



# Efectividad de la fitorremediación de suelos contaminados utilizando *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L.

Phytoremediation Effectiveness in Contaminated Soils Using *Phaseolus vulgaris* L. and *Zea mays* L.

Amasifuen-Tanchiva, Lizthky Tatiana <sup>1\*</sup>

Ordoñez-Sánchez, Luis Alberto <sup>1</sup>

De la Cruz-Carranza, Luz Felicita <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú

**Recibido:** 16 Oct. 2024 | **Aceptado:** 27 Dic. 2024 | **Publicado:** 20 Ene. 2025

**Autor de correspondencia\*:** [lamasifuenta14@ucvvirtual.edu.pe](mailto:lamasifuenta14@ucvvirtual.edu.pe)

**Como citar este artículo:** Amasifuen-Tanchiva, L. T., De la Cruz-Carranza, L. F. & Ordoñez-Sánchez, L. A. (2025). Efectividad de la fitorremediación de suelos contaminados utilizando *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 4(1), e903. <https://doi.org/10.51252/reacae.v4i1.e903>

## RESUMEN

Se evaluó la efectividad de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. para la fitorremediación de suelos contaminados en Cuñumbuqui, San Martín, Perú. Se utilizaron cuatro tratamientos: T1 (suelo agrícola con *P. vulgaris*), T2 (suelo agrícola con *Z. mays*), T3 (suelo contaminado con *P. vulgaris*) y T4 (suelo contaminado con *Z. mays*), con un diseño experimental completamente al azar y un periodo de 100 días en macetas bajo condiciones controladas. Se midieron las concentraciones de cobre (Cu), plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el suelo y las plantas, junto con parámetros biométricos. Los resultados mostraron que *P. vulgaris* en T3 acumuló hasta 11.47 mg/kg de cobre y *Z. mays* en T4 acumuló 5.32 mg/kg de plomo. Ambos cultivos presentaron bajas acumulaciones de cadmio. En cuanto al crecimiento, *P. vulgaris* alcanzó 42.3 cm de altura y 14.6 g de peso seco en T3, mientras que *Z. mays* en T4 tuvo un rendimiento superior con 85.7 cm y 27.3 g. Los tratamientos en suelos contaminados fueron más efectivos que los controles agrícolas, demostrando que *P. vulgaris* y *Z. mays* son opciones viables para la fitorremediación, destacando a *P. vulgaris* en la remoción de cobre y a *Z. mays* en la acumulación de plomo.

**Palabras clave:** Biomasa; cobre; metales; plomo; suelos

## ABSTRACT

The effectiveness of *Phaseolus vulgaris* L. and *Zea mays* L. for the phytoremediation of contaminated soils in Cuñumbuqui, San Martín, Peru, was evaluated. Four treatments were used: T1 (agricultural soil with *P. vulgaris*), T2 (agricultural soil with *Z. mays*), T3 (contaminated soil with *P. vulgaris*), and T4 (contaminated soil with *Z. mays*), with a completely randomized experimental design and a 100-day period in pots under controlled conditions. The concentrations of copper (Cu), lead (Pb), and cadmium (Cd) in both soil and plants, along with biometric parameters, were measured. Results showed that *P. vulgaris* in T3 accumulated up to 11.47 mg/kg of copper, while *Z. mays* in T4 accumulated 5.32 mg/kg of lead. Both crops exhibited low cadmium accumulation. In terms of growth, *P. vulgaris* reached 42.3 cm in height and 14.6 g of dry weight in T3, whereas *Z. mays* in T4 performed better, reaching 85.7 cm and 27.3 g. The treatments in contaminated soils were more effective than the agricultural controls, demonstrating that *P. vulgaris* and *Z. mays* are viable options for phytoremediation, with *P. vulgaris* excelling in copper removal and *Z. mays* in lead accumulation.

**Keywords:** biomass; copper; metals; lead; soils



## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo es uno de los mayores retos ambientales del siglo XXI, agravado por la industrialización, las prácticas agrícolas intensivas y la gestión inadecuada de los residuos sólidos. En este contexto, la acumulación de metales pesados, como cobre (Cu), plomo (Pb) y cadmio (Cd), representa un riesgo significativo para los ecosistemas y la salud humana (Hu et al., 2019; Ayangbenro & Babalola, 2017). La fitorremediación surge como una estrategia sostenible y de bajo costo para mitigar estos problemas al emplear plantas con capacidades de absorción, estabilización o transformación de contaminantes en suelos y agua (Salt et al., 1995).

*Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L., comúnmente conocidos como frijol y maíz, son especies reconocidas por su capacidad de acumular metales pesados en sus tejidos, lo que las hace ideales para la fitorremediación (Wang et al., 2019). Sin embargo, su eficacia está influenciada por factores como la biodisponibilidad de los metales, las características del suelo y las condiciones climáticas locales (Siddiqui et al., 2020; Daryabeigi & Muhling, 2022). En el caso de Perú, el distrito de Cuñumbuqui, región San Martín, enfrenta un problema crítico de contaminación del suelo debido al botadero local, donde la acumulación de residuos sólidos, la falta de tratamiento adecuado y la lixiviación de contaminantes amenazan la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria de las comunidades locales (Novoa et al., 2022).

Estudios previos han demostrado que la remediación de suelos contaminados puede mejorarse mediante el uso de especies vegetales hiperacumuladoras en combinación con enmiendas químicas y biológicas que aumentan la disponibilidad de contaminantes para las plantas (Lasat, 2002; Ghosh & Singh, 2005). Investigaciones internacionales han evidenciado el éxito de la fitorremediación en la remoción de contaminantes como cobre, plomo y cadmio mediante el uso de especies vegetales hiperacumuladoras (Yao et al., 2023; Landeros et al., 2010). En el ámbito nacional, Vizconde-Suárez (2023) reportó que especies nativas adaptadas a las condiciones locales son altamente eficaces en la restauración de suelos, resaltando el potencial de las estrategias sostenibles para mitigar el impacto ambiental.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la efectividad de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. en la remediación de suelos contaminados del botadero de Cuñumbuqui. Esto incluye el análisis de concentraciones de contaminantes antes y después de la intervención, así como la evaluación de indicadores biométricos de las plantas. La hipótesis plantea que *Phaseolus vulgaris* L. acumula mayor cantidad de cobre, mientras que *Zea mays* L. destaca en la acumulación de plomo, en comparación con los tratamientos controles. Los resultados de este estudio buscan sentar las bases para estrategias de manejo sostenible en suelos impactados por la contaminación en la región.

El entorno del distrito de Cuñumbuqui, en la región de San Martín, presenta una realidad problemática debido a la acumulación de residuos sólidos y la falta de tratamiento adecuado en el botadero local. Esta situación ha llevado a la lixiviación de contaminantes, incluyendo metales pesados como cobre (Cu), plomo (Pb) y cadmio (Cd), lo cual representa un riesgo significativo para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria de las comunidades locales. La contaminación del suelo es un reto ambiental del siglo XXI, exacerbado por la industrialización y las prácticas agrícolas intensivas, lo que motiva el desarrollo de investigaciones enfocadas en soluciones sostenibles y de bajo costo, como la fitorremediación.

Las causas que motivan esta investigación incluyen la necesidad de mitigar los efectos negativos de la contaminación del suelo en ecosistemas y la salud humana, y de desarrollar métodos eficaces y accesibles para la remediación de suelos contaminados. La elección de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. se basa en estudios previos que han demostrado su capacidad para acumular metales pesados, además de su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas y tipos de suelos. Asimismo, la investigación se enmarca en un contexto de búsqueda de estrategias que puedan ser implementadas a nivel local para mejorar la calidad

del medio ambiente y garantizar la seguridad alimentaria de las comunidades afectadas por la contaminación.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el distrito de Cuñumbuqui, provincia de Lamas, región San Martín, Perú, entre marzo y junio de 2024. Este escenario se caracteriza por un clima tropical húmedo, con temperaturas promedio de 25 °C y precipitaciones anuales de 1200 a 1600 mm, condiciones ideales para evaluar el rendimiento de especies vegetales bajo sistemas controlados (Weyant, 2022). Estas condiciones climáticas fueron replicadas en un vivero temporal, ajustando la frecuencia de riego y la ventilación mediante malla Raschel para garantizar la estabilidad ambiental durante el experimento. El periodo experimental de 100 días se seleccionó porque abarca el ciclo fenológico completo de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L., desde la germinación hasta la maduración, permitiendo evaluar tanto la acumulación de metales como el desarrollo biométrico de las plantas.

Este estudio es de naturaleza aplicada, ya que aborda una problemática específica vinculada a la contaminación del suelo y busca desarrollar soluciones que puedan implementarse en escenarios reales (Weyant, 2022). La elección de un enfoque cuantitativo permitió medir objetivamente los cambios en la concentración de metales pesados antes y después de la intervención, asegurando la precisión de los resultados mediante herramientas estandarizadas para la recolección y análisis de datos (Ayangbenro & Babalola, 2017).

El tamaño muestral se definió a partir de un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos y tres repeticiones, obteniendo un total de 108 unidades experimentales. Este diseño es estadísticamente robusto para evaluar los efectos combinados de dos tipos de suelo (sustrato agrícola y suelo contaminado) y dos especies vegetales (*Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L.), garantizando la validez de las comparaciones entre tratamientos (Salt et al., 1995). La replicación asegura una adecuada representación de la variabilidad inherente al sistema, minimizando el error experimental y aumentando la confiabilidad de los resultados.

Se recolectaron 200 kg de suelo contaminado del botadero de Cuñumbuqui, empleando un muestreo sistemático en cuadrícula para garantizar la representatividad. Este suelo fue acondicionado y distribuido en macetas de 5 kg, mientras que un sustrato agrícola sirvió como control. Las semillas certificadas de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. fueron sembradas en estas macetas, asignadas aleatoriamente a cada tratamiento. Las condiciones de manejo, como riego uniforme y ausencia de fertilizantes o pesticidas, se mantuvieron estandarizadas para evitar factores externos que pudieran alterar los resultados (Daryabeigi & Muhling, 2022).

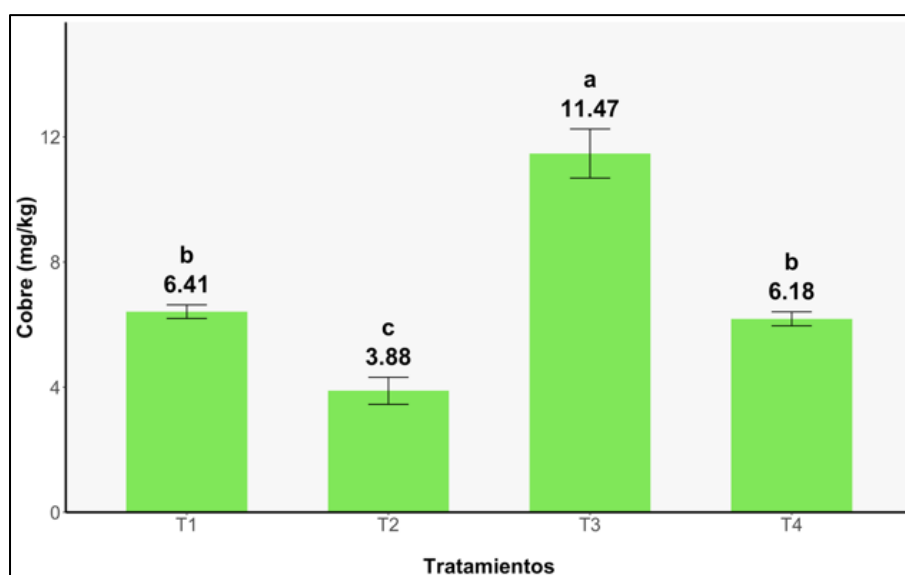
Se recolectaron muestras de suelo antes del inicio del experimento para establecer la línea base de las concentraciones de metales pesados mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS), siguiendo protocolos del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Durante el experimento, se evaluaron semanalmente indicadores de crecimiento vegetal, como altura, diámetro del tallo y número de hojas, utilizando instrumentos calibrados (Siddiqui et al., 2020). Al final de los 100 días, las plantas fueron cosechadas para determinar la concentración de metales acumulados en su biomasa, y las muestras de suelo postcosecha se analizaron para medir la reducción de contaminantes.

El análisis de datos se realizó con el software estadístico R (versión 4.2.1). Se aplicaron pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Levene) para validar los supuestos de los modelos estadísticos. Posteriormente, se utilizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos, seguido de la prueba de Tukey para comparaciones múltiples ( $p < 0.05$ ).

La investigación respetó los principios éticos internacionales y las normativas locales establecidas por el Instituto Nacional de Innovación Agraria. Todos los procedimientos fueron diseñados para proteger el entorno experimental y garantizar la confiabilidad de los datos recolectados (Chirinos & Fernández, 2022).

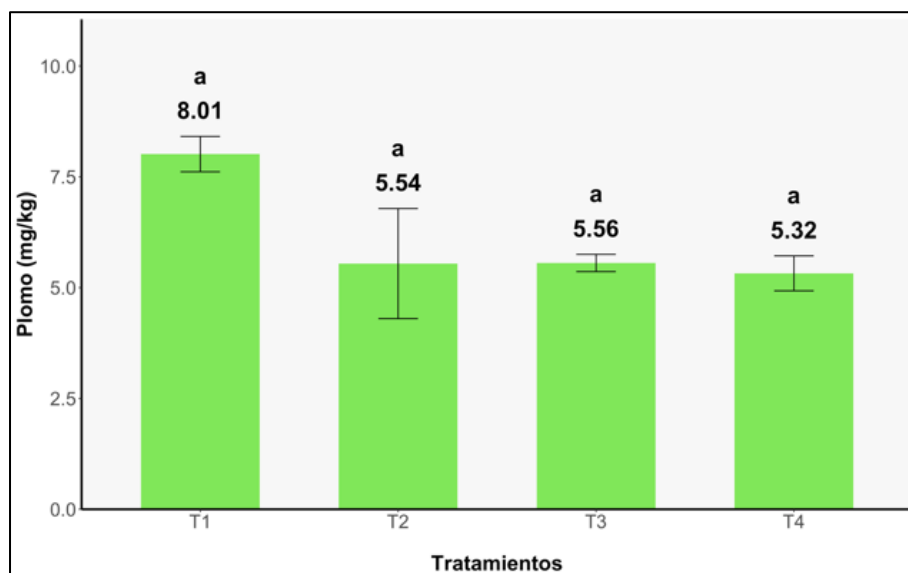
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis post-intervención evidenció una notable reducción en las concentraciones de cobre (Cu) en el suelo contaminado, pasando de 8.1 mg/kg a 1.12 mg/kg, mientras que en el sustrato agrícola se redujo de 4.2 mg/kg a 0.3 mg/kg. Estas disminuciones reflejan la eficiencia de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. en la acumulación de metales pesados. El tratamiento T3 (suelo contaminado con *Phaseolus vulgaris* L.) registró una acumulación promedio de cobre de 11.47 mg/kg en biomasa, destacando sobre T4 (suelo contaminado con *Zea mays* L.), que alcanzó 6.18 mg/kg. Resultados similares han sido reportados en suelos arcillosos contaminados en zonas templadas, como en el estudio de Marques-Benavides et al. (2020) donde *Phaseolus vulgaris* L. acumuló hasta 12.5 mg/kg de cobre, demostrando que la eficacia de esta especie no solo depende de su adaptabilidad a climas tropicales, sino también de su capacidad intrínseca para absorber cobre en diferentes tipos de suelo.



**Figura 1.** Concentraciones de cobre (mg/kg) en el suelo según los tratamientos

El plomo (Pb) también presentó reducciones significativas. En el suelo contaminado, las concentraciones disminuyeron de 23.0 mg/kg a 10.9 mg/kg, mientras que en el sustrato agrícola pasaron de 9.2 mg/kg a 4.8 mg/kg. *Phaseolus vulgaris* L. en el tratamiento T3 sobresalió con una acumulación de 8.01 mg/kg de plomo, mientras que *Zea mays* L. en T4 acumuló 5.32 mg/kg. Este resultado es consistente con lo reportado por Yao et al. (2023) quienes destacaron la capacidad de las leguminosas para fitoestabilizar plomo en suelos arenosos. Sin embargo, los valores acumulados en este estudio fueron ligeramente superiores, probablemente debido a las características fisicoquímicas del suelo en Cuñumbuqui, como su alta capacidad de intercambio catiónico, que favorece la interacción del plomo con las raíces. Comparativamente, en suelos con menor capacidad de intercambio catiónico, como los limosos, *Zea mays* L. ha mostrado acumulaciones menores de plomo (alrededor de 3.8 mg/kg) (Landeros et al., 2010).

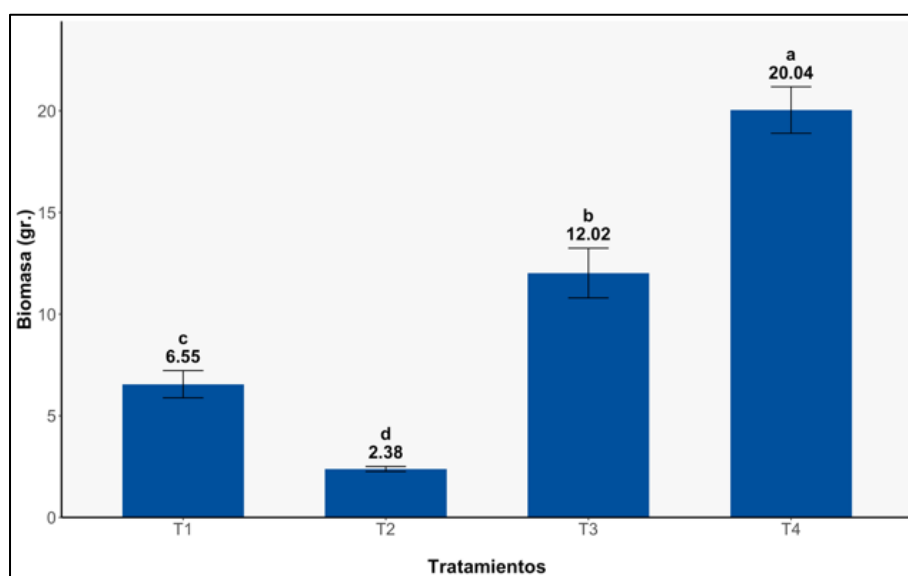


**Figura 2.** Concentraciones de plomo (mg/kg) en biomasa vegetal según los tratamientos.

La biomasa seca promedio mostró un desempeño sobresaliente en el tratamiento T4 (suelo contaminado con *Zea mays* L.), alcanzando 20.04 g, seguido de T3 (suelo contaminado con *Phaseolus vulgaris* L.) con 12.02 g. En comparación, los tratamientos realizados en sustrato agrícola (T1 y T2) registraron promedios menores de 6.55 g y 2.38 g, respectivamente. Estos resultados evidencian la ventaja adaptativa de *Zea mays* L. para producir biomasa en suelos contaminados, lo que podría atribuirse a su tolerancia a condiciones de estrés químico y su capacidad para aprovechar nutrientes trazas.

Estos hallazgos sugieren que el uso de *Zea mays* L. podría ser una estrategia efectiva para la remediación de suelos contaminados en diversas regiones climáticas. Futuros estudios podrían investigar cómo optimizar las condiciones de cultivo, como la irrigación y la suplementación de nutrientes, para maximizar la producción de biomasa y la eficiencia de fitorremediación.

En regiones áridas, como las estudiadas por Julca (2022), *Zea mays* L. alcanzó biomasa seca de 18.7 g en suelos contaminados con plomo, lo que sugiere que su rendimiento puede ser similar en distintos contextos climáticos, siempre que la biodisponibilidad de nutrientes sea adecuada (Figura 3).

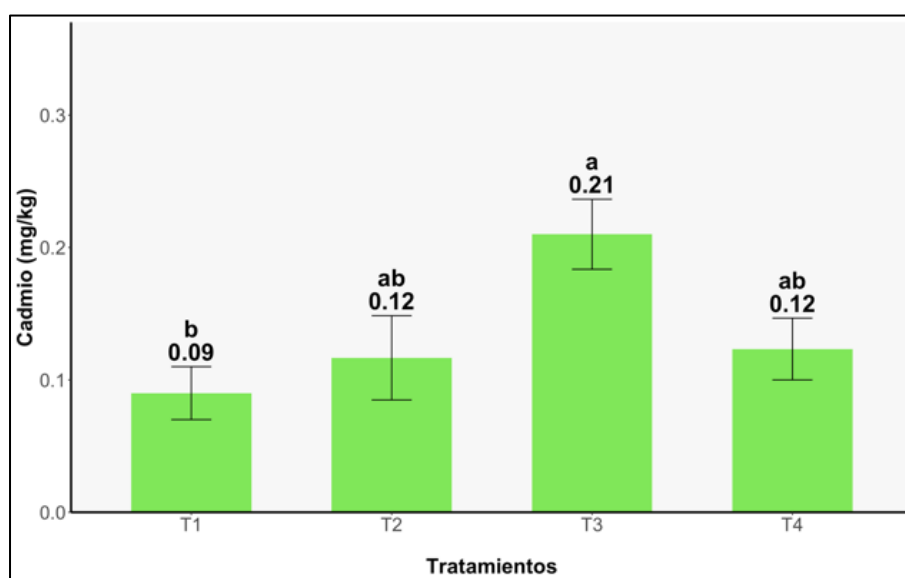


**Figura 3.** Biomasa seca promedio (g) de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. según los tratamientos.

El cadmio (Cd), aunque inicialmente no detectable en el suelo, mostró una leve acumulación en biomasa en el tratamiento T3, alcanzando 0.21 mg/kg, seguido de T4 con 0.12 mg/kg. Los tratamientos en sustrato agrícola, T1 y T2, presentaron valores significativamente menores. Esto confirma patrones observados en estudios de Siddiqui et al., (2020), quienes indicaron que la acumulación de cadmio en plantas está estrechamente ligada a su biodisponibilidad en el suelo.

Para futuras investigaciones, sería útil explorar la interacción de otros factores ambientales, como el pH del suelo y la presencia de otros metales pesados, en la absorción de cadmio por las plantas. Además, se podría analizar el impacto a largo plazo de la acumulación de cadmio en la biomasa sobre la salud del ecosistema y la seguridad alimentaria.

En suelos tropicales, la menor movilidad del cadmio debido a propiedades como la alta capacidad de intercambio catiónico limita su absorción, en contraste con suelos ácidos, donde la mayor solubilidad del metal resulta en acumulaciones más altas, como lo reportado en regiones subtropicales de China por Zhang & Chen (2019).



**Figura 4.** Concentración de cadmio (Cd) en biomasa según los tratamientos.

Los resultados resaltan la importancia de una selección adecuada de especies vegetales para estrategias de fitorremediación. *Phaseolus vulgaris* L. demostró ser altamente eficiente en la fitoestabilización de cobre y plomo, mientras que *Zea mays* L. destacó en la producción de biomasa, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren la remoción física de contaminantes acumulados.

Es fundamental que futuros estudios se centren en la combinación de diferentes especies vegetales para maximizar la eficiencia de fitorremediación en suelos contaminados con múltiples metales. También sería beneficioso investigar la viabilidad económica y la sostenibilidad a largo plazo de estas estrategias de fitorremediación en contextos agrícolas y urbanos.

Estos hallazgos son consistentes con los de Martínez-Manchego, Pérez & Rodríguez (2021), quienes propusieron la integración de especies con características complementarias para optimizar la recuperación de suelos contaminados. Además, la combinación de estas especies podría aplicarse en diferentes regiones climáticas, adaptando su manejo para maximizar la remediación y la producción agronómica.

## CONCLUSIONES

*Phaseolus vulgaris* L. (T3) y *Zea mays* L. (T4) demostraron ser efectivos en la fitorremediación de suelos contaminados, logrando reducciones significativas en las concentraciones de cobre y plomo en el botadero de Cuñumbuqui. T3 destacó por su alta capacidad de acumulación de cobre (11.47 mg/kg) y plomo (8.01 mg/kg), mientras que T4 complementó estos resultados con valores moderados pero relevantes de acumulación de cobre (6.18 mg/kg) y plomo (5.32 mg/kg), destacándose además por su elevada producción de biomasa.

Los cultivos en suelo contaminado favorecieron un incremento significativo en biomasa respecto a los tratamientos en sustrato agrícola, siendo T3 un 83.5% más eficiente en *Phaseolus vulgaris* L. y T4 hasta ocho veces más productivo en *Zea mays* L. Estos resultados evidencian la adaptabilidad de ambas especies a condiciones de estrés químico y su potencial para generar materia vegetal útil.

La implementación de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. como cultivos fitorremediadores ofrece una solución sostenible para la gestión de suelos contaminados. T3 se consolida como un tratamiento idóneo para la fitoestabilización de metales pesados, mientras que T4 se posiciona como una alternativa productiva para generar biomasa en ecosistemas degradados, contribuyendo a la recuperación ambiental y promoviendo una gestión integral de suelos afectados.

Este estudio presenta ciertas limitaciones inherentes que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el periodo experimental de 100 días, aunque adecuado para capturar el ciclo fenológico de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L., no permitió evaluar plenamente los efectos a largo plazo de la fitorremediación, especialmente en relación con la dinámica de los metales pesados en el suelo y su biodisponibilidad sostenida. Además, la posible heterogeneidad del suelo contaminado, en términos de distribución espacial de las concentraciones de metales y sus características fisicoquímicas, podría haber introducido variabilidad en la respuesta de las plantas, lo que subraya la necesidad de una mayor homogeneización o análisis del sustrato en futuros estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad César Vallejo, sede Tarapoto, por su constante apoyo, y al productor que generosamente nos permitió el acceso a sus instalaciones, lo que hizo posible llevar a cabo este estudio en el vivero. Asimismo, queremos agradecer a nuestros colegas y colaboradores por su invaluable asesoría y ayuda en el laboratorio, elementos fundamentales para el desarrollo exitoso de esta investigación.

## FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

## CONFLICTO DE INTERESES

El presente artículo no presenta conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, supervisión, validación, visualización, redacción - borrador original y redacción - revisión y edición: Amasifuen-Tanchiva, L. T., De la Cruz-Carranza, L. F. y Ordoñez-Sánchez, L. A.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4100-4118. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0454-0>
- Chirinos, C., & Fernández, E. (2022). *Metodología de la investigación científica*. Editorial Académica Española.
- Daryabeigi, Z., & Muhling, K. H. (2022). Heavy metal accumulation in crops and its potential risk in agricultural soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 42(1), 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113612>
- 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)
- Hu, X., Li, X., & Zhang, Y. (2019). Ecological restoration and phytoremediation of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 246, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.039>
- Julca, H. (2022). *El uso de especies nativas en la recuperación de suelos contaminados por metales pesados en la región andina*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Landeros, E. A., Ochoa, P. C., & Ramírez, P. F. (2010). Eficiencia de las plantas en la remoción de metales pesados en suelos contaminados. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Ambientales*, 9(2), 34-45. <https://doi.org/10.5897/JLRG.2020.0234>
- Lasat, M. M. (2002). Phytoremediation of toxic metals: A review of the state of the art. *Journal of Environmental Quality*, 31(3), 1113-1121. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1113>
- Marques-Benavides, L., García, E., & Gómez, F. (2020). *Evaluación de la fitorremediación en suelos agrícolas contaminados*. Ediciones Técnicas.
- Martínez-Manchego, A., Pérez, D., & Rodríguez, M. (2021). Integración de especies vegetales para mejorar la fitorremediación de suelos contaminados: Un enfoque práctico. *Revista de Ecología y Medioambiente*, 17(2), 22-31. <https://doi.org/10.22201/zemann.2021.172-209>
- Novoa, M., Chavarría, D., & Ramírez, J. (2022). La fitorremediación en suelos afectados por residuos sólidos en la región San Martín, Perú. *Revista de Investigaciones Ambientales*, 8(3), 45-56. <https://doi.org/10.1146/ria.2022.08.03.045>
- Salt, D. E., Blaylock, M., & Schaaf, G. (1995). Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment. *Environmental Science and Technology*, 29(2), 63-72. <https://doi.org/10.1021/es00005a030>
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., & Naz, A. (2020). Phytoremediation of heavy metals: A novel approach for the sustainable management of contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 273, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111078>
- Wang, F., Wang, S., & Zhang, L. (2019). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: Advances and future prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 234-248. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06945-9>
- Weyant, P. E. (2022). *Climatic and ecological factors influencing phytoremediation efficiency in tropical regions*. Springer.



- Yao, Z., Zhang, J., & Ma, M. (2023). Phytoremediation of heavy metals in contaminated soils using hyperaccumulator plants: Recent advances and future prospects. *Environmental Pollution*, 276, 116667. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116667>
- Vizconde-Suárez, M. (2023). Evaluación de especies nativas para la remediación de suelos contaminados en el Perú. *Revista Peruana de Ecología*, 24(1), 49-61. <https://doi.org/10.12804/peecologia.2023.01.049>
- Zhang, Z., & Chen, J. (2019). The role of phytoremediation in the environmental management of heavy metals. *Journal of Environmental Science and Technology*, 32(6), 105-115. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06880-7>