

# UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Perfil de proyecto de investigación: Remediación de suelos  
contaminados por metales pesados con fitorremediación y biochar**

Por:

Lucero de Libertad Cosi Cutipa

Asesor:

Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

**Juliaca, junio de 2025**

## **1. Planteamiento del Problema**

### **1.1 Problema**

En la Rio Tambopata se encuentra actualmente seco, debido al problema principal la creciente contaminación de los suelos por metales pesados, un problema común en áreas afectadas por actividades industriales, agrícolas y mineras. Los metales pesados, como el plomo, cadmio, y arsénico, son tóxicos y persistentes, lo que significa que permanecen en el suelo durante mucho tiempo y pueden contaminar las cadenas alimentarias, lo que también genera graves enfermedades para la salud humana entre ellas (cardiovasculares, respiratorias, neurológicas, renales y cáncer), también genera problemas a la fauna ya que contaminan la cadena alimentaria y también provoca la muerte de los animales y a la flora ya que algunos suelos se vuelven infértil.

### **1.2 Justificación**

La remediación de suelos contaminados por metales pesados se ha convertido en una necesidad urgente debido al impacto negativo que estos elementos tienen sobre la salud humana, el ambiente y la productividad agrícola (Alloway, 2013). La presencia de metales como plomo, cadmio, mercurio y arsénico en el suelo es consecuencia directa del crecimiento urbano desordenado, la actividad industrial y prácticas agrícolas intensivas (Kabata-Pendias, 2011). Estos contaminantes son altamente tóxicos y persistentes, generando riesgos significativos como enfermedades cardiovasculares, neurológicas, respiratorias, renales e incluso cáncer, así como afectaciones a la fauna, flora y cadena alimentaria (Tchounwou et al., 2012).

Desde un enfoque práctico, esta investigación se justifica por su carácter aplicado, ya que propone el uso de técnicas sostenibles y de bajo costo como la fitorremediación y el biochar. Estas tecnologías representan una alternativa ambientalmente responsable frente a los métodos tradicionales, como la excavación o el uso de productos químicos, los cuales suelen ser costosos e invasivos (Beesley et al., 2011; Ali et al., 2013). La aplicación de estas técnicas permite reducir la

concentración de metales pesados en el suelo, restaurar su fertilidad y mitigar los impactos ambientales a largo plazo (Tang et al., 2013).

Además, los beneficios de esta investigación se extienden a diversos sectores. Los agricultores y productores podrán recuperar terrenos degradados, mejorando así el rendimiento de sus cultivos y contribuyendo a la seguridad alimentaria. Las comunidades expuestas a suelos contaminados verán reducidos los riesgos para la salud pública. Asimismo, la comunidad científica y académica podrá utilizar los hallazgos de este estudio como base para futuras investigaciones en contextos similares (Ghosh & Singh, 2005).

## **1.2 Estado del Arte**

Los suelos contaminados con metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) representan una problemática ambiental crítica, especialmente en zonas expuestas a actividades mineras, uso excesivo de fertilizantes o acumulación de residuos sólidos urbanos. Estos metales son altamente tóxicos, persistentes y no biodegradables, lo que representa un riesgo tanto para la salud humana como para los ecosistemas (Jaishankar et al., 2017).

Los metales pesados son elementos metálicos con una alta densidad (mayor a  $5 \text{ g/cm}^3$ ) y con una toxicidad significativa para los seres vivos, incluso en bajas concentraciones. Muchos de ellos no tienen una función biológica conocida, y su acumulación en el organismo o en el ambiente puede causar graves efectos adversos (Jaishankar et al., 2017).

En el suelo, los metales pesados pueden provenir de: Actividades industriales o mineras, Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, o Combustión de combustibles fósiles y Residuos urbanos o aguas residuales mal manejadas.

**El plomo** es un metal pesado altamente tóxico que ha sido utilizado históricamente en productos como pinturas, baterías, tuberías y combustibles. En la actualidad, sus principales fuentes de

contaminación ambiental incluyen emisiones industriales, gases vehiculares, residuos de construcciones antiguas y relaves mineros. Este metal representa un riesgo significativo para la salud humana, especialmente en niños, ya que afecta el sistema nervioso central, provocando retraso en el desarrollo mental, trastornos de aprendizaje, déficit de atención, y alteraciones en el comportamiento. También puede causar anemia, hipertensión y daño renal en adultos (Tchounwou et al., 2019).

**El cadmio** es un subproducto de la minería del zinc y se encuentra presente en diversas aplicaciones industriales, como baterías recargables, pigmentos, plásticos y fertilizantes fosfatados. Su liberación al ambiente se produce principalmente por emisiones industriales y la acumulación en suelos agrícolas debido al uso excesivo de fertilizantes contaminados. Este metal tiene una alta capacidad de acumulación en los tejidos vivos y puede provocar graves efectos a largo plazo en la salud humana, como daño renal, desmineralización ósea (osteoporosis) y ha sido clasificado como carcinógeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (Järup & Akesson, 2020).

**El arsénico** es un metaloide que puede encontrarse de forma natural en ciertos tipos de suelo y aguas subterráneas, aunque también puede ser liberado por actividades antropogénicas como la minería, la fundición de minerales y la combustión de carbón. La exposición prolongada al arsénico, especialmente a través del agua potable contaminada, puede provocar una serie de enfermedades crónicas, como lesiones en la piel, trastornos cardiovasculares y diversos tipos de cáncer, incluyendo cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón (Ghosh et al., 2018).

La fitorremediación es una tecnología ambiental que utiliza el poder natural de ciertas plantas para limpiar suelos contaminados. Estas especies vegetales absorben, transforman o inmovilizan metales pesados en sus tejidos o en la rizósfera (zona de raíces). Es una técnica económica, ecológica y aplicable en áreas extensas (Rascio & Navari-Izzo, 2017).

En el caso de suelos con Pb, Cd o As, se emplean plantas como *Brassica juncea* (mostaza india), y *Helianthus annuus* (girasol), que han demostrado buena capacidad de acumulación o estabilización de estos metales.

Existen distintas estrategias de fitorremediación que permiten tratar suelos y aguas contaminadas por metales pesados de manera sostenible. La fitoextracción se basa en la capacidad de ciertas plantas para absorber y acumular metales en sus tejidos, facilitando su posterior remoción (Ali et al., 2018). La fitostabilización busca reducir la movilidad y disponibilidad de estos metales en el suelo, evitando su dispersión y contaminación de fuentes hídricas (Chen et al., 2019). Por otro lado, la rizofiltración consiste en la absorción o adsorción de contaminantes presentes en el agua a través de las raíces, contribuyendo a la descontaminación de cuerpos acuáticos (Singh et al., 2020).

El biochar, producido mediante pirólisis de residuos orgánicos bajo condiciones de bajo oxígeno, ha demostrado ser una enmienda eficaz para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. Su estructura porosa, alta superficie específica y abundancia de grupos funcionales (como carboxilos e hidroxilos) le permiten adsorber e inmovilizar metales como Pb, Cd y As, disminuyendo su movilidad y toxicidad en el ambiente (Tang et al., 2020; Younis et al., 2023).

Además de estabilizar contaminantes, el biochar mejora la fertilidad del suelo, incrementa la retención de humedad y nutrientes, y promueve la actividad microbiana beneficiosa (Ahmad et al., 2022). Cuando se aplica junto con fitorremediación, potencia el crecimiento de las plantas hiperacumuladoras, mejorando la absorción o estabilización de metales pesados (Liu et al., 2018; Lu et al., 2022). Esta sinergia reduce el estrés oxidativo en las plantas y mejora el rendimiento general del proceso de remediación.

Por otro lado, su producción a partir de residuos agrícolas o forestales contribuye a una gestión sostenible de los desechos y fomenta prácticas de economía circular, haciendo del biochar una

herramienta ecológica y económicamente viable para zonas afectadas por la minería o actividades industriales (Khan et al., 2021; Mohan et al., 2020).

### **1.3 Objetivos**

#### Objetivo General

- Evaluar la efectividad de la fitorremediación y el uso de biochar en la remediación de suelos contaminados por metales pesados (plomo, cadmio y arsénico ), con el fin de proponer una alternativa sostenible para la recuperación ambiental.

#### Objetivos Específicos

- Identificar los principales metales pesados presentes en suelos contaminados de una zona determinada a través de un análisis químico de absorción.
- Analizar mediante métodos estándares de laboratorio como conductímetro las propiedades fisicoquímicas (pH, la conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica, la textura del suelo, la disponibilidad de nutrientes (N, P, K) del suelo) antes y después del tratamiento con fitorremediación y biochar.
- Evaluar el crecimiento y la capacidad de absorción de metales pesados (As,Pb,Cd) mediante el uso de mostaza india (*Brassica juncea*), girasol (*Helianthus annuus*) utilizadas en fitorremediación, mediante mediciones biométricas y análisis de metales en tejidos por análisis química de absorción atómica.
- Determinar la eficacia del biochar como enmienda para mejorar la retención y estabilización de metales en el suelo.

### **1.4 Hipótesis**

El uso combinado de fitorremediación con especies vegetales como *Helianthus annuus* (girasol) y *Brassica juncea* (mostaza india), junto con la aplicación de biochar como enmienda del suelo,

permite reducir significativamente la concentración de metales pesados (plomo, cadmio y arsénico) en suelos contaminados, mejorar sus propiedades y reducir el riesgo ambiental. Según el estudio de Rascio y Navari-Izzo (2017), se confirma la efectividad de *Brassica juncea* y *Helianthus annuus* como especies con alta capacidad para acumular metales pesados en sus tejidos. Asimismo, Tang et al. (2020) demostraron que el biochar es eficaz para inmovilizar metales como Pb, Cd y As, mejorando la calidad del suelo y disminuyendo su toxicidad.

### **1.5 Variables**

#### **Variable independiente:**

- Presencia de metales pesados (Cd, As, Pb) en el suelo.
- Actividades industriales, agrícolas y mineras contaminantes.

#### **Variable dependiente:**

- Degradación del suelo y pérdida de fertilidad
- Contaminación de cultivos y cadenas alimentaria
- Afectaciones a la salud humana y pérdida de biodiversidad

## **2. Metodología**

### **2.1 Diseño Metodológico**

La investigación se desarrollará bajo un diseño longitudinal de tipo panel, que permitirá evaluar la capacidad de remoción de metales pesados mediante el uso de mostaza india (*Brassica juncea*), girasol (*Helianthus annuus*) y biochar, a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones experimentales en la cuenca del río Tambopata. Este enfoque facilitará el monitoreo continuo de la concentración de metales pesados y su evolución, considerando variables ambientales clave.

Estudios previos han aplicado diseños similares para analizar la efectividad de estas especies y enmiendas. Por ejemplo, Kumar y Singh (2021) evaluaron la remoción de metales con *Brassica juncea* en un seguimiento prolongado; Zhang y Wang (2020) destacaron el rol del girasol en la reducción de contaminantes bajo distintas condiciones ambientales; y Almeida y Costa (2020) analizaron la eficiencia

del biochar como enmienda en procesos de fitorremediación. Estas investigaciones respaldan la utilidad del diseño longitudinal para comprender mejor la dinámica temporal de los procesos de descontaminación.

## **2.2 Diseño muestral**

Para esta investigación, la población inicial es los suelos contaminados de la cuenca del río Tambopata, una zona afectada por actividades mineras informales. La muestra estará conformada por cuatro unidades experimentales de suelo recolectadas de un punto representativo, seleccionadas mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando criterios geográficos, antecedentes de contaminación, accesibilidad y seguridad, tal como recomiendan Cruz y Martínez (2021). Estas muestras se dividirán para aplicar distintos tratamientos: (1) control sin intervención, (2) mostaza india (*Brassica juncea*), (3) girasol (*Helianthus annuus*), y (4) tratamiento combinado con biochar.

Cada unidad experimental será monitoreada en intervalos de 15, 30 y 40 días, permitiendo evaluar la evolución temporal de la remoción de metales pesados, siguiendo un diseño longitudinal de tipo panel. La unidad de análisis será cada muestra de suelo tratada, y las variables observadas serán la concentración de metales pesados y los cambios físico-químicos del suelo. Los criterios de inclusión consideran suelos con niveles comprobados de contaminación por metales pesados, características físico-químicas homogéneas y accesibilidad para su recolección y transporte. Por otro lado, se excluirán suelos con predominancia de contaminantes orgánicos, sin antecedentes claros de impacto minero o con condiciones que dificulten su manipulación.

Este diseño experimental estratégico y periódico, respaldado por estudios como los de Mishra y Singh (2022) y Almeida y Costa (2022), permitirá evaluar de forma robusta la efectividad de la fitorremediación con especies vegetales y biochar en condiciones controladas

## **2.3 Técnicas de Recolección de Datos**

## **Muestreo de suelo**

Se recolectarán tres muestras compuestas de suelo en un punto representativo de la cuenca del río Tambopata, identificado por su elevada carga de metales pesados debido a la actividad minera informal. Cada muestra se obtendrá mezclando cinco submuestras tomadas al azar dentro de un área definida, a una profundidad de 0 a 20 cm. Se utilizarán herramientas limpias y recipientes adecuados para evitar la contaminación cruzada. Las muestras serán etiquetadas correctamente, almacenadas a temperatura ambiente y transportadas al laboratorio para su tratamiento y análisis inmediato.

## **Tratamientos experimentales**

Las muestras de suelo serán divididas y sometidas a cuatro tratamientos experimentales bajo condiciones controladas de laboratorio:

- Control (sin intervención)
- Mostaza india (*Brassica juncea*)
- Girasol (*Helianthus annuus*)
- Biochar + planta (combinado con mostaza o girasol, según tratamiento paralelo)

Los tratamientos se mantendrán durante 15, 30 y 40 días, permitiendo evaluar la eficacia de cada intervención en la remoción de metales pesados.

## **Mediciones periódicas**

Al finalizar cada periodo experimental, se evaluarán los siguientes parámetros en cada muestra:

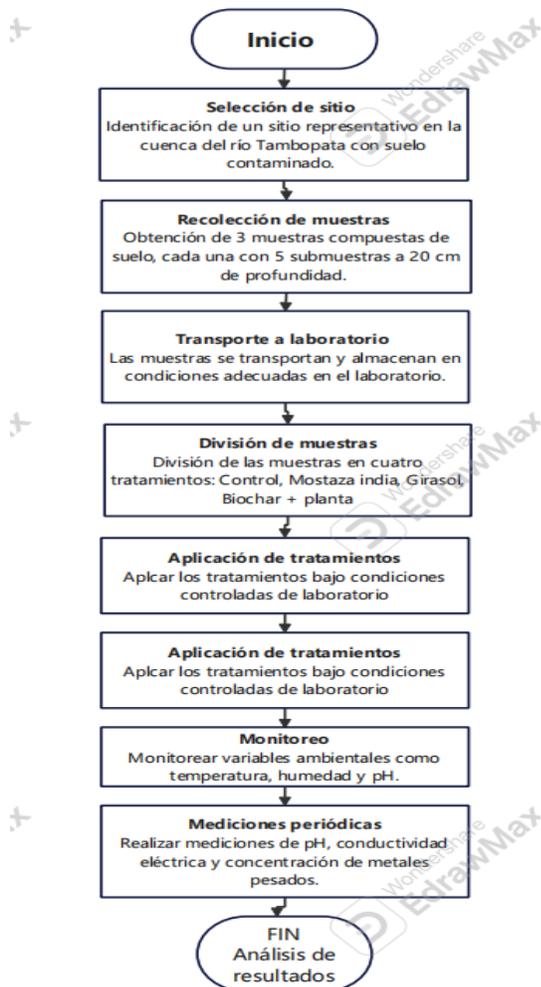
- pH del suelo: Para monitorear condiciones ácido-básicas.
- Conductividad eléctrica: Indicador de sales solubles presentes.
- Contenido de humedad: Controlado para condiciones óptimas de crecimiento vegetal.
- Concentración de metales pesados (arsénico, cadmio, plomo): Determinada mediante AAS o ICP-MS, como indicador principal de eficacia del tratamiento.
- Biomasa vegetal acumulada: Para estimar la capacidad de absorción de cada especie.

**Control de variables ambientales** :Para garantizar la validez de los resultados, se mantendrán constantes las siguientes variables:

- Temperatura: Controlada mediante cámaras ambientales.
- Humedad del suelo: Regulada durante todo el experimento.
- Exposición lumínica: Ajustada con luz artificial o natural controlada.
- pH inicial del suelo: Homogeneizado previo al inicio del tratamiento.

Este diseño experimental controlado permitirá determinar con precisión la capacidad de remoción de metales pesados de la mostaza india, el girasol y el biochar en suelos contaminados del río Tambopata.

Figura 1 . Flujo diagrama de metodología



## **2.4 Técnicas Estadísticas para el Procesamiento de la Información**

### **Análisis de datos**

Para el tratamiento estadístico de los datos obtenidos en la investigación, se aplicarán diversas técnicas que permitan describir, comparar y explicar las variaciones observadas en las concentraciones de metales pesados y otros parámetros relevantes. El análisis incluirá los siguientes procedimientos:

#### **1. Estadística descriptiva**

Se calcularán medidas de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (desviación estándar y rango intercuartílico) para cada tratamiento y periodo experimental. Asimismo, se realizarán análisis de frecuencias con el objetivo de caracterizar la distribución básica de los datos y obtener un panorama general de las condiciones del suelo y la variabilidad en la concentración de metales pesados.

#### **2. Pruebas de normalidad**

Para determinar si los datos se ajustan a una distribución normal, se aplicarán las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. Este paso es fundamental para definir el tipo de análisis inferencial adecuado, ya que la elección entre pruebas paramétricas o no paramétricas depende de los supuestos de normalidad de los datos.

#### **3. Análisis de varianza (ANOVA)**

Se utilizará ANOVA de un factor o ANOVA de medidas repetidas, según corresponda, para comparar la eficacia de los tratamientos (mostaza india, girasol, biochar y control) en la remoción de metales pesados, así como la influencia del tiempo (15, 30 y 40 días). En caso de encontrarse diferencias estadísticamente significativas, se aplicarán pruebas post-hoc (como Tukey o Bonferroni) para identificar entre qué grupos se presentan dichas diferencias.

#### **4. Análisis de correlación**

Se evaluará la relación entre variables ambientales (pH, humedad, conductividad, etc.) y la concentración de metales pesados. Según la distribución de los datos, se aplicará el coeficiente de





Chen, X., Lu, L., Shao, H., Yang, X., & Li, Y. (2019). Fitostabilización de metales pesados en suelos contaminados: mecanismos y aplicaciones prácticas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 47(3), 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.017>

Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1-18. [https://doi.org/10.15666/aeer/0301\\_001018](https://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018)

Ghosh, P., Singh, S. P., & Singh, R. P. (2018). Environmental arsenic contamination: mechanisms of toxicity and strategies for phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 159, 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.029>

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2017). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72. <https://doi.org/10.1515/intox-2017-0009>

Järup, L., & Åkesson, A. (2020). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2020.114996>

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y., Huang, Y., & Zhu, Y. G. (2021). Effects of biochar amendments on heavy metal mobility and plant uptake in contaminated soils: a review. *Environmental Pollution*, 278, 116939. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116939>

Liu, X., Chen, Y., Sun, Y., Chen, J., & Chen, Z. (2018). Combined application of biochar and plants for remediation of contaminated soil: A review. *Ecological Engineering*, 120, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.009>

Lu, K., Liu, Z., Zhang, L., & Li, X. (2022). Biochar amendments enhance phytoremediation efficiency of heavy metal contaminated soils: mechanisms and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128307. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128307>

Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2020). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.01.052>

Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2017). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 160(2), 105-125. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00380-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00380-0)

Singh, J., Sharma, R., & Kumar, V. (2020). Rizofiltración: un método sostenible para la descontaminación de agua contaminada por metales pesados. *Journal of Environmental Management*, 264, 110461. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110461>

Tang, J., Zhu, W., & Cai, W. (2013). Biochar reduces the bioavailability of cadmium and zinc in a contaminated paddy soil. *Environmental Pollution*, 178, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.005>

Tang, J., Zhu, W., & Cai, W. (2020). Mechanisms of heavy metal immobilization by biochar: Insight from molecular-level characterization. *Environmental Science & Technology*, 54(18), 11268-11279. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03234>

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, 101, 133-164. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)

Tchounwou, P. B., Ogunseitan, O. A., & Saikia, B. (2019). Toxicological effects of lead exposure in humans. *Journal of Environmental Health*, 81(6), 8-17.

Zhang, X., & Wang, J. (2020). The role of *Helianthus annuus* in remediation of heavy metal contaminated soils: a review. *Environmental Reviews*, 28(3), 311-320. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0018>