn y Cd. Los metales pueden esparcirse por diferentes componentes como en el suelo, cuerpos de agua, plantas.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación:

Por el propósito fue de tipo básico, por su nivel de profundidad fue descriptivo, por la naturaleza de los datos y la información fue un estudio mixto (cuali-cuantitativo), por los medios para conseguir los datos fue documental; por la menor o mayor manejo de variables fue no experimental y según el periodo temporal en el que se realizó fue longitudinal; ya que esta investigación estuvo centrada en el análisis de conceptos y argumentos realizados por otros autores, lo que involucró un análisis sistemático y crítico de investigaciones realizadas anteriormente.

El diseño de este estudio fue no experimental, ya que la revisión de los artículos nos permitió recopilar información de un tema determinado, que explico la relación que existe en el uso de técnicas de biorremediación para el tratamiento de suelos degradados por metales pesados.

3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización:

Las categorías fueron: tipos de técnicas de biorremediación, tipo de microorganismos y tipo de suelos, se logró definir mediante la matriz de categorización apriorística que sirvió para lograr categorizar mejor la información como se observa en anexo 01, donde se presentaron: el objetivo general, los objetivos específicos correspondientemente sus preguntas de investigación, el ámbito temático y el problema de investigación.

3.3. Escenario de estudio:

Estuvo conformado por las revistas indexadas de las bases de datos, las cuales fueron utilizadas para la selección de información que sirvió para la investigación, también nos sirvieron para encontrar información sobre los tipos de técnicas de biorremediación que existen e identificar los microorganismos que pueden remover metales pesados de suelos contaminados, estas plataformas fueron las siguientes: SCIELO, SCIENCE DIRECT, REDALYC.

3.4. Participantes:

Los participantes de este estudio estuvieron conformados por todos los artículos científicos relacionados al tema de investigación. En la recopilación de data de la presente investigación cada uno de los artículos fueron analizados y sintetizados para reunir la información pertinente de este estudio.

Tabla 2. Criterios de inclusión de revistas científicas

Aspectos	Criterios de inclusión
Tipo de literatura	Artículo científico
Acceso a la literatura	Acceso abierto
Idioma	Español – Ingles
Año de publicación	2015 – 2021

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

La técnica de recolección de datos fue el análisis documental, mismo que consistió en examinar los artículos científicos extraídos de revistas indexadas para encontrar los elementos más esenciales para nuestra investigación (Lujardo, 2016, p. 03); el instrumento de recolección de datos radicó en la ficha de investigación bibliográfica, ya que estaba orientado a establecer las pautas para la medición, por lo tanto debió ser objetivo, confiable y valido, es por ello que los resultados obtenidos fueron genuinos (Hernández y Duana, 2020, p. 51-52).

3.6. Procedimientos:

Primeramente, se definió el título de la investigación, así se pudo obtener las palabras claves como referencia para la búsqueda de información en las revistas indexadas de las bases de datos, donde se seleccionó artículos científicos de realce, de acuerdo a los aspectos de inclusión como lo son: tipo de literatura, acceso a la literatura, idioma y el año de publicación, posteriormente se elaboró la ficha de investigación para la recolección de datos, a continuación se analizó y sintetizo la información de autores de investigaciones anteriores que nos

servieron para nuestro estudio, consecutivamente se elaboró el informe con toda la información recopilada.

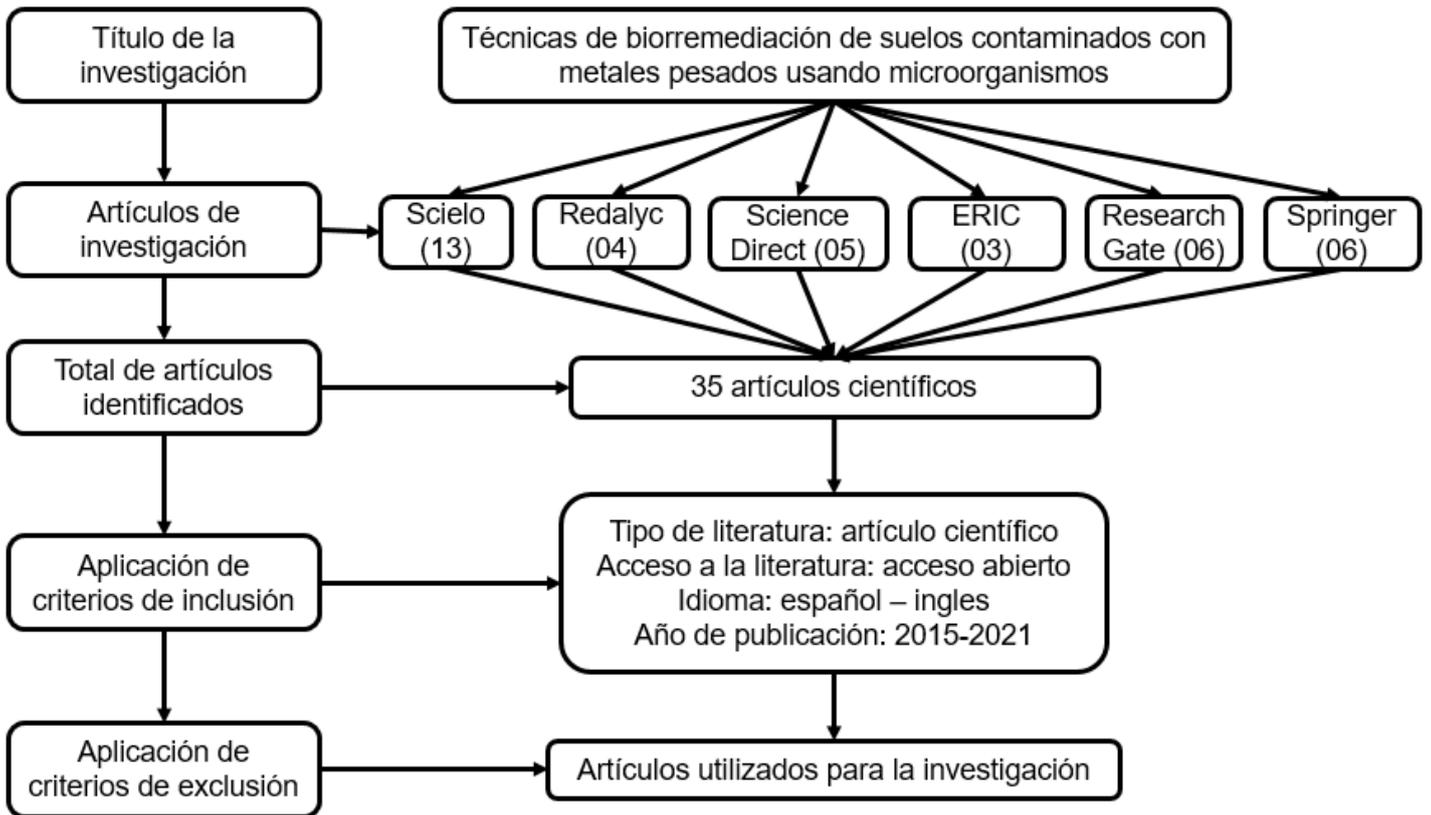


Figura4. Procesos de búsqueda de información

Tabla 3. Palabras claves utilizadas para la investigación.

Base de Datos	Palabras Claves
Scielo	<ul style="list-style-type: none"> - Soils contamination. - Heavy metals. - Bioremediation techniques. - Soils bioremediation.
Redalyc	<ul style="list-style-type: none"> - Suelos contaminados - Metales pesados. - Técnicas de biorremediación. - Biorremediación de suelos.
Science Direct	<ul style="list-style-type: none"> - Soils contamination. - Heavy metals. - Bioremediation techniques. - Soils bioremediation.
Eric	<ul style="list-style-type: none"> - Suelos contaminados - Metales pesados. - Técnicas de biorremediación. - Biorremediación de suelos.
Research Gate	<ul style="list-style-type: none"> - Soils contamination. - Heavy metals.

- Bioremediation techniques.
- Soils bioremediation.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Número de artículos utilizados en la investigación

AÑO	BASE DE DATOS						TOTAL
	Scielo	Redalyc	Science Direct	Eric	Research Gate	Springer	
2015	1	2	0	0	0	0	3
2016	4	1	0	0	0	0	5
2017	2	1	2	0	0	1	6
2018	0	0	0	0	1	0	1
2019	2	0	2	1	2	1	8
2020	2	0	1	2	3	2	10
2021	2	0	0	0	0	0	2
TOTAL							35

Fuente: elaboración propia.

3.7. Rigor científico:

Esta investigación se enfocó en la utilización de artículos científicos que fueron extraídos de las revistas indexadas de las plataformas de acceso libre, por ende, la información que fue mostrada es confiable, clara y precisa, además son revisados por especialistas en el tema, garantizando así la rigurosidad y veracidad de los datos que fueron utilizados en esta investigación.

3.8. Método de análisis de la Información:

Como este estudio fue descriptivo mixto el método de análisis de la información que se empleó fue la ficha de investigación bibliográfica, a fin de sintetizar la información más relevante de los estudios encontrados. Asimismo, para establecer y sistematizar la indagación de datos se usó el programa Microsoft Excel 2016, donde se categorizo la información en columnas por el tipo de técnica de biorremediación, tipo de suelo, tipo de microorganismos y porcentaje de remoción.

3.9. Aspectos éticos:

En el presente estudio, la confiabilidad de la información fue delimitada por las bases de datos de donde se extrajeron los artículos científicos, los cuales fueron analizados y sintetizados, así no se afectó la autoría de los estudios anteriormente realizados y todo ello estuvo de acuerdo a las pautas determinadas por la Universidad César Vallejo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto al objetivo específico N° 01, referido a evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados en suelos contaminados, según el tipo de técnica, se resume a continuación en la tabla 5:

Tabla 5. Eficiencia de remoción de metales pesados en suelos contaminados según el tipo de técnica de biorremediación.

Ítem	Autor	Técnica de biorremediación	Remoción (%)							Tipo de tratamiento		
			As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni	Ex situ	In situ
1	Flores, Amairani et al.	Biorremediación bacteriana	39	41	43	30		35			X	
2	Sanjudo, Alexander et al.				80					85	X	
3	Ochoa, Francisco et al.			86				88	88	90	X	
4	Cornu, Jean et al.					62					X	
5	Torres, José et al.			83.1							X	
6	Muñoz, Loyer et al.			25.2	35.3	82.5	62	54.9		75.2	X	
7	Zhao, Xingqing et al.			34.73		25	80	50			X	
8	Emenike, C et al.			85		62	63				X	
9	Beltrán, Mayra et al.				88	90			90		X	
10	Rodriguez, Her et al.			62							X	

11	Mohammadian, Elham et al.		73		48	67	54			X
12	Ochoa, Francisco et al.		88				90	65	34	X
13	Muñoz, Loyer et al.		74.5	37.5	75.3	59.4	70.9		57.7	X
14	Baltazar, Ivett et al.	Micorremediación						62		X
15	Emenike, C et al.		85		70	74				X
16	Beltrán, Mayra et al.		87	52				74		X
17	Cadavid, Edith et al.		83	62	36	40	73	42	51	X
18	Zhao, Xingqing et al.		45.7		23.8	16.9	25.2			X
19	Beltrán, Mayra et al.	Ficorremediación	25.6	31.2				22.5		X

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Promedios de remoción de metales pesados según la técnica de biorremediación

Tipo de técnica de biorremediación	Promedios de remoción (%)							
	As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni
Biorremediación bacteriana	62	71,7	68,8	45,0	35,8	57,7	89,0	87,5
Micorremediación	85	82,8	61,3	52,7	53,5	72,3	60,8	42,5
Ficorremediación	0	35,65	31,2	23,8	16,9	25,2	22,5	0

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3, se muestran los ocho metales pesados provenientes de las actividades mineras entre los cuales tenemos: arsénico, cadmio, cromo, cobre, zinc, plomo, mercurio y níquel. El tipo de tratamiento que se realizó en todas las investigaciones recopiladas fue ex situ, debido a la ubicación del desarrollo de la técnica de biorremediación, ya que las muestras de suelo, luego de ser extraídas fueron llevadas a laboratorios para su análisis y posterior tratamiento

Lo cual fue contrastado por Chiriví et al. (2019) quien demostró que la mayor parte de las investigaciones que logran efectos significativos en la remoción de metales pesados, se obtiene cuando el suelo es transportado a ciertos lugares donde es más efectivo el control de las variables.

Por lo tanto, en la tabla 6 anteriormente evaluada se observa que la técnica de biorremediación más destacada fue la micorremediación en cuanto a la remoción de As, Cd, Cu, Zn y Pb, ya que se reportaron porcentajes de 85%, 82.8%, 52.7%, 53.5 y 72.3% respectivamente; mientras tanto en la biorremediación bacteriana se registraron los valores de remoción de Cr, Hg y Ni de 68.8%, 89.0% y 87.5% respectivamente; siendo la técnica más limitada la ficorremediación, ya que no se lograron porcentajes que superen el 50%.

Del mismo modo Chiriví et al. (2019), afirma que los tipos de microorganismos que son más capaces de acumular o remover metales pesados son los hongos y las bacterias (micorremediación y biorremediación bacteriana), como también

Fazekas, Juraj et al. (2019) los conjuntos más eficaces de microorganismos son los hongos y bacterias ya que forman parte de una fracción integral de las técnicas de repoblación de vegetación y logran ser utilizados como indicadores de la disposición del terreno o como un instrumento biotecnológico útil para oprimir la degradación en general del suelo.

Con respecto al objetivo específico N° 02, referido a evaluar la eficiencia de las principales técnicas de biorremediación en suelos contaminados, según el tipo de microorganismo utilizado, se resume en la tabla 6:

Tabla 7. Capacidad de remoción según el tipo de microorganismos en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados.

Nº	Autor	Código de las familias de bacterias														Remoción (%)								
		<i>Rhi</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>Sta</i>	<i>Sp</i>	<i>X</i>	<i>Str</i>	<i>T</i>	<i>Rho</i>	<i>H</i>	As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni
1	Flores, Amairani et al.			X	X	X		X	X		X						39	41	43	30		35		
2	Rodríguez, Her et al.	X	X						X					X		62								
3	Muñoz, Loyer et al.			X		X			X								25.2	35.3	82.5	62.7	54.9			75.2
4	Sanjudo, Alexander et al.			X														80						85
5	Emenike, C et al.			X					X				X			85		62	63					
6	Zhao, Xingqing et al.	X		X	X	X		X			X			X			34.7			9.25	8.99	8.68		
7	Ochoa, Francisco et al.			X		X											86					88	88	90
8	Beltrán, Mayra et al.			X	X	X		X	X				X				88	90					90	
9	Cornu, Jean et al.			X															62					
10	Torres, José et al.														X		83.1							
Nº	Autor	Código de las familias de hongos														Remoción (%)								

		<i>H</i>	<i>PI</i>	<i>Tr</i>	<i>N</i>	<i>Hyd</i>	<i>R</i>	<i>Mu</i>	<i>Ma</i>	<i>Sa</i>	<i>D</i>	<i>St</i>	<i>U</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Hg</i>	<i>Ni</i>
1	Muñoz, Loyer et al.			X	X			X							74.5	37.5	75.3	59.4	70.9		57.7
2	Baltazar, Ivett et al.					X	X													62	
3	Emenike, C et al.			X						X		X		85		70	74				
4	Mohammadian, Elham et al.	X	X	X	X						X				73		48	67	54		
5	Ochoa, Francisco et al.			X	X			X	X				X		88				90	65	34
6	Cadavid, Edith et al.					X	X								83	62	36	40	73	42	51
7	Beltrán, Mayra et al.				X			X							87	52				74	

Nº	Autor	Códigos de las familias de microalgas		Remoción (%)							
		<i>Chlamydomonadaceae</i>	<i>Phormidiaceae</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Hg</i>	<i>Ni</i>
1	Zhao, Xingqing et al.	X			45.7		23.8	16.9	25.2		
2	Beltrán, Mayra et al.		X		25.6	31.2				22.5	

Fuente: elaboración propia.

Tipo de microorganismo	Familia de microorganismo	Promedio de remoción (%)							
		As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni
Bacterias	<i>Bacillaceae</i>	62	71,7	68,8	45	80	57,7	89	87,5
	<i>Flavobacteriaceae</i>	39	64,5	66,5	27,5	80	42,5	90	0
	<i>Enterobacterias</i>	39	71,7	66,5	30	62,7	61,5	89	90
	<i>Pseudomonas</i>	62	64,5	65	46,5	0	35	90	0
	<i>Staphylococcaceae</i>	39	64,5	66,5	30	62,7	35	90	75,2
Hongos	<i>Trichocomaceae</i>	85	80,5	70	61	67	72	65	34
	<i>Nectriaceae</i>	0	82,7	52	48	67	72	69,5	34
	<i>Mucoraceae</i>	0	87,5	52	75,3	59,4	90	69,5	34
Microalgas	<i>Chlamydomonadaceae</i>	0	45,7	0	23,8	16,9	25,2	0	0
	<i>Phormidiaceae</i>	0	25,6	31,2	0	0	0	22,5	0

En la tabla 6, se hizo mención a las familias de los microorganismos y al porcentaje de remoción que se logró documentar después de emplear las técnicas de biorremediación. Para realizar la categorización de los microorganismos, lo primero que se realizó fue codificar las especies de acuerdo a sus correspondientes géneros y posteriormente clasificarlos en familias, como se muestra en la tabla 9 y tabla 10, así se logró conseguir una mejor evaluación de los microorganismos que son más predominantes en la remoción de metales pesados, teniendo como resultado lo siguiente: 25 especies de bacterias; 31 especies de hongos y 2 especies de microalgas.

Por consiguiente, estuvo la clasificación por géneros, siendo estos los siguientes: 18 géneros de bacterias; 16 géneros de hongos y 2 géneros de microalgas. Por último, estuvo la codificación por familias de cada género de los microorganismos identificando: 15 familias de bacterias; 12 familias de hongos y 2 familias de microalgas.

De las cuales las familias más efectivas de bacterias en la remoción de metales fueron *Bacillaceae* con 62%, 72%, 69% y 80% de As, Cd, Cr y Zn respectivamente; *Flavobacteriaceae* con 80% y 90% de Zn y Hg; *Enterobacterias* con 72%, 62% y 90% de Cd, Pb y Ni; *Pseudomonas* con 62%, 47% y 90% de S, Cu y Hg y *Staphylococcaceae* con 90% de Hg; siendo estas las más manipuladas

en las investigaciones anteriormente realizadas. Del mismo modo esto es afirmado por Xiao (2017) que estas familias fueron capaces de bioadsorber, bioacumular y biomineralizar directamente en su biomasa metales pesados alojados en suelos contaminados.

Por otro lado, en las familias de hongos las más eficaces en cuanto a remoción de metales pesados se registraron las siguientes: *Trichocomaceae* con 85%, 70%, 67% y 34% de As, Cr, Zn y Ni respectivamente; *Nectriaceae* con 67%, 70% y 34% de Zn, Hg y Ni; y *Mucoraceae* con 88%, 75%, 90%, 70% y 34% de Cd, Cu, Pb, Hg y Ni. Lo mismo fue manifestado por Salwinder et al. (2019) que afirma que estas familias son eficientes en extracción de metales directamente en su biomasa por bioacumulación dependiendo factores medioambientales y de las características propias de los hongos.

Y entre las familias de microalgas más eficaces en remoción de metales se encontraron *Chlamydomonadaceae* con 46%, 24%, 17% y 25% de As, Cu, Zn y Pb respectivamente y *Phormidiaceae* con 31% y 23% de Cr y Hg; siendo documentadas en las indagaciones realizadas con anterioridad. Por lo cual Londoño y Muñoz (2016), afirma que estas familias fueron eficaces en la remoción de metales, dependiendo de las peculiaridades químicas del suelo a tratar tales como: la materia orgánica, el pH, la capacidad de adsorción del suelo, la textura y las concentraciones de los metales.

Con respecto al objetivo específico N° 03, referido a evaluar la remoción de metales pesados según el tipo de suelo contaminado, se tiene que en las investigaciones reportadas utilizaron suelos del tipo franco (F), arenoso (A), franco – arenoso (F – A), franco – arcilloso (F – Arc) y arcilloso (Arc), lo cual se resume en la tabla 7.

Tabla 8. Utilización de las técnicas de biorremediación según el tipo de suelo.

Ítem	Autor	Tipo de Suelo	Técnica de biorremediación	Remoción (%)								
				As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni	
1	Flores, Amairani et al.	F	Biorremediación bacteriana	39	41	43	30		35			
2	Sanjudo, Alexander et al.		Biorremediación bacteriana			80					85	
3	Ochoa, Francisco et al.		Biorremediación bacteriana		86					88	88	90
			Microrremediación		88					90	65	34
4	Cornu, Jean et Al.		Biorremediación bacteriana				62					
5	Torres, José et al.		Biorremediación bacteriana		83.1							
6	Mohammadian, Elham et al.		Microrremediación		73			48	67	54		
7	Muñoz, Loyer et al.].		Biorremediación bacteriana		25.2	35.3	82.5	62.7	54.9			75.2
		Microrremediación		74.5	37.5	75.3	59.4	70.9			57.7	
8	Zhao, Xingqing et al.	Biorremediación bacteriana		34.73			9.25	8.99	8.68			
		Ficorremediación		45.7			23.8	16.9	25.2			

9	Baltazar, Ivett et al.		Micorremediación									62
10	Emenike, C et al.	F – Arc	Biorremediación bacteriana	85		62	63					
			Micorremediación	85		70	74					
11	Beltran, Mayra et al..	Arc	Biorremediación bacteriana		88	90						90
			Micorremediación		87	52						74
			Ficorremediación		25.6	31.2						22.5
12	Rodríguez, Her et al.		Biorremediación bacteriana	62								
13	Cadavid, Edith et al.	A	Micorremediación		83	62	36	40	73	42	51	

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Promedios de remoción de metales pesados según el tipo de suelo.

Tipo de suelo	Promedios de remoción (%)							
	As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni
F	39	72	61,5	46,7	67	66,8	76,5	69,7
F – A	0	45	36,4	25	80	50	62	66,5
F – Arc	85	0	66	68,5	0	0	0	0
Arc	0	87,5	71	0	0	0	82	0
A	62	83	62	36	40	73	42	51

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 7, se presentaron los ocho metales pesados identificados en los diferentes tipos de suelos, así como el porcentaje de remoción de estos según el tipo de técnicas de biorremediación utilizadas en las investigaciones anteriormente realizadas. Los tipos de suelos identificados fueron: franco (F), franco – arenoso (F-A), franco- arcilloso (F-Arc), Arcilloso (Arc) y Arenoso (A).

Lo cual fue demostrado por Zhao, et al (2020) quien afirmó que los tipos característicos encontrados en las actividades mineras son los anteriormente mencionados, es por ello que se realizó el análisis de datos bajo esta clasificación.

Por lo tanto, en la tabla 10 se evaluó la remoción de metales por tipo de suelo, se removió Cd, Cr y Hg en los siguientes valores 87.5%, 71% y 82% respectivamente en suelo arcilloso, por otro lado, en el suelo franco - arcilloso se reportaron porcentajes de 85% y 68.5% de As y Cu, mientras tanto en el suelo franco – arenoso se removió 80% de Zn, en el suelo arenoso 73% de Pb y en el suelo franco 69.7% de níquel.

Lo mismo fue indicado por Xiao (2017), quien menciona que las técnicas de biorremediación son más eficaces y tienen efectos más significativos en los suelos arcilloso y franco – arcilloso.

V. CONCLUSIONES

- La técnica más eficiente en biorremediación de As, Cd, Cu, Zn y Pb fue la micorremediación, ya que de la cual se obtuvieron porcentajes de 85%, 82.8%, 52.7%, 53.5% y 72.3% respectivamente, mientras tanto la técnica menos eficiente fue la ficorremediación por lo que no se pudieron registrar porcentajes altos en remoción de metales pesados.
- Entre las familias de microorganismos más efectivas en cuanto a la remoción de metales pesados fueron: *Trichocomaceae* con 85% de As, *Mucoraceae* con 88% de Cd, *Trichocomaceae* con 70% de Cr, *Mucoraceae* con 75% de Cu, *Bacillaceae* con 80% de Zn, *Flavobacteriaceae* con 80% de Zn, *Mucoraceae* con 90% de Pb, *Flavobacteriaceae* con 90% de Hg, *Pseudomonas* con 90% de Hg, *Staphylococcaceae* con 90% de Hg y *Enterobacterias* con 90% de Ni.
- Finalmente, el tipo de suelo que tuvo una eficaz remoción de metales pesados fue el suelo arcilloso, en cuanto a: 87.5%, 71% y 82% de Cd, Cr y Hg, mientras tanto el suelo franco-arcilloso registro 85% y 68.5% de As y Cu, por otro lado, en el suelo franco-arenoso se removi6 80% de Zn, en el suelo arenoso 73% de Pb y en el suelo franco 69.7% de Ni.

VI. RECOMENDACIONES

- Para realizar un análisis más exhaustivo de las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados, es primordial realizar más investigaciones en *ex situ* como *in situ* para así poder definir con más facilidad el tipo de técnica que se va a utilizar en dicha investigación.
- Por otro lado, se puede realizar una cadena de evaluación utilizando todas las bases de datos disponibles incluyéndolo el acceso cerrado para no tener ninguna complicación en la selección de artículos.

REFERENCIAS

- Análisis Documental: ¿Normas establecidas? Biblioteca Médica Nacional – La Habana. 2016. Disponible en <https://files.sld.cu/bmn/files/2016/10/An%C3%A1lisis-Documental.-Normas-establecidas-el-de-la-ksa.pdf>
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Ministerio del Ambiente del Perú. 2017. Disponible en <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-estandares-de-calidad-ambiental-ec>
- ÁVILA, José y QUITO, David. “Identificación de la Biodiversidad Fúngica a través del análisis metagenómico del suelo en el área de la concesión minera Loma Larga Azuay – Ecuador”. Trabajo de Investigación. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Ambiental, 2019. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16942/1/UPS-CT008152.pdf>
- ASHRAF, Sana [et al]. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea]. 15 junio 2019, Vol. 174. [Fecha de consulta: 10 de octubre del 2021]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651319302271>
ISSN 0147-6513
- AWA, Soo y HADIBARATA, Tony. Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism: a Reriew. *Water, Air, & Soil Pollution* [en línea]. 21 enero de 2020, Vol. 231, n.º 47. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-4426-0>
[DOI: 10.1007/s11270-020-4426-0](https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0)

- BAIMENOV, Alzhan [et al]. A review of cryogels synthesis, characterization and applications on the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Advances in Colloid and Interface Science* [en línea]. 7 febrero de 2019, Vol. 276. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868619302908#>
DOI: 10.1016/j.cis.2019.102088
- BALTAZAR, Ivett [et. al]. Crecimiento de *Fraxinus Uhdei* inoculado con dos cepas ectomicorrízicas en dos sustratos, uno contaminado con mercurio. Revista internacional de *contaminación ambiental* [en línea]. Mayo 2021, Vol. 36, n.º 2. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992020000200455&script=sci_arttext&tlnq=es
ISSN: 0188-4999
- BELTRAN, Mayra [et. al]. Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* [en línea]. Julio 2016, Vol. 12, n.º 2. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2027>
ISSN: 1900-4699
- BELTRÁN, Mayra [et. al]. Microorganismos Funcionales en Suelos con y sin Revegetación en el Municipio de Villa de Leyva, Boyacá. *Colombia Forestal* [en línea]. Mayo 2017, Vol. 20, n.º 2. [Fecha de consulta: 30 de setiembre del 2021]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v20n2/v20n2a05.pdf>
ISSN: 0120-0739

- BERNAL, Andy [et. al]. Características de los suelos y sus factores limitantes de la Región de Murgas, Provincia de La Habana. *Cultivos Tropicales* [en línea]. 2015, n.º 2. [Fecha de consulta: 03 de octubre del 2021]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193239249005.pdf> ISSN 0258-5936
- BURBANO, Hernán. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas* [en línea]. Diciembre 2016, Vol. 33, n.º 2. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v33n2/v33n2a11.pdf> ISSN: 0120-0135
- CADAVID, Edith [et. al]. Contaminación por metales pesados en la bahía Cispatá en Córdoba - Colombia y su bioacumulación en macromicetos. *Gestión y Ambiente* [en línea]. Enero 2019, Vol. 22, n.º 1. [Fecha de consulta: 22 de setiembre del 2021]. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/76380> DOI: 10.15446/ga.v22n1.76380
- CAHUANA, Lizardo y ADUVIRE, Osvaldo. Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería* [en línea]. Diciembre 2019, Vol. 4, n.º 2. [Fecha de consulta: 03 de octubre del 2021]. Disponible en http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v4n2/v4n2_a02.pdf ISSN 2519-5352
- CAVIEDES, Diego, DELGADO, Daniel y OLAYA, Alfredo. Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción + Limpia* [en línea]. Julio 2016, Vol. 11, n.º 2. [Fecha de consulta: 03 de octubre del 2021]. Disponible en

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200012

ISSN 1909-0455

- CHIRIVÍ, Juan [et. al]. Revisión y panorama nacional de la biorremediación microbiana [en línea]. 1ª ed. Bogotá: Sello Editorial UNAD, 2019 [Fecha de consulta: 03 de octubre del 2021]. Disponible en <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3721/3742>
ISBN: 978-958-651-728-7
- CORNU, Jean [et. al]. Bioremediation of copper – contaminated soils by bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* [en línea]. Enero 2017, n.º 26. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11274-016-2191-4>
DOI: 10.1007/s11274-016-2191-4
- CORTES, Luis [et. al]. Extracción Secuencial de Metales Pesados en dos Suelos Contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con Ácidos Húmicos. *Acta Agronómica* [en línea]. 2016, Vol. 65, n.º 3. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169944104005.pdf>
ISSN 0120-2812
- COVARRUBIAS, Sergio y PEÑA Juan. Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea]. Abril 2017, Vol. 33, n.º 1. [Fecha de consulta: 30 de setiembre del 2021]. Disponible en <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.esp01.01/46640>
ISSN: 0188-4999

- COVARRUBIAS, Sergio; GARCIA, José y PEÑA, Juan, El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria* [en línea]. Octubre 2015, Vol. 25, n.º 3. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41648311004>
ISSN: 0188-6266
- DELGADO, Víctor. “El impacto de la minería en el Perú, bajo la exégesis del análisis económico del Derecho, período del 2010 al 2015”. Tesis (Título de Licenciado en Derecho). Lima: Universidad Peruana de las Américas, Escuela de Derecho, 2016. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/250158225.pdf>
- DEL VALLE, Yanina. Tutela colectiva ambiental que impacta en la industria minera. Tesis (Abogado). Córdoba, Argentina: Universidad Empresarial Siglo 21, Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, 2015. Disponible en <https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/18791/TFG%20Yanina%20del%20Valle%20Lallana%20-%20Yani%20Lallana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- EMENIKE, C [et. al]. Biotransformation and removal of heavy metals: a review of phytoremediation and microbial remediation assessment on contaminated soil. *Environmental Reviews* [en línea]. 12 enero de 2018. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/er-2017-0045>
DOI: 10.1139/er-2017-0045
- FAZEKAS, Juraj [et. al]. Functional diversity of microorganisms in metal and alkali contaminated soils of Central and North eastern Slovakia. *Soil and Water Research* [en línea]. 2019, n.º 14. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en https://www.agriculturejournals.cz/web/swr.htm?type=article&id=37_2018-SWR

DOI: 10.17221/37/2018-SWR

- FIELD, Jim. Biorremediación de Metales Pesados. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Arizona: Universidad de Arizona – Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, 2015. Disponible en http://binational.pharmacy.arizona.edu/sites/binational.pharmacy.arizona.edu/files/all_files/Bioem-MP.pdf
- FLORES, Amairani [et. al]. Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México. *Terra Latinoamericana* [en línea]. Junio 2020, Vol. 38, n.º 1. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792020000100067&lng=pt&nrm=iso
ISSN: 0187-5779
- Glosario de Términos – Sitios Contaminados. Ministerio del Ambiente del Perú. 2016. Disponible en <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>
- HERNÁNDEZ, Sandra y DUANA, Danae. Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Ciencias Económico Administrativas* [en línea]. Diciembre 2020, Vol. 9, n.º 17. [Fecha de consulta: 05 de octubre del 2021]. Disponible en <file:///C:/Users/pc/Downloads/6019-Manuscrito-35678-1-10-20201120.pdf>
ISSN: 2007-4913
- LEONG, Yoong y CHANG, Jo-Shu. Biorremediación de Metales Pesados Mediante Microalgas: Avances y Mecanismos Recientes. *Bioresource Technology* [en línea]. Mayo 2020, Vol. 303. [Fecha de consulta: 05 de octubre del 2021]. Disponible en

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09608524203015>

53

ISSN: 0960-8524

- LONDOÑO, Luis, LONDOÑO, Paula y MUÑOZ, Fabián. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal en Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* [en línea]. Julio – diciembre 2016, Vol.14, n.º 2. [Fecha de consulta: 30 de setiembre del 2021]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
DOI:10.18684/BSAA (14)
- LÓPEZ, Alejandro [et. al]. La Investigación en Microbiología Ambiental en Baja California: Importancia y Usos. *Recursos Naturales y Sociedad* [en línea]. Julio – diciembre 2015, Vol. 1, n.º 1. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en http://www.cibnor.gob.mx/revistas/pdfs/vol1num1/7_LA_INV_EN_MICROBIOLOGIA.pdf
DOI:10.18846/RENAYSOC.2015.01.01.01.0007
- LÓPEZ, Esther. Construcción de la imagen de la minería a partir de la cosmovisión multicultural en Cajamarca. Trabajo de Investigación (Bachiller en Comunicación e Imagen Empresarial). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Facultad de Comunicaciones, 2019. Disponible en https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/652497/L%c3%b3pez_AE.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- MOHAMMADIAN, Elham [et. al]. Tolerance to heavy metals in filamentous fungi isolated from contaminated mining soils in the Zanjan Province, Iran. *Chemosphere* [en línea]. Octubre 2017, Vol.185. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S00456535173106>
52
DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.022

- MORA, Abrahan [et. al]. Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del Río Puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea]. Febrero 2016, Vol. 32, n.º 4. [Fecha de consulta: 05 de octubre del 2021]. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v32n4/0188-4999-rica-32-04-00385.pdf>
ISSN 0188-4999
- MUÑOZ, Loyer [et. al]. Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa Rosa, Jangas (Perú). *Revista Peruana de Biología* [en línea]. Enero - marzo 2019, n.º 1. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332019000100013&lang=es
ISSN 1727-9933
- OCHOA, Francisco [et. al]. Caracterización molecular y criopreservación de hongos y bacterias asociados a la rizosfera de especies vegetales acumuladoras de metales pesados en suelos contaminados por minería. *Bionatura* [en línea]. Mayo 2017, Vol. 2, nº2. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <http://revistabionatura.com/2017.02.02.3.html>
DOI: 10.21931/RB/2017.02.02.3
- PÉREZ, Isabel y MARTÍN, Francisco, Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Sociedad Geológica Mexicana* [en línea]. Abril 2015, Vol. 67, n.º 1. [Fecha de consulta: 29 de setiembre del 2021]. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v67n1/v67n1a1.pdf>
ISSN: 1405-3322
- RODRIGUEZ, Dunia. Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan* [en línea]. 2017, n.º 12. [Fecha de consulta: 03 de octubre del

2021]. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n12/san122112.pdf>
ISSN 1029-3019

- RODRÍGUEZ, Her [et. al]. Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos genéticamente modificados. *Terra Latinoamericana* [en línea]. Enero – agosto 2017, Vol. 35, n.º 4. [Fecha de consulta: 30 de setiembre del 2021]. Disponible en <https://www.redalyc.org/jatsRepo/573/57353101008/index.html>
ISSN: 2395-8030
- SALWINDER, Dhaliwa [et al]. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 7 February 2019, n.º 27. [Fecha de consulta: 10 de octubre del 2021]. disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-06967-1>
DOI: [10.1007/s11356-019-06967-1](https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1)
- SANJUDO, Alexander [et. al]. Caracterización de bacterias resistentes a metales pesados aisladas de un residual minero cubano, *Minería y Geología* [en línea]. 30 junio 2020, Vol.36, nº2. [Fecha de consulta: 30 de setiembre del 2021]. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122020000200188
ISSN: 1993-8012
- Semana de la Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas. INAI Tacuarembó – Uruguay. 2015. Disponible en <http://inia.uy/Documentos/P%C3%BABlicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/EI%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf>
- SOLANO, Gianella. Eficiencia de *Actinomycetos* en la remoción de metales pesados presentes en suelos contaminados procedentes del Distrito de Quiruvilca. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Ambiental).

Trujillo: Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, 2018.
Disponible en https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/36037/solano_sg.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- TORRES, José [et. al]. New cadmium bioremediation agents: Trichoderma species native to the rhizosphere of cacao trees. *Scientia Agropecuaria* [en línea]. Abril 2021, Vol. 12, n.º 2. [Fecha de consulta: 08 de octubre del 2021]. Disponible en <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/3465/4137>
DOI: 10.17268/sci.agropecu.2021.017
- VERMA, Anita. Bioremediation Techniques for Soil Pollution: An Introduction. *IntechOpen* [en línea]. Setiembre 2021. [Fecha de consulta: 02 de octubre del 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/354757670_Bioremediation_Techniques_for_Soil_Pollution_An_Introduction
DOI: 10.5772/intechopen.99028
- XIAO, Ran [et. al]. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea]. Julio de 2017, Vol. 141. [Fecha de consulta: 30 de setiembre del 2021]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651317301367>
ISSN: 0147-6513
- ZEGARRA, Regina. “Capacidad del hongo Pleurotus ostreatus para la biorremediación de suelos contaminados por plomo (Pb) en el laboratorio – 2017”. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Ambiental). Lima: Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, 2017. Disponible en https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/17493/Zegarra_MR.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- ZHAO, Xingqing [et al]. Effects of soil heavy metal pollution on microbial activities and community diversity in different land use types in mining areas. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 01 abril de 2020, Vol.27. [Fecha de consulta: 01 de octubre del 2021]. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-08538-1>

DOI: 10.1007/s11356-020-08538-1

ANEXOS

Tabla 10. Matriz de categorización apriorística.

ÁMBITO TEMÁTICO	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	CATEGORÍAS	SUBCATEGORÍAS													
Técnicas de biorremediación	¿Qué efectividad tendrán las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos?	¿Qué tipo de técnica de biorremediación lograra mayor eficiencia de remoción de metales pesados en suelos contaminados?	Evaluar la efectividad de las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismo.	Evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados en suelos contaminados según el tipo de técnica.	Tipos de técnicas de biorremediación.	Biorremediación bacteriana													
		¿Qué tipo de microorganismos obtendrá mejor biorremediación de suelos contaminados con metales pesados?		Evaluar la eficiencia de las principales técnicas de biorremediación en suelos contaminados según el tipo de microorganismo utilizado.		Bacterias	Micorremediación	Ficorremediación	<i>Rhizobiaceae</i>	<i>Alcaligenaceae</i>	<i>Bacillaceae</i>	<i>Flavobacteriaceae</i>	<i>Desulfobacteraceae</i>	<i>Enterobacterias</i>	<i>Methylobacteriaceae</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	<i>Staphylococcaceae</i>	<i>Sphingomonadaceae</i>	<i>Xanthomonadaceae</i>
					Hongos	<i>Hypocreaceae</i>	<i>Pleosporaceae</i>	<i>Trichocomaceae</i>											

			<i>Nectriaceae</i>
			<i>Hydnangiaceae</i>
			<i>Russulaceae</i>
			<i>Mucoraceae</i>
			<i>Magnaporthaceae</i>
			<i>Saccharomycetaceae</i>
			<i>Discosiaceae</i>
			<i>Streptomycetaceae</i>
			<i>Umbelopsidaceae</i>
		Microalgas	<i>Chlamydomonadaceae</i>
			<i>Phormidiaceae</i>
			Franco
		Tipo de suelos	Franco-arenoso
			Franco-arcilloso
			Arcilloso
			Arenoso
	¿Qué tipo de suelo contaminado tendrá mayor remoción de metales pesados usando técnicas de biorremediación?	Evaluar la remoción de metales pesados según el tipo de suelo contaminado.	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Clasificación de las especies a géneros de los microorganismos

Nº	Bacterias		
	Especie	Género	Código
1	<i>Agrobacterium Tumefaciens</i>	<i>Agrobacterium</i>	1
2	<i>Alcaligenes Faecalis</i>	<i>Alcaligenes</i>	2
3	<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus</i>	3
4	<i>B. Cereus</i>	<i>Bacillus</i>	3
5	<i>B. Licheniformis</i>	<i>Bacillus</i>	3
6	<i>B. Subtilis</i>	<i>Bacillus</i>	3
7	<i>Chryseobacterium sp</i>	<i>Chryseobacterium</i>	4
8	<i>Desulfobacter</i>	<i>Desulfobacter</i>	5
9	<i>Enterobacter sp</i>	<i>Enterobacter</i>	6
10	<i>Flavobacterium</i>	<i>Flavobacterium</i>	7
11	<i>Kaistobacter</i>	<i>Bacillus</i>	3
12	<i>Lysinibacillus</i>	<i>Lysinibacillus</i>	8
13	<i>Methylobacterium</i>	<i>Methylobacterium</i>	9
14	<i>Pseudomonas sp</i>	<i>Pseudomonas</i>	10
15	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas</i>	10
16	<i>Rhizobium sp</i>	<i>Rhizobium</i>	11
17	<i>Rhodoplanes</i>	<i>Rhizobium</i>	11
18	<i>S. epidermidis</i>	<i>Staphylococcus</i>	12
19	<i>S. serratia sp</i>	<i>Serratia</i>	13
20	<i>S. nematodiphila</i>	<i>Staphylococcus</i>	12
21	<i>Sphingomonas</i>	<i>Sphingomonas</i>	14
22	<i>Stenotrophomonas sp</i>	<i>Stenotrophomonas</i>	15
23	<i>Streptomyces sp</i>	<i>Streptomyces</i>	16
24	<i>Thermusther mophilus</i>	<i>Thermus</i>	17
25	<i>Zoogloea</i>	<i>Zoogloea</i>	18
Hongos			
1	<i>Acremonium persicium</i>	<i>Acremonium</i>	A
2	<i>Alternaria</i>	<i>Alternaria</i>	B
	<i>Chlamydosporigena</i>		
3	<i>Aspergillus sp</i>	<i>Aspergillus</i>	C
4	<i>A. versicolor</i>	<i>Aspergillus</i>	C
5	<i>F. fujikuroi</i>	<i>Fusarium</i>	D
6	<i>F. inflexum</i>	<i>Fusarium</i>	D
7	<i>F. nygamai</i>	<i>Fusarium</i>	D
8	<i>F. oxysporum</i>	<i>Fusarium</i>	D
9	<i>F. ramigenum</i>	<i>Fusarium</i>	D
10	<i>F. temperatum</i>	<i>Fusarium</i>	D
11	<i>Fusarium</i>	<i>Fusarium</i>	D
12	<i>Fusarium verticillioides</i>	<i>Fusarium</i>	D

13	<i>Laccaria Laccata</i>	<i>Laccaria</i>	E
14	<i>Lactarius deliciosus</i>	<i>Lactarius</i>	F
15	<i>M. griseocyanus</i>	<i>Mucor</i>	G
16	<i>Mucor</i>	<i>Mucor</i>	G
17	<i>Nedulisporium</i>	<i>Nodulisporium</i>	H
18	<i>P. digitatum</i>	<i>Penicillium</i>	I
19	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium</i>	I
20	<i>Penicillium simplicissimum</i>	<i>Penicillium</i>	I
21	<i>P. rubens</i>	<i>Penicillium</i>	I
22	<i>P. vanluykii</i>	<i>Penicillium</i>	I
23	<i>Rhizopus</i>	<i>Rhizopus</i>	J
24	<i>R. dairenensis</i>	<i>Rhizopus</i>	J
25	<i>Saccharomyces</i>	<i>Saccharomyces</i>	K
26	<i>Seimatosporium pistaciae</i>	<i>Seimatosporium</i>	L
27	<i>Streptoverticillum sp</i>	<i>Streptoverticillum</i>	M
28	<i>Talaromyces</i>	<i>Talaromyces</i>	N
29	<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma</i>	Ñ
30	<i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Trichoderma</i>	Ñ
31	<i>Umbelopsis</i>	<i>Umbelopsis</i>	O
Microalgas			
1	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	
2	<i>Phormidium</i>	<i>Phormidium</i>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Clasificación de los géneros a familias de los microorganismos

Bacterias			
	Género	Familias	Código
1	<i>Agrobacterium</i>	<i>Rhizobiaceae</i>	Rhi
2	<i>Alcaligenes</i>	<i>Alcaligenaceae</i>	A
3	<i>Bacillus</i>	<i>Bacillaceae</i>	B
4	<i>Chryseobacterium</i>	<i>Flavobacteriaceae</i>	F
5	<i>Desulfobacter</i>	<i>Desulfobacteraceae</i>	D
6	<i>Enterobacter</i>	Enterobacterias	E
7	<i>Flavobacterium</i>	<i>Flavobacteriaceae</i>	F
8	<i>Lysinibacillus</i>	<i>Bacillaceae</i>	B
9	<i>Methylobacterium</i>	<i>Methylobacteriaceae</i>	M
10	<i>Pseudomonas</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	P
11	<i>Rhizobium</i>	<i>Rhizobiaceae</i>	Rhi
12	<i>Staphylococcus</i>	<i>Staphylococcaceae</i>	Sta

13	<i>Serratia</i>	<i>Enterobacterias</i>	E
14	<i>Sphingomonas</i>	<i>Sphingomonadaceae</i>	Sp
15	<i>Stenotrophomonas</i>	<i>Xanthomonadaceae</i>	X
16	<i>Streptomyces</i>	<i>Streptomycetaceae</i>	Str
17	<i>Thermus</i>	<i>Thermaceae</i>	T
18	<i>Zoogloea</i>	<i>Rhodocyclaceae</i>	Rho
Hongos			
1	<i>Acremonium</i>	<i>Hypocreaceae</i>	H
2	<i>Alternaria</i>	<i>Pleosporaceae</i>	Pl
3	<i>Aspergillus</i>	<i>Trichocomaceae</i>	Tr
4	<i>Fusarium</i>	<i>Nectriaceae</i>	N
5	<i>Laccaria</i>	<i>Hydnangiaceae</i>	Hyd
6	<i>Lactarius</i>	<i>Russulaceae</i>	R
7	<i>Mucor</i>	<i>Mucoraceae</i>	Mu
8	<i>Nodulisporium</i>	<i>Magnaporthaceae</i>	Ma
9	<i>Penicillium</i>	<i>Trichocomaceae</i>	Tr
10	<i>Rhizopus</i>	<i>Mucoraceae</i>	Mu
11	<i>Saccharomyces</i>	<i>Saccharomycetaceae</i>	Sa
12	<i>Seimatosporium</i>	<i>Discosiaceae</i>	D
13	<i>Streptoverticillum</i>	<i>Streptomycetaceae</i>	St
14	<i>Talaromyces</i>	<i>Trichocomaceae</i>	Tr
15	<i>Trichoderma</i>	<i>Hypocreaceae</i>	H
16	<i>Umbelopsis</i>	<i>Umbelopsidaceae</i>	U
Microalgas			
1	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	<i>Chlamydomonadaceae</i>	Ch
2	<i>Phormidium</i>	<i>Phormidiaceae</i>	Ph

Fuente: elaboración propia.

Parámetros en mg/kg PS ⁽²⁾	Usos del Suelo ⁽³⁾			Métodos de ensayo ^{(1) y (8)}
	Suelo Agrícola ⁽²⁾	Suelo Residencial/ Parques ⁽⁶⁾	Suelo Comercial ⁽²⁾ / Industrial/ Extractivo ⁽⁶⁾	
ORGÁNICOS				
Hidrocarburos aromáticos volátiles				
Benceno	0,03	0,03	0,03	EPA 8260 ⁽⁸⁾ EPA 8021
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos ⁽¹⁰⁾	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
Hidrocarburos poliaromáticos				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
Hidrocarburos de Petróleo				
Fracción de hidrocarburos F1 ⁽¹¹⁾ (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 ⁽¹²⁾ (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 ⁽¹³⁾ (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
Compuestos Organoclorados				
Bifenilos polidlorados - PCB ⁽¹⁴⁾	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetradoroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260
INORGÁNICOS				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total ⁽¹⁵⁾	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN 15192 ⁽¹⁶⁾
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015

Figura5. Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo

Tabla 13. Utilización de géneros de bacterias en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados.

Nº	Nombre artículo	Tipo de microorganismos	Código de géneros de microorganismos														Remoción metal pesado evaluado (%)													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni	
1	Flores, Amairani et al.	Bacterias			x	x		x			x		x	x		x						39	41	43	30		35			
2	Rodríguez, Her et al.		x	x							x	x									x		62							
3	Muñoz, Loyer et al.				x			x						x	x									25.2	35.3	82.5	62.7	54.9		75.2
4	Sanjudo, Alexander et al.				x																				80					85
5	Emenike, C et al.				x							x						x					85		62	63				
6	Zhao, Xingqing et al.				x		x		x	x		x				x					x				34.73		9.25	8.99	8.68	
7	Ochoa, Francisco et al.				x					x						x								86				88	88	90
8	Beltrán, Mayra et al.				x			x	x		x		x								x			88	90				90	
9	Cornu, Jean et al.				x																						62			
10	Torres, José et al.																					x		83.1						

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Utilización de géneros de hongos en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados.

Ítem	Nombre artículo	Tipo de microorganismos	Código de géneros de microorganismos															Remoción metal pesado evaluado (%)								
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni
1	Muñoz, Loyer et al.	Hongos			x	x			x		x	x							74.5	37.5	75.3	59.4	70.9		57.7	
2	Baltazar, Ivett et al.						x	x																62		
3	Emenike, C et al.				x							x		x					85		70	74				
4	Mohammadian, Elham et al.			x	x					x		x								73		48	67	54		
5	Ochoa, Francisco et al.				x	x			x	x	x	x								88				90	65	34
6	Cadavid, Edith et al.						x	x												83	62	36	40	73	42	51
7	Beltrán, Mayra et al.				x							x								87	52				74	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Utilización de géneros de microalgas en las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados.

Ítem	Nombre artículo	Tipo de Microorganismos	Géneros de Microorganismos		Remoción metal pesado evaluado (%)							
					As	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	Ni
1	Zhao, Xingqing et al.	Microalgas	x			45.7			23.8	16.9	25.2	
2	Beltrán, Mayra et al.				x	25.6	31.2					22.5

Fuente: elaboración propia.

Glosario

Atenuación natural (o atenuación intrínseca). Es la biorremediación sin intromisión antrópica y de amplio periodo de ejecución. Que emplea procesos microbianos y fisicoquímicos que descomponen sustancias contaminantes (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Barrera Reactiva Permeable (PRB): Técnica que utiliza una semi-permanente o permanente barrera reactiva, la cual su principal componente es hierro cero-valente. Esta es utilizada para eliminar componentes clorados de agua y metales pesados (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Biodegradación In situ. Es la inyección de nutrientes y oxígeno por medio de la circulación de disoluciones acuosas en áreas contaminadas con el proposito de incitar el crecimiento y la actividad microbiana. Es utilizada para el tratamiento de aguas subterráneas y suelos (Vidali, 2015).

Biopile: Acopio de muestra de suelo excavado contaminado en la superficie, donde se emplea en diferentes ocasiones adición, irrigación y aeración de nutrientes con la finalidad de impulsar la actividad microbiana. Este método puede apoyar a restringir la evaporación de contaminantes de poco peso molecular (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Biorreactores. Se trata de la transformación del elemento (superficie contaminada) a sustancias poco peligrosas por medio de una variedad de procesos monitoreados en un depósito y biológicamente controlados, pueden ser los siguientes: de multietapa, continuo, estacionario y semi estacionario. Su optimización y el control de parámetros consienten en una adecuada biorremediación (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Bioslurping. Es la generación y combinación de extracción de vapores, vacío y bioventing, así conseguir incitar la biodegradación de sustancias nocivas en aguas subterráneas y suelos, debido al abastecimiento indirecto de oxígeno. Esta técnica es defectuosa si superficie contaminada tiene poca filtración

(Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Biosparging. Introducción de nutrientes y oxígeno en superficies impregnadas con el objetivo de avivar el desarrollo y la actividad microbiana. Este proceso se emplea para la remoción de compuestos orgánicos en el suelo y se ve suscitada por la presencia de elementos orgánicos sutiles en áreas no impregnadas (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Bioventing. Introducción de nutrientes y oxígeno en áreas no impregnadas por medio de pozas con el objetivo de incentivar la actividad microbiana. Este método tiene buena notoriedad en la rehabilitación de superficies contaminadas con metales pesados (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Compostaje. Es la mezcla de suelo residuos orgánicos o compost con suelos contaminados. La existencia de estos componentes orgánicos aviva el progreso de la actividad microbiana y por ende de la eliminación de elementos nocivos (Vidali, 2015).

Compostaje por hileras (Windrows). Sustracción repetida de suelo contaminado acumulado y mezclado con agua que desarrolla la actividad microbiana, la colocación de nutrientes en el suelo y la aireación. Así se logra apresurar la biorremediación. Este proceso no es confiable si la superficie esta degradada con sustancias volátiles nocivas (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).

Land farming. Método que reside en expandir la superficie contaminada en un lecho que será labrado habitualmente; con el fin de incitar la remoción aeróbica de los elementos contaminantes y el desarrollo microbiano. Este proceso es el más fácil, de bajo costo y demanda de la utilización de escaso equipo operativo. (Okpokwasili, Azubuike y Chikere, 2016).



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, ASUNCION RODRIGUEZ KATHERINE THALIA, RONDO LOPEZ YANELA LISBETH estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: ""Efectividad de las técnicas de Biorremediación de suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos"", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
RONDO LOPEZ YANELA LISBETH DNI: 73052973 ORCID 0000-0002-8177-7705	Firmado digitalmente por: YRONDO el 13-12-2021 22:38:47
ASUNCION RODRIGUEZ KATHERINE THALIA DNI: 72840768 ORCID 0000-0002-3767-6229	Firmado digitalmente por: KASUNCION el 13-12-2021 22:06:58

Código documento Trilce: INV - 0567976