

Kevin Antonio Flores Vinces
Diana Lucia Linares Liza
Alejandro Wilber Padilla Sevillano
Pedro Miguel Vásquez Mendoza
Segundo Juan Saldaña Saavedra
Luis Miguel Castillo Rodríguez
Alex Genereux Rodríguez Rodríguez

Zea mays

Bioremediación en zonas
afectadas por la minería



Zea mays

Bioremediación en zonas afectadas por la minería

Kevin Antonio Flores Vinces, Diana Lucia Linares Liza,
Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza,
Segundo Juan Saldaña Saavedra, Luis Miguel Castillo Rodríguez,
Alex Genereux Rodríguez Rodríguez

Quito, Ecuador

| 2025 |

Zea mays

Bioremediation in Mining-Affected Areas

Zea mays

Biorremediação em Áreas Afetadas pela Mineração

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial

Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahi Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial

Editorial Board

Jean-Arsène Yao

Dilrabo Keldiyorovna Bakhranova

Fabiana Parra

Mateus Gamba Torres

Siti Mistima Maat

Nikoleta Zampaki

Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-

RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-

RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at
<https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



Derechos de autor | Copyright: Religación Press, Kevin Antonio Flores Vinces, Diana Lucia Linares Liza, Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza, Segundo Juan Saldaña Saavedra, Luis Miguel Castillo Rodríguez, Alex Genereux Rodríguez Rodríguez

Primera Edición | First Edition: 2025

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 631.8 - Fertilizantes. acondicionadores del suelo. reguladores del crecimiento

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: RNH - Gestión de residuos | TQ - Ciencia, ingeniería y tecnología medioambientales | RBGK - Geoquímica

BISAC: SCI026000

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Estudios Ambientales

Soporte| Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2025-11-14

ISBN: 978-9942-561-93-0

Título: Zea mays. Bioremedición en zonas afectadas por la minería

Nota obra derivada: El libro retoma y amplía, mediante el trabajo colaborativo de un grupo de investigadores, los hallazgos y aportes presentados en la tesis original, enriqueciendo su contenido con nuevos enfoques, análisis y perspectivas que profundizan en los temas abordados "Evaluación del Maíz (Zea mays) utilizado en la Absorción de Plomo y Fierro en suelos contaminados a nivel de laboratorio" presentada ante la Universidad Nacional de Trujillo por Kevin Antonio Flores Vinces, Diana Lucia Linares Liza en 2025.

Note: The book takes up and expands, through the collaborative work of a group of researchers, the findings and contributions presented in the original dissertation, enriching its content with new approaches, analyses and perspectives that deepen the topics addressed. "Evaluación del Maíz (Zea mays) utilizado en la Absorción de Plomo y Fierro en suelos contaminados a nivel de laboratorio" presented to the Universidad Nacional de Trujillo by Kevin Antonio Flores Vinces, Diana Lucia Linares Liza in 2025.

[APA 7]

Flores Vinces, K. A., Linares Liza, D. L., Padilla Sevillano, A. W., Vásquez Mendoza, P. M., Saldaña Saavedra, S. J., Castillo Rodríguez, L. M., y Rodríguez Rodríguez, A. G. (2025). *Zea mays. Bioremedición en zonas afectadas por la minería*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.354>

Revisión por pares

La presente obra fue sometida a un proceso de evaluación mediante el sistema de dictaminación por pares externos bajo la modalidad doble ciego. En virtud de este procedimiento, la investigación que se desarrolla en este libro ha sido avalada por expertos en la materia, quienes realizaron una valoración objetiva basada en criterios científicos, asegurando con ello la rigurosidad académica y la consistencia metodológica del estudio.

Peer Review

This work was subjected to an evaluation process by means of a double-blind peer review system. By virtue of this procedure, the research developed in this book has been endorsed by experts in the field, who made an objective evaluation based on scientific criteria, thus ensuring the academic rigor and methodological consistency of the study.

Sobre los autores

About the authors

Kevin Antonio Flores Vinces

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
kvinces@unitru.edu.pe
floresvinces@gmail.com

Diana Lucía Linares Liza

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
dlinaresl@unitru.edu.pe
dianaluciq_1894@hotmail.com

Alejandro Wilber Padilla Sevillano

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0003-4764-4068>
apadilla@unitru.edu.pe
alexandropaddi@gmail.com

Pedro Miguel Vásquez Mendoza

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0009-0003-0485-197X>
pvasquezm@unitru.edu.pe
pedromiguelvasquezmendoza@gmail.com

Segundo Juan Saldaña Saavedra

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1338-2015>
ssaldana@unitru.edu.pe
jhonsaldanasavedra@gmail.com

Luis Miguel Castillo Rodriguez

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5806-6112>
lcastilloro@unitru.edu.pe
luiscastillorodriguez001@gmail.com

Alex Genereux Rodriguez Rodriguez

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0001-8267-0507>
arodriguezro@unitru.edu.pe
ag_rodriguezr@hotmail.com

Resumen

Este libro examina el potencial del maíz (*Zea mays*) como una alternativa ecológica para abordar la contaminación por metales pesados en suelos y aguas. Gracias a su sistema radicular extenso y a sus residuos agrícolas, esta especie muestra una capacidad significativa para absorber, acumular y transformar contaminantes como plomo, arsénico, cadmio y mercurio, lo que la posiciona como una opción viable para la recuperación de ecosistemas afectados por actividades mineras e industriales. La obra analiza aplicaciones biotecnológicas entre las que se incluyen sistemas de biofiltración, técnicas de fitoremedición, producción de biocarbonos y desarrollo de materiales absorbentes. Estos enfoques convierten al maíz en un recurso estratégico para comunidades, agricultores y gestores ambientales que buscan soluciones basadas en la naturaleza. A partir de experiencias en los Andes peruanos y de investigaciones a nivel global, el libro presenta un panorama integral sobre cómo integrar este cultivo tradicional en estrategias contemporáneas de regeneración ambiental, contribuyendo a restaurar el equilibrio de los ecosistemas y a promover un futuro más sostenible.

Palabras clave:

Fitorremediación, *Zea mays*, metales pesados, biorremediación, suelos contaminados.

Abstract

This book examines the potential of corn (*Zea mays*) as an ecological alternative for addressing heavy metal contamination in soils and waters. Through its extensive root system and agricultural residues, this species demonstrates significant capacity to absorb, accumulate, and transform pollutants such as lead, arsenic, cadmium, and mercury, positioning it as a viable option for the recovery of ecosystems affected by mining and industrial activities. The work analyzes biotechnological applications including biofiltration systems, phytoremediation techniques, biochar production, and the development of absorbent materials. These approaches establish corn as a strategic resource for communities, farmers, and environmental managers seeking nature-based solutions. Drawing from experiences in the Peruvian Andes and global research, the book presents a comprehensive overview of how to integrate this traditional crop into contemporary environmental regeneration strategies, contributing to restoring ecosystem balance and promoting a more sustainable future.

Keywords:

Phytoremediation, *Zea mays*, heavy metals, bioremediation, contaminated soils.

Resumo

Este livro examina o potencial do milho (*Zea mays*) como alternativa ecológica para abordar a contaminação por metais pesados em solos e águas. Através de seu sistema radicular extenso e resíduos agrícolas, esta espécie demonstra capacidade significativa para absorver, acumular e transformar poluentes como chumbo, arsênio, cádmio e mercúrio, posicionando-a como uma opção viável para a recuperação de ecossistemas afetados por atividades mineiras e industriais. A obra analisa aplicações biotecnológicas que incluem sistemas de biofiltração, técnicas de fitorremediação, produção de biocarvões e desenvolvimento de materiais absorventes. Essas abordagens convertem o milho em recurso estratégico para comunidades, agricultores e gestores ambientais que buscam soluções baseadas na natureza. A partir de experiências nos Andes peruanos e de pesquisas em nível global, o livro apresenta um panorama integral sobre como integrar esta cultura tradicional em estratégias contemporâneas de regeneração ambiental, contribuindo para restaurar o equilíbrio dos ecossistemas e promover um futuro mais sustentável.

Palavras-chave:

Fitorremediação, *Zea mays*, metais pesados, biorremediação, solos contaminados.

CONTENIDO

| | |
|--------------------|----|
| Revisión por pares | 6 |
| Peer Review | 6 |
| Sobre los autores | 8 |
| About the authors | 8 |
| Resumen | 10 |
| Abstract | 10 |
| Resumo | 11 |
| Prólogo | 18 |

Capítulo 1

| | |
|---|-----------|
| La Fitorremediación con <i>Zea mays</i> | 21 |
| Una solución sostenible para la descontaminación de suelos y aguas | 22 |
| El Flagelo de los Metales Pesados y el Potencial de las Soluciones | |
| Basadas en la Naturaleza | 22 |
| El contexto peruano: minería, contaminación y aplicaciones locales de la fitorremediación | 23 |
| Más allá del suelo: aplicaciones en bioabsorción y el valor de los residuos agrícolas | 25 |
| Innovación en materiales: de los bioabsorbentes a las nanoestructuras híbridas | 26 |
| Conclusión e Implicaciones Futuras | 27 |

Capítulo 2

| | |
|--|-----------|
| Metales pesados en el suelo | 30 |
| Una amenaza silenciosa y estrategias de remediación sostenible | 31 |
| La huella antrópica: fuentes y persistencia del plomo y el hierro en el ambiente | 31 |
| <i>Zea mays</i> . De cereal fundamental a aliado en la biorremediación | 32 |
| Fundamento experimental: evaluando la eficacia del maíz en condiciones controladas | 34 |

Capítulo 3

| | |
|---|-----------|
| El andamiaje experimental: diseño, instrumentación y protocolos para el análisis de fitorremediación | 37 |
| Metodología experimental: un enfoque sistemático para evaluar la fitorremediación | 38 |
| Preparación de muestras y caracterización de materiales: la base de la experimentación controlada | 38 |

| | |
|--|----|
| Arquitectura del diseño experimental y contexto de ejecución | 39 |
| El marco metodológico: naturaleza y enfoque de la investigación | 43 |
| Fundamentos y carácter aplicado del estudio | 43 |
| Arquitectura experimental y enfoque cuantitativo | 43 |
| Síntesis Metodológica y Relevancia del Enfoque | 44 |
| Parámetros del estudio: definición y operacionalización | 45 |
| Protocolo experimental: evaluación de la eficacia fitorremediadora de <i>Zea mays</i> | 46 |
| Ánálisis de muestras y procesamiento de datos | 47 |
| Validación estadística y significado metodológico | 48 |
| Capítulo 4 | |
| Dinámica de la fitoextracción: análisis de la absorción de plomo y hierro por <i>Zea mays</i> | 51 |
| Diseño del estudio de bioacumulación metálica | 52 |
| Procedimiento para la Cuantificación de la Absorción de Plomo | 52 |
| Dinámica de fitoextracción en condiciones de alta contaminación | 53 |
| Bioacumulación de plomo en maíz: eficiencia a 25 ppm | 56 |
| Bioacumulación de Plomo en Maíz: Eficiencia a 10 ppm | 58 |
| Efecto de la Concentración Inicial en la Bioacumulación de Plomo | 61 |
| Bioacumulación de Hierro en Suelos Mediante <i>Zea mays</i> | 63 |
| Bioacumulación de hierro en <i>zea mays</i> : eficiencia a 50 ppm | 63 |
| Bioacumulación de Hierro en <i>Zea mays</i> : Eficiencia a 25 ppm | 66 |
| Bioacumulación de Hierro en <i>Zea mays</i> : Eficiencia a 10 ppm | 68 |
| Efecto de la Concentración Inicial en la Bioacumulación de Hierro | 70 |
| Ánálisis estadístico del proceso de absorción | 72 |
| Anova para el proceso de absorción de plomo por <i>Zea mays</i> | 72 |
| Análisis de Varianza para la Bioacumulación de Hierro en <i>Zea mays</i> | 73 |
| Capítulo 5 | |
| El potencial fitorremediador de <i>zea mays</i>: síntesis de hallazgos y proyecciones | 76 |
| Capacidad de Bioacumulación y Factores Determinantes | 77 |
| Implicaciones prácticas y recomendaciones para investigación futura | 78 |
| Referencias | 80 |

TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Diseño experimental para fitoextracción de plomo | 41 |
| Tabla 2 Absorción de hierro en <i>Zea mays</i> | 42 |
| Tabla 3. Parámetros de investigación | 46 |
| Tabla 4. Absorción de Pb por <i>Zea mays</i> : 50 ppm | 54 |
| Tabla 5. Absorción de Pb (25 ppm) en <i>Zea mays</i> | 56 |
| Tabla 6. Absorción de Pb (10 ppm) en <i>Zea mays</i> | 59 |
| Tabla 7. Porcentaje de absorción de Pb por <i>Zea mays</i> vs concentración inicial | 61 |
| Tabla 8. Absorción de Fe en <i>Zea mays</i> (50 ppm) | 64 |
| Tabla 9. Absorción de Fe en <i>Zea mays</i> (25 ppm) | 66 |
| Tabla 10. Absorción de Fe en <i>Zea mays</i> (10 ppm) | 68 |
| Tabla 11. Eficiencia de Fitoextracción: Absorción de Fe vs Concentración Inicial | 70 |
| Tabla 12. ANOVA: Absorción de Pb por <i>Zea mays</i> vs tiempo | 72 |
| Tabla 13. ANOVA: Absorción de Fe por <i>Zea mays</i> vs tiempo | 73 |

FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de flujo: Remoción de Fe y Pb | 49 |
| Figura 2. Absorción temporal de Pb (50 ppm) en <i>Zea mays</i> | 55 |
| Figura 3. Cinética de absorción de Pb en <i>Zea mays</i> (25 ppm) | 57 |
| Figura 4. Cinética de absorción de Pb en <i>Zea mays</i> (10 ppm) | 60 |
| Figura 5. Absorción de Pb en <i>Zea mays</i> vs tiempo | 62 |
| Figura 6. Cinética de absorción de Fe en <i>Zea mays</i> (50 ppm) | 65 |
| Figura 7. Cinética de absorción de Fe en <i>Zea mays</i> (25 ppm) | 67 |
| Figura 8. Cinética de absorción de Fe en <i>Zea mays</i> (10 ppm) | 69 |
| Figura 9. Cinética de absorción de Fe en <i>Zea mays</i> | 71 |

Prólogo

La creciente presión sobre los sistemas naturales derivada de las actividades industriales y mineras ha generado un desafío ambiental de proporciones considerables: la contaminación de suelos y aguas por metales pesados. Frente a este problema, que compromete la salud de los ecosistemas y la seguridad alimentaria, emerge con fuerza el concepto de fitorremediación como una estrategia de gestión ambiental sostenible. Este libro examina el potencial de *Zea mays* (maíz) como herramienta fundamental en este campo, presentando evidencia científica sobre sus múltiples aplicaciones en la descontaminación de medios afectados.

La obra se estructura en cinco capítulos que abordan, desde perspectivas complementarias, el problema de la contaminación por metales pesados y las soluciones basadas en procesos naturales. En la primera parte, se explora la capacidad del maíz para actuar como agente de fitorremediación, analizando tanto su uso como planta viva en suelos contaminados como la utilización de sus residuos agrícolas en procesos de bioabsorción para el tratamiento de aguas. La revisión de investigaciones recientes demuestra cómo esta especie, combinada con enmiendas orgánicas como vermicompost o biocarbón, muestra una capacidad significativa para estabilizar y extraer metales como plomo, arsénico y cadmio.

La segunda parte profundiza en las características de los metales pesados como contaminantes persistentes, con especial atención al plomo y hierro, y establece los fundamentos experimentales para evaluar la eficacia del maíz en condiciones controladas. Se presenta un diseño metodológico riguroso que permite cuantificar la capacidad de absorción de metales por parte de la planta y determinar los factores que influyen en este proceso.

Lo que distingue a esta obra es su enfoque integral, que trasciende la visión tradicional de la fitorremediación para abarcar aplicaciones innovadoras que incluyen el desarrollo de materiales avanzados derivados de los residuos del maíz. Estudios como el de Wang et al. (2023) con lignosulfonato de rastrojo de maíz y el de Wei et al. (2025) con nanocompuestos de hierro soportados en biocarbón de paja de maíz, ilustran el potencial de

estos materiales para lograr eficiencias de remoción superiores en el tratamiento de aguas contaminadas.

El valor de esta investigación reside en su contribución al desarrollo de estrategias de remediación ambiental circular, donde un cultivo tradicional como el maíz se transforma en una herramienta versátil para abordar uno de los problemas ambientales más complejos de nuestro tiempo. Los hallazgos presentados en estas páginas no solo amplían el conocimiento científico sobre los mecanismos de fitorremediación, sino que también ofrecen perspectivas concretas para su implementación en contextos reales, particularmente relevantes para países como Perú, donde la contaminación minera representa un desafío socioambiental prioritario.

Esta obra se dirige a investigadores, gestores ambientales, estudiantes y todos aquellos interesados en explorar soluciones basadas en la naturaleza para la recuperación de ecosistemas degradados, contribuyendo así a la construcción de un paradigma de gestión ambiental que integre el conocimiento científico con la sostenibilidad ecológica y el desarrollo social.

Capítulo 1

La Fitorremediación con Zea mays

Una solución sostenible para la descontaminación de suelos y aguas

La fitorremediación, estrategia que utiliza plantas para mitigar la contaminación ambiental, se ha consolidado como una alternativa prometedora y ecológica para la rehabilitación de suelos y aguas afectados por metales pesados. Entre las especies más estudiadas y eficaces para este fin se encuentra *Zea mays* (maíz), una planta que no solo posee una notable capacidad de bioacumulación, sino que también ofrece ventajas agronómicas como un crecimiento vigoroso y una alta biomasa. A nivel global, numerosas investigaciones han evidenciado la proficiencia de esta gramínea para absorber y estabilizar contaminantes, en particular plomo (Pb), contribuyendo significativamente a restaurar la calidad edáfica. Lo más destacable es que el maíz no actúa únicamente como un mero extractor de metales; su cultivo, especialmente cuando se combina con enmiendas orgánicas, enriquece las propiedades fisicoquímicas del suelo, potenciando su fertilidad y optimizando el rendimiento general del proceso de remediación (Altamirano, 2023). Esta sinergia entre planta y suelo transforma una técnica de descontaminación en una estrategia integral de recuperación ambiental.

El Flagelo de los Metales Pesados y el Potencial de las Soluciones Basadas en la Naturaleza

La contaminación del suelo por metales pesados constituye un problema medioambiental de proporciones globales, con implicaciones profundas para la salud de los ecosistemas y la seguridad alimentaria (Yang et al., 2018). Estos elementos, de naturaleza persistente y no biodegradable, se acumulan en los estratos del suelo, donde pueden ejercer efectos deletéreos sobre la microbiota esencial para los ciclos biogeoquímicos. Cuando las concentraciones superan los umbrales establecidos en los estándares de calidad ambiental, se desencadena un deterioro cascada de la salud del suelo: la actividad y diversidad de los microorganismos se ve severamente afectada (Imseng et al., 2019), lo que a su vez compromete los procesos naturales de descomposición y fijación de nutrientes. Para los cultivos, las

consecuencias son igualmente graves; se observan reducciones drásticas en la fecundidad, la producción y las condiciones morfológicas de las plantas. Además, existe el riesgo crítico de que estos metales sean translocados desde las raíces hacia los tejidos comestibles, incorporándose así a la cadena trófica y generando toxicidad crónica en los seres vivos que los consumen, incluidos los humanos (Li et al., 2020). Frente a este panorama, la fitorremediación emerge no como una panacea, sino como una herramienta de gestión de riesgos ambientalmente racional y sostenible.

El potencial de *Zea mays* en este campo ha sido validado en múltiples contextos internacionales, demostrando una versatilidad encomiable. Por ejemplo, en suelos impactados por la industria, el maíz ha mostrado una capacidad notable para reducir la biodisponibilidad y toxicidad de metales como el cadmio y el zinc, mejorando progresivamente la calidad del substrato. Su sistema radicular extenso y profundo actúa como una red de filtración, mientras que su parte aérea acumula cantidades significativas de contaminantes, que son cosechados y removidos del ecosistema. Esta eficacia en la bioacumulación y fitoestabilización de metales pesados ha posicionado al maíz como una especie clave en estrategias de remediación pasiva y de bajo costo (Lozano-Carranza, 2024). Su uso trasciende lo experimental, habiéndose implementado en proyectos a escala real en diversas latitudes, siempre con el objetivo común de devolver la funcionalidad a terrenos degradados.

El contexto peruano: minería, contaminación y aplicaciones locales de la fitorremediación

En Perú, la urgencia de abordar la contaminación por metales pesados es particularmente alarmante, especialmente en regiones históricamente impactadas por actividades mineras tanto formales como informales. La liberación de desechos ricos en plomo (Pb), arsénico (As), hierro (Fe) y otros metales ha dejado un legado de suelos inertes y cursos de agua degradados, representando un desafío socioambiental de primera magnitud. Afortunadamente, la investigación local ha avanzado en la validación

de soluciones prácticas. Estudios específicos han evaluado el uso de *Zea mays* en condiciones peruanas, obteniendo resultados alentadores. Una investigación llevada a cabo en Sincos, Jauja, se centró en evaluar el efecto sinérgico de los microorganismos eficaces en la reducción del plomo en el suelo, concluyendo que el maíz funciona predominantemente como una planta fitoestabilizadora en tales condiciones (Hinostroza, 2024). Este rol es crucial, ya que la fitoestabilización no busca extraer el metal, sino inmovilizarlo en la rizósfera, reduciendo su erosión y lixiviación, y por ende, su riesgo de dispersión.

Otros estudios han explorado el uso de enmiendas para potenciar la eficacia del maíz en procesos de fitorremediación. Una investigación reciente desarrollada en Arequipa analizó el efecto del vermicompost en la fitorremediación de arsénico utilizando *Zea mays*. Este enfoque resulta particularmente estratégico, ya que el vermicompost no solo mejora las propiedades físicas y la fertilidad del suelo, sino que también puede modificar la especiación química del arsénico, reduciendo su biodisponibilidad o, en función de las condiciones, facilitando su absorción por la planta. Los resultados demostraron que la aplicación de este abono orgánico favoreció significativamente el crecimiento del maíz en suelos contaminados, incrementando su tolerancia al estrés y, en consecuencia, su capacidad para establecerse en ambientes adversos (Bedregal, 2024).

De manera complementaria, investigaciones que han combinado el cultivo de maíz con aplicaciones de biocarbón-compost para fitorremediar suelos contaminados con arsénico y plomo apuntan hacia un enfoque integral y multifactorial para la recuperación de áreas mineras críticas en el país (Viru Vasquez, 2024). El conjunto de estudios sistemáticos realizados entre 2018 y 2022 ha generado un corpus de evidencia sólida que subraya la relevancia de *Zea mays* en la rehabilitación de suelos degradados en el Perú, posicionándola como una alternativa sostenible y de bajo costo relativo.

Más allá del suelo: aplicaciones en bioabsorción y el valor de los residuos agrícolas

El potencial de *Zea mays* no se limita a su uso como planta viva en el terreno; se extiende de manera formidable al ámbito de la bioabsorción, donde sus residuos agrícolas se transforman en materiales eficaces para tratar aguas y efluentes contaminados. Esta aproximación otorga un valor agregado a los subproductos del cultivo, promoviendo una economía circular. Un ejemplo paradigmático es el estudio de Quispe Banda et al. (2024), que evaluó la cáscara de zuro de maíz, en combinación con residuos de plátano, para remover cobre (Cu) y hierro (Fe) total de efluentes de minería artesanal. El efluente, caracterizado por una acidez extrema (pH 2,17) y concentraciones astronómicas de Cu (532,900 mg/L) y Fe (989,700 mg/L), representaba un desafío técnico considerable. Los resultados fueron contundentes: con un tiempo de contacto de 6 horas y dosis crecientes del bioabsorbente, se lograron remociones de hasta 69,19% para cobre y 78,21% para hierro. Este antecedente es de una relevancia crucial, ya que respalda el uso de residuos agrícolas locales como el corazón de estrategias sostenibles y de bajo costo para la remoción de metales, ampliando espectacularmente las aplicaciones de *Zea mays* en el desarrollo de tecnologías limpias y accesibles para contextos como el peruano.

La versatilidad de los residuos del maíz se confirma en otras investigaciones. Jimenez-Machuca et al. (2023), por ejemplo, utilizaron olate de maíz (el corazón de la mazorca) para tratar drenajes ácidos de mina del río Hualgayoc-Arascorgue, específicamente para la remoción de hierro (Fe) y plomo (Pb). Su estudio de enfoque explicativo-experimental, que empleó 1,350 kg de olate para tratar 30 litros de agua residual, encontró que el tiempo de retención era un factor significativo para la remoción de hierro, mientras que la proporción del material absorbente era el factor clave. Aunque el impacto sobre el plomo fue menos relevante en este caso, la investigación reafirmó el potencial del olate como un material eficaz y de origen biológico para la descontaminación de cuerpos de agua. En una línea similar, Alcibar y Manolo (2023) realizaron un estudio experimental con olate de maíz para absorber plomo (II) de aguas residuales sintéticas. Dise-

ñando un sistema de biofiltración, determinaron que el modelo de Freundlich (con un $R^2 = 0,98$) describía mejor el proceso de absorción, indicando una fisisorción en múltiples capas. Bajo las condiciones óptimas, lograron una capacidad máxima de absorción de 50,02 mg/g y un porcentaje de remoción del 74,77%, demostrando la alta afinidad del material por el metal.

Innovación en materiales: de los bioabsorbentes a las nanoestructuras híbridas

La investigación de vanguardia ha llevado las aplicaciones de los derivados del maíz a un nivel superior, desarrollando materiales avanzados y nanocomuestos con una eficiencia de remoción muy superior a la de sus componentes por separado. Wang et al. (2023) aportaron una contribución significativa al obtener lignosulfonato a partir de rastrojo de maíz y, tras modificarlo mediante un método hidrotérmico, crearon un absorbente con una estructura porosa excepcional. Esta porosidad es fundamental, ya que proporciona una inmensa área interna y una multitud de sitios activos para que los iones de metales pesados se adsorban. Los resultados fueron extraordinarios: el material mostró capacidades de absorción de 450,3 mg g⁻¹ para Cu²⁺ y 475,4 mg g⁻¹ para Pb²⁺. Además, en un tiempo récord de 60 minutos, alcanzaba el equilibrio de absorción para soluciones de 40 mg L⁻¹. Cuando se probó en aguas residuales reales, el material demostró una eficacia de amplio espectro, con tasas de eliminación del 95% para Cr, 99% para Fe, 87% para Cu y 83% para Pb, consolidándose como una solución práctica y de alto rendimiento.

Quizás uno de los avances más notables lo representa el trabajo de Wei et al. (2025), quienes sintetizaron un compuesto de hierro nano-cero-valente (nZVI) soportado en biocarbón derivado de paja de maíz (nZVI-BC). La sinergia entre el poder reductor del nanohierro y la alta área superficial y capacidad de intercambio catiónico del biocarbón resultó en un material con capacidades de remoción exponencialmente mejoradas. Para Cr⁶⁺, Pb²⁺ y Cd²⁺, las capacidades fueron de 82,24, 737,2 y 545,28

mg g⁻¹, respectivamente, valores que empequeñecen a los del biocarbón solo (0,05, 89,88 y 108,49 mg g⁻¹) y el nZVI solo (39,8, 297,35 y 191,02 mg g⁻¹). Esta línea de innovación es continuada por investigaciones como la de Du et al. (2020), quienes, para evitar el bloqueo de los poros del biocarbón por los óxidos de hierro, desarrollaron un biocarbón magnético poroso activado con ácido húmico sintético (AHA/Fe₃O₄-γFe₂O₃@PBC). Este material no solo presentó una capacidad de eliminación de Langmuir de 99,82 mg/g para Pb²⁺, sino que también demostró ser reciclabl e, manteniendo una capacidad del 79,04 mg/g tras cinco ciclos de uso. Los mecanismos de eliminación identificados, que incluyen reducción, complejación y precipitación, ilustran la sofisticación y multifuncionalidad de estos nuevos materiales inspirados en la biomasa del maíz.

Conclusión e Implicaciones Futuras

En síntesis, el cuerpo de evidencia revisado, pinta un panorama coherente y alentador sobre el rol de *Zea mays* y sus derivados en la remediación ambiental. Como planta viva, demuestra una robusta capacidad para fitoestabilizar y fitoextraer metales pesados de suelos contaminados, mejorando simultáneamente la salud edáfica, especialmente cuando se potencia con enmiendas orgánicas como el vermicompost o el biocarbón. Como residuo agrícola transformado en bioabsorbente, sus aplicaciones se diversifican hacia el tratamiento de efluentes mineros y aguas residuales, ofreciendo una tecnología de bajo costo y alta eficiencia que valoriza los desechos agroindustriales. Finalmente, como precursor de materiales de ingeniería y nanocompuestos, abre la puerta a soluciones de altísima performance para los desafíos más complejos de contaminación. Las implicaciones de estos hallazgos son profundas: señalan el camino hacia estrategias de biorremediación circulares y sostenibles, que no solo mitigan un problema ambiental crítico, sino que también generan valor a partir de recursos biológicos abundantes y renovables. La integración de estas diferentes aproximaciones—desde la siembra de maíz en suelos degradados

hasta el diseño de biofiltros y nanocomuestos a partir de sus residuos— constituye un paradigma poderoso para la gestión ambiental del siglo XXI, particularmente relevante para países como Perú, donde la riqueza natural y los pasivos ambientales coexisten en un delicado equilibrio.

Capítulo 2

Metales pesados en el suelo

Una amenaza silenciosa y estrategias de remediación sostenible

La contaminación de los suelos por metales pesados representa uno de los desafíos ambientales más complejos y persistentes de nuestra era, caracterizándose por la lixiviación de estos elementos hacia los acuíferos, su bioacumulación en las cadenas tróficas y su impacto perdurable en la salud de los ecosistemas. Entre la gama de contaminantes, el plomo (Pb) y el hierro (Fe) destacan por su ubiquedad y los riesgos asociados, los cuales derivan predominantemente de actividades antropogénicas intensivas. Su presencia en matrices edáficas no solo suprime la biodiversidad microbiana y vegetal, esencial para la fertilidad del suelo, sino que también compromete la calidad de los cuerpos de agua adyacentes mediante procesos de escorrentía e infiltración, generando un riesgo toxicológico acumulativo para las poblaciones humanas expuestas (Li et al., 2020). El plomo, en particular, es reconocido por su alta toxicidad incluso a bajas concentraciones, pudiendo ocasionar daños neurológicos irreversibles y trastornos del desarrollo cognitivo, especialmente en la población infantil. Por su parte, el hierro, si bien es un micronutriente indispensable para la mayoría de las formas de vida, en concentraciones elevadas induce estrés oxidativo en las plantas, altera la estructura porosa del suelo y bloquea la disponibilidad de otros nutrientes esenciales, degradando así la capacidad productiva de la tierra.

La huella antrópica: fuentes y persistencia del plomo y el hierro en el ambiente

La distribución global del plomo es un testimonio directo de su extenso uso industrial e histórico, un legado tóxico que perdura en el ambiente mucho después de haber sido regulado. Sus aplicaciones han sido tan diversas como problemáticas, incluyendo su papel como aditivo antidetonante en gasolinas, pigmento en pinturas, componente en soldaduras y tuberías, y elemento fundamental en la fabricación de baterías de plomo-ácido. Aunque legislaciones progresivas en numerosos países han propiciado la eliminación del plomo en productos como la gasolina y las pinturas para

uso doméstico, su persistencia ambiental es notable. Las partículas de plomo emitidas décadas atrás por los escapes de vehículos permanecen en los suelos superficiales, especialmente en zonas urbanas y cercanas a carreteras, constituyendo un reservorio de exposición continua. Del mismo modo, la degradación de pinturas con base de plomo en edificaciones antiguas genera un polvo fino que se mezcla con el suelo de áreas circundantes, representando un peligro particular para los niños debido a su comportamiento de llevarse las manos a la boca. La industria, en particular la dedicada a la fundición de metales y la fabricación de baterías, sigue siendo una fuente puntual de liberación de altos contenidos de plomo, afectando a comunidades aledañas y generando puntos calientes de contaminación que requieren intervención urgente.

La situación del hierro presenta una dinámica diferente, dado su carácter de elemento natural y esencial. Sin embargo, las actividades humanas, en especial la minería y la industria siderúrgica, alteran profundamente su ciclo biogeoquímico natural. Estas actividades movilizan enormes volúmenes de material de desecho y escorias, ricos en formas solubles de hierro, que son depositados en el suelo. Cuando las concentraciones de hierro disponibles superan con creces los requerimientos nutricionales de las plantas, se desencadena un fenómeno de fitotoxicidad. Este exceso puede manifestarse mediante la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro en la rizósfera, formando una costra que impide la absorción de agua y nutrientes, y asfixiando literalmente a las raíces. Además, en suelos mal drenados, el exceso de hierro en su forma ferroso (Fe^{2+}) puede volverse altamente soluble y tóxico, interfiriendo con procesos celulares fundamentales en las plantas y reduciendo drásticamente el rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, el problema no es la presencia del hierro *per se*, sino la perturbación antrópica que conduce a su desequilibrio ecológico, transformando un nutriente vital en un agente de degradación ambiental.

Zea mays. De cereal fundamental a aliado en la biorremediación

Frente a este panorama, la fitorremediación se consolida como una estrategia de remediación ecológica y económicamente viable, que aprove-

cha las capacidades metabólicas naturales de las plantas para contener, degradar o extraer contaminantes del suelo. Entre las especies promisorias, el *Zea mays* emerge como un candidato excepcional debido a un conjunto de atributos fisiológicos y agronómicos que lo hacen ideal para este fin. Como cereal anual de la familia de las gramíneas, originario de Mesoamérica y hoy cultivado a escala global, el maíz posee un sistema radicular fibroso, extenso y denso, capaz de explorar grandes volúmenes de suelo y establecer contacto con una superficie significativa de partículas contaminadas. Este sistema radical le confiere una alta capacidad de absorción y acumulación de metales pesados en sus tejidos, particularmente en las raíces, aunque también puede translocarlos a la parte aérea. Su rápido ciclo de crecimiento y la producción de una biomasa considerable por hectárea son ventajas cruciales, ya que permiten la remoción física de grandes cantidades de contaminantes mediante la simple cosecha y disposición final de los tejidos cargados con metales.

Más allá de su eficacia en la fitoextracción, el maíz muestra una notable tolerancia a condiciones edáficas adversas, incluyendo la presencia de metales en concentraciones que serían letales para otras especies. Esta resiliencia se ve potenciada cuando se cultiva con enmiendas orgánicas, las cuales pueden mejorar la estructura del suelo y modular la biodisponibilidad de los metales, optimizando así el proceso de remediación. Si bien se han identificado más de 400 taxones de plantas con capacidad de bioacumulación, muchas son especies silvestres de crecimiento lento y baja producción de biomasa, lo que limita su aplicación práctica a gran escala. En contraste, el maíz combina una capacidad de remediación significativa con un valor agronómico y económico bien establecido, haciendo de su uso una propuesta particularmente atractiva para países en desarrollo con recursos limitados para emprender costosas obras de remediación física o química (Aladesanmi et al., 2019). Su cultivo con este fin no solo puede descontaminar el suelo, sino que también puede integrarse en sistemas de producción que prioricen la seguridad alimentaria, siempre y cuando los tejidos cosechados no sean destinados al consumo.

Fundamento experimental: evaluando la eficacia del maíz en condiciones controladas

La pregunta de investigación que guía este esfuerzo se centra en dilucidar la viabilidad concreta de utilizar *Zea mays* para absorber plomo y hierro en suelos contaminados bajo las condiciones controladas de un laboratorio. Esta aproximación metodológica es un primer paso indispensable para cuantificar con precisión los mecanismos y la eficiencia del proceso, aislando las variables de interés de la complejidad del ambiente natural. La hipótesis que se sustenta postula que, efectivamente, es posible emplear el maíz para este fin, dada su fisiología y la evidencia previa de su desempeño en contextos similares. Para verificar esta premisa, el objetivo general del estudio se define como evaluar la eficacia de *Zea mays* en la recuperación de plomo y hierro presentes en muestras de suelos artificialmente contaminados, midiendo la reducción de las concentraciones de estos metales en el sustrato y su concomitante acumulación en los tejidos de la planta.

Los objetivos específicos se han diseñado para desglosar este propósito general en componentes medibles y analizables. En primer lugar, se busca determinar el porcentaje de absorción de plomo a lo largo del período de crecimiento de la planta, comparando las concentraciones encontradas en sus tejidos en diferentes etapas fenológicas, desde la plántula hasta la madurez. Un procedimiento análogo se aplicará para el caso del hierro, lo que permitirá trazar curvas de acumulación para ambos metales e identificar la fase de desarrollo en la que la planta es más eficiente en su captación. Asimismo, es fundamental evaluar cómo la concentración inicial de plomo y hierro en el suelo influye en la eficiencia de absorción de *Zea mays*, ya que podría existir un umbral a partir del cual la fitotoxicidad limita la capacidad de la planta. Finalmente, para dotar de robustez estadística a los hallazgos, se aplicará un análisis de varianza (ANOVA) que permita determinar si las diferencias observadas en la absorción de plomo y hierro entre los distintos tratamientos son estadísticamente significativas, separando así los efectos reales de la variabilidad experimental.

La justificación de esta investigación se enmarca en la necesidad crítica de desarrollar y validar tecnologías de remediación que no solo sean efectivas, sino también sostenibles y socialmente pertinentes. La creciente presión de los metales pesados sobre los suelos agrícolas y los ecosistemas naturales exige soluciones innovadoras que trasciendan los costosos y, a menudo, invasivos métodos de excavación y confinamiento. La fitorremediación con una especie de valor económico como *Zea mays* representa un paradigma de este enfoque, ofreciendo una estrategia de bajo costo y bajo impacto ambiental. La recuperación exitosa de suelos contaminados tiene el potencial de revitalizar tierras de cultivo abandonadas, impulsando la producción alimentaria local y, en última instancia, contribuyendo al desarrollo económico y social de las comunidades rurales afectadas por la contaminación. Al demostrar la eficacia de esta técnica a nivel de laboratorio, este estudio sienta las bases para futuras aplicaciones a escala piloto y de campo, promoviendo una gestión ambiental más verde y resiliente.

Capítulo 3

El andamiaje experimental: diseño, instrumentación y protocolos para el análisis de fitorremediación

Metodología experimental: un enfoque sistemático para evaluar la fitorremediación

El núcleo de la presente investigación se sustentó en un enfoque experimental meticuloso, diseñado para cuantificar con precisión la capacidad de *Zea mays* para absorber y acumular plomo y hierro en condiciones de laboratorio controladas. Para ello, se procedió a la preparación artificial de muestras de suelo, las cuales fueron enriquecidas con soluciones específicas de nitrato de plomo y sulfato de hierro para alcanzar concentraciones predeterminadas de 10, 25 y 50 partes por millón (ppm) de cada metal. Este rango de concentraciones permite simular diversos escenarios de contaminación, desde niveles moderados hasta altamente contaminados, ofreciendo una visión completa de la respuesta de la planta bajo distintos grados de estrés metálico. La siembra de semillas de maíz en estos suelos preparados constituyó la fase central del bioensayo, permitiendo evaluar de manera sistemática la dinámica de absorción de metales por el sistema radicular a lo largo de cinco intervalos de tiempo distintos. Este diseño metodológico no solo busca confirmar la capacidad de fitoextracción del maíz, sino también elucidar cómo variables críticas como la concentración inicial del contaminante y el tiempo de exposición influyen en la eficiencia del proceso de remediación.

Preparación de muestras y caracterización de materiales: la base de la experimentación controlada

La integridad del estudio dependió en gran medida de la preparación rigurosa y estandarizada de las muestras de suelo. Cada unidad experimental consistió en 2 kg de suelo, el cual fue homogeneizado y contaminado de manera controlada con las soluciones metálicas, garantizando una distribución uniforme de los contaminantes. En total, se prepararon 45 muestras independientes, una cifra que surge de la combinación de los tres niveles de concentración, los cinco tiempos de contacto y la inclusión de tres réplicas por tratamiento, un elemento fundamental para asegurar la robustez estadística de los resultados posteriores. La elección de nitrato de

plomo y sulfato de hierro como fuentes de contaminación se basó en su alta solubilidad en agua, lo que facilita su incorporación homogénea al sustrato y asegura una biodisponibilidad inicial elevada para las plantas. Paralelamente, se implementó un estricto protocolo de seguridad que incluyó el uso de guantes de nitrilo, mascarillas para vapores tóxicos, mandiles de laboratorio y lentes de seguridad, mitigando así cualquier riesgo de exposición durante la manipulación de los reactivos químicos y las muestras contaminadas.

La fase experimental requirió de una amplia gama de materiales de vidriería y reactivos de alta pureza para garantizar la precisión en todas las mediciones. Entre los elementos más críticos se encontraron las probetas y pipetas graduadas para la dosificación volumétrica exacta de las soluciones, los vasos de precipitación y matraces Erlenmeyer para la preparación y mezcla de los sustratos, y las fiolas aforadas para la estandarización de las concentraciones de las soluciones madre. La instrumentación desempeñó un papel igualmente crucial; la balanza analítica Sartorius Cube, con una sensibilidad de 0,1 mg, permitió realizar pesadas de una exactitud extrema, fundamental para la preparación de soluciones estándar y el pesaje de muestras de planta y suelo. El espectrofotómetro de absorción atómica, marca Agilent Technologies modelo 240FS, constituyó el equipo analítico central, ya que su alta sensibilidad y selectividad son ideales para la cuantificación de metales traza en matrices complejas como tejidos vegetales y suelos. Complementariamente, el pH-metro Jenway 3510 se empleó para monitorear y ajustar el pH de las soluciones y suelos, una variable crítica que influye directamente en la solubilidad, movilidad y, por ende, en la biodisponibilidad de los metales pesados para la planta.

Arquitectura del diseño experimental y contexto de ejecución

El desarrollo experimental se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio Químico Metalúrgico “EL TRÉBOL” S.A.C., ubicado en el Parque Industrial de Trujillo, región La Libertad. La elección de este centro especializado no fue arbitraria, sino que respondió a la necesidad de contar con infraestructura que cumpliera con los estándares de bioseguridad reque-

ridos para manipular contaminantes y con la instrumentación analítica de alta gama necesaria para obtener datos confiables. Para responder a la pregunta de investigación de manera robusta, se adoptó un diseño factorial completamente al azar (DCA), una estructura que permite analizar simultáneamente el efecto de dos o más factores y sus interacciones. En este caso, los factores investigados fueron la concentración de metales pesados (con tres niveles: 10, 25 y 50 ppm) y el tiempo de contacto o crecimiento de la planta (con cinco niveles: 30, 45, 60, 75 y 90 días).

La combinación de estos factores generó un total de 15 tratamientos experimentales únicos. La inclusión de tres réplicas para cada una de estas 15 combinaciones, totalizando las 45 muestras mencionadas, es una práctica metodológica esencial que permite estimar la variabilidad experimental y conferir potencia estadística a los análisis. Este diseño factorial es particularmente poderoso porque no solo permite determinar si cada factor individual (concentración o tiempo) tiene un efecto significativo sobre la absorción de metales, sino que también posibilita investigar si existe una interacción significativa entre ellos. Por ejemplo, permite discernir si el efecto de aumentar el tiempo de contacto sobre la acumulación de plomo es diferente dependiendo de la concentración inicial de este metal en el suelo. El análisis de estos efectos simples y de interacción se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) factorial, una herramienta estadística que descompone la variabilidad total de los datos en componentes atribuibles a cada factor y a su interacción, determinando así su significancia estadística y proporcionando una comprensión profunda y multifacética del fenómeno de fitorremediación en estudio.

Tabla 1. Diseño experimental para fitoextracción de plomo

| Tratamiento | Concentración de plomo en suelo (mg/Kg) | Tiempo de Contacto (días) | Concentración de Pb Absorbido (mg/Kg) | Nº de réplicas |
|-------------|---|---------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 1 | | 30 | Cod. Pb50-30 | 3 |
| 2 | | 45 | Cod. Pb50-45 | 3 |
| 3 | 50 | 60 | Cod. Pb50-60 | 3 |
| 4 | | 75 | Cod. Pb50-75 | 3 |
| 5 | | 90 | Cod. Pb50-90 | 3 |
| 1 | | 30 | Cod. Pb25-30 | 3 |
| 2 | | 45 | Cod. Pb25-45 | 3 |
| 3 | 25 | 60 | Cod. Pb25-60 | 3 |
| 4 | | 75 | Cod. Pb25-75 | 3 |
| 5 | | 90 | Cod. Pb25-90 | 3 |
| 1 | | 30 | Cod. Pb10-30 | 3 |
| 2 | | 45 | Cod. Pb10-45 | 3 |
| 3 | 10 | 60 | Cod. Pb10-60 | 3 |
| 4 | | 75 | Cod. Pb10-75 | 3 |
| 5 | | 90 | Cod. Pb10-90 | 3 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Muestras preparadas previamente para análisis en base a 2kg de muestra inicial.

Tabla 2 Absorción de hierro en *Zea mays*

| Tratamiento | Concentración de fierro en suelo (mg/Kg) | Tiempo de Contacto (días) | Concentración de Fe Absorbido (mg/Kg) | Nº de réplicas |
|-------------|--|---------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 1 | | 30 | Cod. Fe50-30 | 3 |
| 2 | | 45 | Cod. Fe50-45 | 3 |
| 3 | 50 | 60 | Cod. Fe50-60 | 3 |
| 4 | | 75 | Cod. Fe50-75 | 3 |
| 5 | | 90 | Cod. Fe50-90 | 3 |
| 1 | | 30 | Cod. Fe25-30 | 3 |
| 2 | | 45 | Cod. Fe25-45 | 3 |
| 3 | 25 | 60 | Cod. Fe25-60 | 3 |
| 4 | | 75 | Cod. Fe25-75 | 3 |
| 5 | | 90 | Cod. Fe25-90 | 3 |
| 1 | | 30 | Cod. Fe10-30 | 3 |
| 2 | | 45 | Cod. Fe10-45 | 3 |
| 3 | 10 | 60 | Cod. Fe10-60 | 3 |
| 4 | | 75 | Cod. Fe10-75 | 3 |
| 5 | | 90 | Cod. Fe10-90 | 3 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Muestras preparadas previamente para análisis en base a 2kg de muestra inicial.

El marco metodológico: naturaleza y enfoque de la investigación

Fundamentos y carácter aplicado del estudio

La presente investigación se configura metodológicamente como un estudio de carácter aplicado, lo que significa que su propósito fundamental trasciende la mera comprensión teórica del fenómeno para orientarse hacia la solución de un problema ambiental concreto. El conocimiento generado no pretende quedarse en el ámbito académico, sino que está destinado a ser implementado en estrategias prácticas de remediación de suelos impactados por actividades mineras e industriales. Esta orientación aplicada responde a la necesidad urgente de desarrollar tecnologías de W<W-descontaminación que sean tanto efectivas como económicamente viables, particularmente en contextos de países en desarrollo donde los costos de las técnicas de remediación convencionales resultan prohibitivos. La evaluación rigurosa de la capacidad de *Zea mays* para absorber metales pesados busca, por tanto, proporcionar un sustento científico sólido para su implementación en programas de rehabilitación ambiental, ofreciendo una alternativa sostenible y ecológica a los métodos tradicionales que suelen ser más invasivos y costosos. Este enfoque aplicado conecta directamente con las necesidades sociales y ambientales de comunidades afectadas por la contaminación de suelos, buscando transformar el conocimiento científico en acción concreta y beneficios tangibles.

Arquitectura experimental y enfoque cuantitativo

La investigación se estructura bajo un diseño experimental puro, caracterizado por la manipulación deliberada y sistemática de variables independientes en condiciones controladas de laboratorio. Esta elección metodológica permite establecer relaciones de causalidad entre los factores investigados y la respuesta observada en la planta, lo que constituye la mayor fortaleza de este tipo de abordaje. Específicamente, se implementa un diseño factorial 3x5 con réplicas, donde se manipulan dos factores principales: la concentración de metales pesados (con tres niveles: 10, 25

y 50 ppm) y el tiempo de contacto (con cinco niveles: 30, 45, 60, 75 y 90 días). Esta configuración experimental permite no solo examinar el efecto individual de cada factor, sino también investigar sus interacciones, es decir, determinar si el efecto del tiempo sobre la absorción de metales varía significativamente según la concentración inicial presente en el suelo. La inclusión de réplicas para cada combinación factorial garantiza la robustez estadística de los resultados y permite estimar la variabilidad experimental, proporcionando así una base sólida para las inferencias que se deriven del estudio.

Desde la perspectiva temporal, la investigación adopta un carácter longitudinal, ya que realiza mediciones secuenciales a lo largo de un período extendido que abarca cinco momentos distintos de evaluación. Este enfoque temporal es esencial para capturar la dinámica del proceso de fitoextracción, permitiendo trazar curvas de acumulación de metales en los tejidos vegetales e identificar posibles patrones de saturación o cambios en la eficiencia de absorción según la etapa de desarrollo de la planta. La naturaleza de los datos generados es estrictamente cuantitativa, basándose en mediciones numéricas precisas de concentraciones metálicas en suelo y tejidos vegetales, porcentajes de absorción, índices de biomasa y otros parámetros mensurables. Esta cuantificación sistemática permite la aplicación de análisis estadísticos robustos, particularmente el análisis de varianza (ANOVA), para determinar la significancia estadística de los efectos observados y establecer conclusiones objetivas y generalizables dentro de los parámetros experimentales establecidos. La combinación de estos elementos metodológicos—el diseño factorial, el seguimiento longitudinal y el análisis cuantitativo—constituye un marco integral y riguroso para abordar las preguntas de investigación planteadas.

Síntesis Metodológica y Relevancia del Enfoque

La articulación coherente de estos enfoques metodológicos—aplicado, experimental, longitudinal y cuantitativo—constituye un marco de investigación sólido y apropiado para los objetivos planteados. Esta triangulación metodológica no solo garantiza la generación de datos confiables y válidos

sobre la capacidad fitorremediadora de *Zea mays*, sino que también asegura que los hallazgos obtenidos tengan una aplicabilidad directa en la solución de problemas ambientales reales. El diseño factorial implementado, en particular, representa una elección metodológica sofisticada que permite desentrañar las complejas interacciones entre el tiempo de exposición y la concentración de contaminantes, proporcionando así descubrimientos valiosos para optimizar futuras aplicaciones de fitorremediación en campo. La robustez estadística conferida por el diseño con réplicas y el análisis cuantitativo riguroso otorgan a los resultados un alto grado de confiabilidad, sentando las bases para recomendaciones técnicas bien fundamentadas. En última instancia, este marco metodológico integral no solo busca responder preguntas específicas sobre la eficacia del maíz en la absorción de metales, sino que también contribuye al desarrollo de protocolos estandarizados para la evaluación de especies fitorremediadoras, ampliando así el arsenal de herramientas disponibles para la gestión ambiental sostenible.

Parámetros del estudio: definición y operacionalización

Las variables consideradas en la investigación, junto con su definición conceptual y operacional, se presentan sistemáticamente en la Tabla 3. Esta tabulación permite visualizar de manera integral los constructos teóricos y su correspondiente medición empírica, estableciendo los parámetros fundamentales que guiarán el proceso de recolección y análisis de datos. La tabla especifica tanto las variables independientes que serán manipuladas experimentalmente como las variables dependientes que serán medidas para evaluar los efectos de dicha manipulación, proporcionando así un marco de referencia completo para la operacionalización de los conceptos de estudio.

Tabla 3. Parámetros de investigación

| Tipo de variable | Variable Unidades | Definición | |
|-------------------------|--|--|-------|
| Independiente | Concentración de Plomo y hierro en suelo | Es la cantidad de plomo y hierro que está presente en una determinada masa de suelo. Dependiendo de la cantidad influye en la toxicidad del suelo. | mg/kg |
| | Tiempo de contacto | Es el periodo durante el cual el suelo contaminado con plomo y hierro interactúa con la planta <i>Zea mays</i> en el proceso de absorción de metales | Días |
| Dependiente | Absorción de plomo y hierro | Reducción de la concentración de Pb y Fe en el suelo por la absorción de la planta <i>Zea mays</i> | % |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Protocolo experimental: evaluación de la eficacia fitorremediadora de *Zea mays*

Preparación del sustrato y establecimiento del experimento

El procedimiento experimental se inició con la meticulosa preparación del sustrato que serviría como matriz de contaminación controlada. Para garantizar la homogeneidad y eliminar variables de confusión, se recolectaron muestras de suelo de una zona certificada como no contaminada, las cuales fueron sometidas a un proceso de tamizado para remover materiales extraños como raíces, piedras y materia orgánica gruesa. Posteriormente, se procedió a la contaminación artificial del suelo mediante la adición de soluciones estándar de nitrato de plomo ($Pb(NO_3)_2$) y sulfato de hierro ($FeSO_4$), buscando alcanzar concentraciones específicas de 10, 25 y 50 partes por millón (ppm) para cada metal. Esta elección de concentraciones permite simular un gradiente de contaminación que abarca desde niveles moderados hasta altamente contaminados, proporcionando así una visión comprehensiva de la respuesta de la planta bajo distintos escenarios de estrés metálico. La mezcla se realizó de manera exhaustiva mediante homogeneización mecánica, tras lo cual el material se dejó en

reposo durante 24 horas para facilitar la estabilización química y asegurar una distribución uniforme de los metales a lo largo de la matriz del suelo, un paso crucial para la validez interna del experimento.

Una vez preparado el sustrato contaminado, se procedió al establecimiento del cultivo experimental. Se utilizaron macetas de capacidad uniforme, cada una conteniendo exactamente 2 kg de suelo con las concentraciones preestablecidas de metales. En cada una de estas macetas se sembraron semillas de *Zea mays* previamente seleccionadas por su uniformidad en tamaño y apariencia, garantizando así condiciones de partida equivalentes para todas las unidades experimentales. El protocolo de siembra se estandarizó minuciosamente, controlando variables como la profundidad de siembra y la densidad de plantas por maceta. Las condiciones ambientales se mantuvieron rigurosamente controladas a lo largo de todo el experimento, con un régimen de riego estandarizado que utilizó exclusivamente agua destilada para evitar la introducción de metales extraños, manteniendo así condiciones constantes de humedad y temperatura que permitieron atribuir las variaciones observadas exclusivamente a los tratamientos experimentales aplicados.

Análisis de muestras y procesamiento de datos

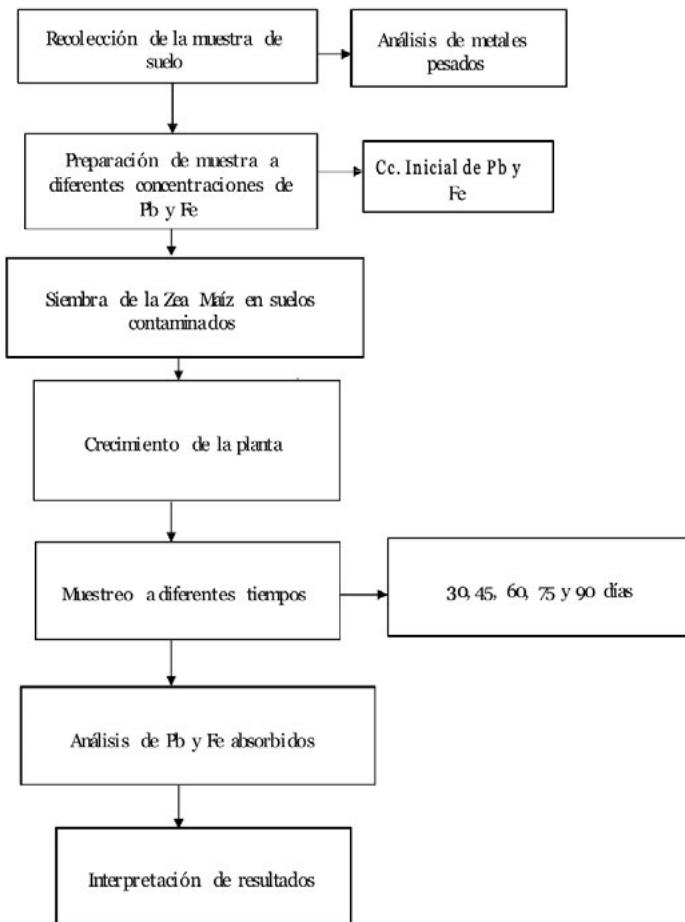
El monitoreo del experimento se realizó mediante un esquema de muestreo destructivo en cinco intervalos temporales predefinidos: 30, 45, 60, 75 y 90 días. Esta estrategia longitudinal permitió capturar la dinámica temporal del proceso de fitoextracción y construir curvas de acumulación metálica a lo largo del ciclo de crecimiento de la planta. En cada uno de estos tiempos de cosecha, se recolectaron muestras pareadas de suelo y tejido vegetal (específicamente raíces y parte aérea) de macetas designadas exclusivamente para ese propósito. Las muestras vegetales fueron sometidas a un proceso de secado en dos etapas: primero a temperatura ambiente durante 12 horas para eliminar la humedad superficial, seguido de un secado en estufa a 50°C hasta peso constante, preservando de este modo la integridad de los compuestos orgánicos mientras se eliminaba completamente el agua tisular.

Para la cuantificación de metales, las muestras secas fueron procesadas mediante digestión ácida con ácido nítrico concentrado en condiciones de reflujo, un método que asegura la liberación completa de los metales de la matriz biológica y su conversión a formas solubles adecuadas para el análisis instrumental. Las concentraciones de plomo y hierro en los digeridos resultantes se determinaron mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS), una técnica analítica de alta sensibilidad y selectividad ampliamente validada para la determinación de elementos traza en matrices ambientales. La eficiencia del proceso de fitorremediación se cuantificó calculando el porcentaje de absorción mediante la fórmula estandarizada: Absorción (%) = $(C_f / C_i) \times 100$, donde C_i representa la concentración inicial del metal en el suelo y C_f corresponde a la concentración final acumulada en los tejidos de la planta. Este cálculo proporciona una medida directa de la eficiencia de translocación metálica desde el suelo hacia la biomasa vegetal.

Validación estadística y significado metodológico

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) factorial, diseñado específicamente para evaluar la influencia individual y conjunta del tiempo de contacto y la concentración inicial de metales en la eficiencia de remoción de plomo y hierro. Este abordaje analítico no solo permite determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, sino que también posibilita investigar las interacciones entre los factores experimentales, es decir, si el efecto del tiempo sobre la absorción varía según la concentración inicial del metal en el suelo. La implementación de este protocolo experimental integral, representado esquemáticamente en la Figura 1 que ilustra el diagrama de flujo del proceso, proporciona un marco metodológico robusto y reproducible para la evaluación de especies fitorremediadoras. La combinación de controles experimentales estrictos, técnicas analíticas validadas y análisis estadísticos apropiados constituye un protocolo de investigación sólido que genera datos confiables sobre la capacidad de *Zea mays* para acumular metales pesados, información fundamental para el desarrollo de estrategias de biorremediación basadas en evidencia científica sólida.

Figura 1. Diagrama de flujo: Remoción de Fe y Pb



Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Capítulo 4

Dinámica de la fitoextracción: análisis de la absorción de plomo y hierro por Zea mays

Diseño del estudio de bioacumulación metálica

El presente estudio se orientó hacia la evaluación sistemática de la capacidad de *Zea mays* para absorber y acumular metales pesados, específicamente plomo (Pb) y hierro (Fe), en condiciones controladas de laboratorio. Para ello, se estableció un diseño experimental que simuló escenarios de contaminación edáfica mediante la preparación de suelos artificialmente enriquecidos con concentraciones graduadas de ambos metales, establecidas en 10, 25 y 50 partes por millón (ppm). Esta selección de concentraciones permite observar el comportamiento de la planta frente a un gradiente de contaminación que abarca desde niveles moderados hasta altamente contaminados, proporcionando así una visión integral de su respuesta fisiológica bajo distintos niveles de estrés metálico. El monitoreo del proceso de fitoextracción se realizó a lo largo de un período extenso, con mediciones secuenciales en cinco intervalos temporales predefinidos: 30, 45, 60, 75 y 90 días, lo que permitió capturar la dinámica temporal de la acumulación de metales en los tejidos vegetales. Cada condición experimental contó con tres réplicas biológicas, asegurando la robustez estadística de los resultados y permitiendo el cálculo de valores promedio representativos para cada combinación de concentración y tiempo de exposición.

Procedimiento para la Cuantificación de la Absorción de Plomo

El análisis específico de la absorción de plomo constituyó una fase crucial dentro del marco experimental general. Para ello, se implementó un protocolo estandarizado que incluyó la preparación de muestras de suelo con concentraciones iniciales precisas de plomo: 10, 25 y 50 ppm. Las plantas de *Zea mays*, cultivadas en estos sustratos contaminados, fueron sometidas a un riguroso programa de muestreo destructivo en los cinco tiempos de exposición establecidos (30, 45, 60, 75 y 90 días). En cada uno de estos puntos temporales, se recolectaron muestras de tejido vegetal, las cuales fueron procesadas mediante técnicas analíticas validadas para la cuantificación de metales. La determinación de la eficiencia del proceso de fitoextracción se realizó mediante el cálculo del porcentaje de absorción de

plomo, utilizando una fórmula estandarizada que relaciona la concentración final del metal acumulado en la biomasa vegetal con la concentración inicial presente en el suelo. Este abordaje metodológico integral no solo permite cuantificar la capacidad de acumulación del maíz, sino también analizar la cinética del proceso y determinar los períodos de máxima eficiencia en la remoción del contaminante, información fundamental para optimizar futuras aplicaciones de fitorremediación a escala real.

Con los resultados obtenidos, se calculó el porcentaje de absorción de plomo realizado por las plantas en cada etapa del experimento utilizando la siguiente formula:

$$\text{Absorción de Pb} (\%) = \left(\frac{[\text{Pb}]_{\text{fzm}}}{[\text{Pb}]_{\text{is}}} \right) * 100$$

Donde:

$[\text{Pb}]_{\text{fzm}}$: Concentración final de plomo en la planta *zea mays*

$[\text{Pb}]_{\text{is}}$: Concentración inicial de plomo en el suelo

Dinámica de fitoextracción en condiciones de alta contaminación

El análisis de la capacidad de *Zea mays* para remediar suelos con elevada concentración de plomo revela un patrón de acumulación temporal significativo. Partiendo de una concentración inicial de 50 ppm en el sustrato, se observó una progresión notable en la eficiencia de fitoextracción a lo largo del período experimental de noventa días. Los datos sistematizados en la Tabla 4 permiten visualizar esta trayectoria acumulativa, donde los valores cuantitativos demuestran una relación directamente proporcional entre el tiempo de exposición y el porcentaje de metal absorbido por los tejidos vegetales. Este comportamiento sugiere que los mecanismos fisiológicos de la planta, posiblemente relacionados con la exudación radicular y los transportadores de membrana, se mantienen funcionales incluso frente a concentraciones potencialmente tóxicas del metal. La tabulación metodológica de los resultados incluye tanto las concentraciones

específicas de plomo detectadas en la biomasa vegetal como los porcentajes de absorción calculados para cada intervalo temporal, estableciendo así una base de datos robusta para el análisis comparativo entre los diferentes tratamientos. Esta aproximación cuantitativa resulta fundamental para establecer los parámetros óptimos de tiempo de cultivo requeridos para maximizar la eficiencia del proceso de fitorremediación en escenarios de contaminación severa.

Tabla 4. Absorción de Pb por *Zea mays*: 50 ppm

| Tiempo de absorción (días) | Concentración de Pb (ppm) | Absorción de Pb (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 30 | 6,3207 | 12,64 |
| 45 | 13,1663 | 26,33 |
| 60 | 17,5937 | 35,19 |
| 75 | 28,1537 | 56,31 |
| 90 | 33,6140 | 67,23 |

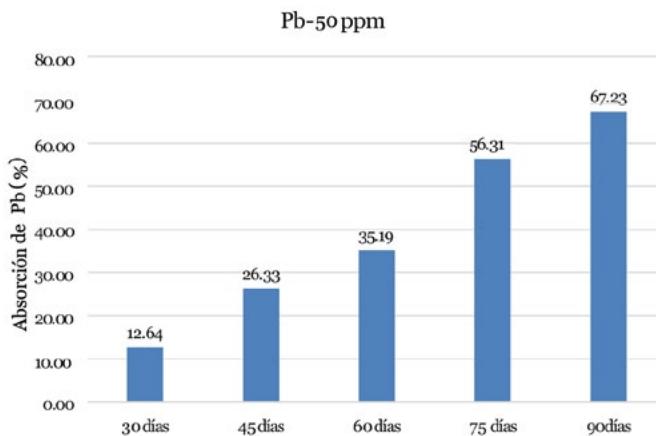
Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Los valores representan el promedio de tres réplicas por tratamiento. La absorción fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica

La Tabla 4 documenta cuantitativamente el proceso de bioacumulación de plomo (Pb) en *Zea mays* cultivada en sustratos con una concentración inicial de 50 ppm, evaluado secuencialmente durante cinco intervalos temporales (30, 45, 60, 75 y 90 días). Los resultados demuestran una progresión temporal consistente en ambos parámetros medidos: la concentración específica de metal acumulado en tejidos vegetales y el porcentaje de eficiencia de fitoextracción. Durante la fase inicial de 30 días, se registró una absorción de 6.3207 ppm, equivalente al 12.64% del metal disponible, mientras que al término del experimento (90 días) se alcanzó un máximo de 33.6140 ppm, representando el 67.23% del plomo inicialmente presente en el suelo. Esta trayectoria acumulativa evidencia la capacidad de la planta para mantener una actividad extractiva sostenida incluso frente a concentraciones elevadas del contaminante. La confiabilidad metrológica

de los datos está sustentada por la metodología analítica empleada (espectrofotometría de absorción atómica) y la validación estadística mediante triple réplica experimental, asegurando la robustez de las observaciones registradas en condiciones controladas de laboratorio.

Figura 2. Absorción temporal de Pb (50 ppm) en *Zea mays*



Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

La representación gráfica evidencia una correlación directamente proporcional entre la duración de la exposición y la eficiencia de bioacumulación de plomo (Pb) en *Zea mays* bajo condiciones de 50 ppm de concentración inicial. El análisis de la curva de absorción revela un punto de inflexión significativo alrededor del día 60, donde se produce una notable intensificación en la cinética de acumulación del metal. Este patrón sugiere que la planta no solo mantiene capacidad de fitoextracción durante las fases iniciales, sino que optimiza progresivamente sus mecanismos de absorción a medida que se extiende el período de exposición, probablemente como resultado del desarrollo radicular y la activación de procesos de adaptación metabólica al estrés por metales pesados.

El intervalo comprendido entre los días 60 y 75 muestra el gradiente de aumento más pronunciado, indicando una fase crítica en la respuesta

fisiológica de la planta donde se maximiza la eficiencia de captación del contaminante. Al culminar el período experimental (día 90), se registra un pico de eficiencia del 67.23%, valor particularmente significativo si se considera la elevada concentración inicial del metal en el sustrato. Estos hallazgos respaldan sólidamente la idoneidad de *Zea mays* como especie fitorremediadora en suelos con alta carga contaminante de plomo, al mismo tiempo que subrayan la relevancia del factor temporal como parámetro determinante para optimizar los procesos de descontaminación mediante estrategias de fitoextracción.

Bioacumulación de plomo en maíz: eficiencia a 25 ppm

El análisis de *Zea mays* bajo 25 ppm de plomo revela patrones temporales de bioacumulación cruciales para optimizar protocolos de remediación. Los resultados sistematizados muestran una relación directamente proporcional entre el tiempo de exposición y la eficiencia de absorción del metal, evidenciando la adaptación fisiológica de la planta al estrés metálico. Esta concentración intermedia representa condiciones realistas en suelos impactados, donde la especie activa mecanismos de tolerancia sin sufrir fitotoxicidad severa. La progresión temporal documentada sugiere la inducción gradual de mecanismos detoxificadores, posiblemente mediante fitochelatinas y ligandos especializados, que permiten la inmovilización progresiva del contaminante en tejidos vegetales.

Tabla 5. Absorción de Pb (25 ppm) en *Zea mays*

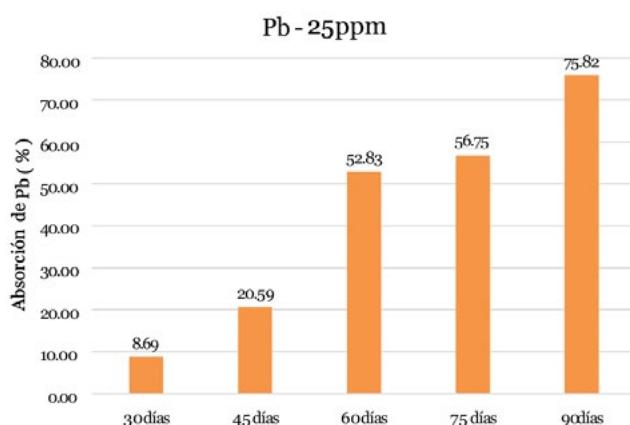
| Tiempo de absorción (días) | Concentración de Pb (ppm) | Absorción de Pb (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 30 | 2,1715 | 8,69 |
| 45 | 5,1464 | 20,33 |
| 60 | 13,2068 | 52,83 |
| 75 | 14,1874 | 56,75 |
| 90 | 18,9550 | 75,82 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Los valores representan el promedio de tres réplicas por tratamiento. La absorción fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica

La Tabla 5 sistematiza los datos de bioacumulación de plomo (Pb) en Zea mays cultivada en suelos con concentración inicial de 25 ppm, monitoreada durante cinco intervalos temporales (30, 45, 60, 75 y 90 días). Los resultados revelan una clara tendencia ascendente en la concentración de metal acumulado, directamente proporcional al tiempo de exposición. Durante la fase inicial (30 días), se cuantificó una absorción limitada de 2.1715 ppm, equivalente al 8.69% del metal disponible. Este valor experimentó un incremento sostenido hasta alcanzar su máximo de 18.9550 ppm (75.82%) al final del período experimental. El análisis temporal identifica un punto de inflexión crítico alrededor del día 60, donde la eficiencia de fitoextracción supera el 50% de remoción, sugiriendo la activación de mecanismos fisiológicos más eficaces en la planta para enfrentar el estrés metálico. La reproducibilidad de los datos está garantizada por el promediado de tres réplicas experimentales, mientras que la confiabilidad analítica se sustenta en la cuantificación mediante espectrofotometría de absorción atómica, técnica ampliamente validada para determinaciones de metales traza en matrices biológicas.

Figura 3. Cinética de absorción de Pb en *Zea mays* (25 ppm)



Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

El análisis gráfico correspondiente a la concentración inicial de 25 ppm de plomo (Pb) revela que Zea mays desarrolló una respuesta fitoextractora notablemente eficiente, caracterizada por una cinética de absorción más acelerada en comparación con el tratamiento de 10 ppm. Esta diferencia en la velocidad de acumulación sugiere la activación de mecanismos fisiológicos más intensos en el sistema radicular, probablemente inducidos por la mayor biodisponibilidad del metal en el sustrato. Durante la fase inicial de 30 días, se documentaron porcentajes de absorción intermedios que experimentaron una transición significativa a partir del día 60, superando el 60% de remoción alrededor del día 75. Este patrón de comportamiento indica que la planta no solamente presenta tolerancia a concentraciones moderadas de plomo, sino que además mantiene una capacidad de bioacumulación progresivamente activa durante períodos de exposición prolongados. Los resultados obtenidos concuerdan con los hallazgos de Jiménez-Machuca et al. (2023), quienes reportaron una respuesta similar del maíz frente a concentraciones intermedias de metales pesados en condiciones experimentales controladas. La estabilización observada hacia el final del período experimental (día 90) podría reflejar una saturación progresiva de los sitios de almacenamiento metálico en los tejidos radicales, fenómeno frecuentemente documentado en procesos de fitoextracción de larga duración.

Bioacumulación de Plomo en Maíz: Eficiencia a 10 ppm

Para determinar la absorción de plomo (Pb) por parte de la planta Zea mays en suelos con una concentración inicial de 10 ppm, se elaboró la Tabla 6. En ella se presentan los resultados obtenidos en los distintos tiempos de exposición (30, 45, 60, 75 y 90 días), así como el porcentaje de absorción de plomo alcanzado por la planta en cada etapa del tratamiento

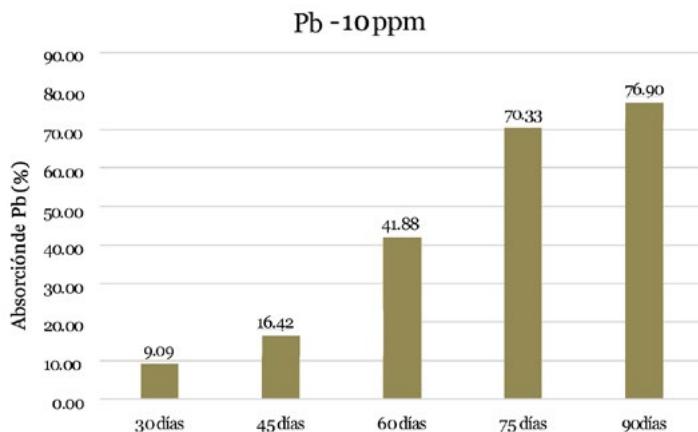
Tabla 6. Absorción de Pb (10 ppm) en *Zea mays*

| Tiempo de absorción (días) | Concentración de Pb (ppm) | Absorción de Pb (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 30 | 0,9091 | 8,69 |
| 45 | 1,6416 | 20,33 |
| 60 | 4,1875 | 52,83 |
| 75 | 7,0330 | 56,75 |
| 90 | 7,6902 | 75,82 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Los valores representan el promedio de tres réplicas por tratamiento. La absorción fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica

Bajo una concentración inicial de 10 ppm de plomo (Pb), *Zea mays* exhibió un patrón de bioacumulación progresivo y temporalmente dependiente. La eficiencia de absorción mostró una trayectoria ascendente a lo largo del experimento, iniciando con un 8,69% a los 30 días y aumentando al 20,33% para el día 45. A partir de la séptima semana se registró una aceleración significativa en la tasa de acumulación, alcanzando valores de 52,83% y 56,75% en los días 60 y 75, respectivamente, hasta culminar con un máximo de 75,82% al final del período de observación (día 90). Esta secuencia temporal revela una dinámica de fitoextracción acumulativa y sostenida, donde la planta incrementa sistemáticamente su capacidad de absorción del metal. El comportamiento observado valida el potencial de *Zea mays* como especie fitoextractora efectiva en suelos con niveles moderados de contaminación por plomo, demostrando una notable adaptación fisiológica que se manifiesta en una creciente eficiencia de remoción durante su ciclo de crecimiento.

Figura 4. Cinética de absorción de Pb en *Zea mays* (10 ppm)

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

El análisis gráfico de los datos correspondientes a la concentración inicial de 10 ppm demuestra que *Zea mays* desarrolla una capacidad de bioacumulación progresivamente eficiente frente al plomo (Pb) a medida que transcurre el tiempo de exposición. Durante la fase inicial (día 30), se registró una absorción moderada del 8,69%, la cual experimentó un incremento sostenido hasta alcanzar un pico de eficiencia del 75,82% al final del período experimental (día 90). Esta curva de acumulación sugiere que los mecanismos de fitoextracción de la planta requieren un período de exposición prolongado para manifestar su máxima capacidad de remoción. El marcado incremento observado entre los días 45 y 60, seguido de una fase de estabilización relativa, parece indicar la existencia de una ventana temporal óptima donde la actividad radicular y los procesos fisiológicos de la planta convergen para maximizar la captación del metal. Estos hallazgos son consistentes con lo documentado por Rojas et al. (2021) y Altamirano y Gámez (2022), quienes identificaron el desarrollo del sistema radicular como un determinante fundamental en la eficacia fitorremediadora de *Zea mays*. La significativa remoción final obtenida (75,82%) corrobora el potencial de esta especie como fitoextractora en ambientes con baja carga contaminante, sustentando su implementación en programas de remediación para suelos con contaminación leve a moderada.

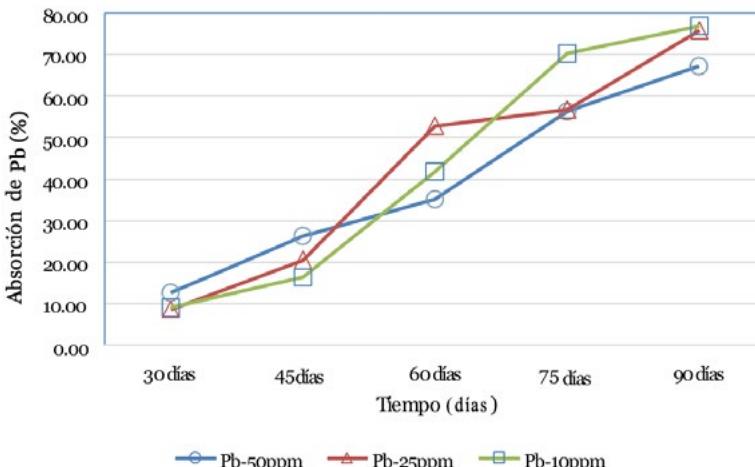
Efecto de la Concentración Inicial en la Bioacumulación de Plomo

Con la finalidad de caracterizar la respuesta de *Zea mays* ante gradientes de contaminación por plomo (Pb), se realizó un análisis comparativo de los datos de bioacumulación obtenidos en los tratamientos con concentraciones iniciales de 10, 25 y 50 ppm. Esta aproximación metodológica permite establecer correlaciones entre la carga contaminante del sustrato y la eficiencia del proceso de fitoextracción, además de identificar variaciones significativas en los patrones cinéticos de absorción y en el rendimiento acumulativo de la planta durante el ciclo experimental. La sistematización de estos análisis comparativos se presenta de manera integral en la Tabla 7, que organiza los datos de manera que facilita la identificación de tendencias y el establecimiento de relaciones dosis-respuesta en el sistema planta-metal.

Tabla 7. Porcentaje de absorción de Pb por *Zea mays* vs concentración inicial

| Tiempo (días) | 10 ppm (%) | 25 ppm (%) | 50 ppm (%) |
|---------------|------------|------------|------------|
| 30 | 9,09 | 8,69 | 12,64 |
| 45 | 16,42 | 20,59 | 26,33 |
| 60 | 41,88 | 52,83 | 35,19 |
| 75 | 70,33 | 56,75 | 56,31 |
| 90 | 76,90 | 75,82 | 67,23 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Figura 5. Absorción de Pb en *Zea mays* vs tiempo

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Los hallazgos demuestran que *Zea mays* presenta una notable capacidad de bioacumulación de plomo (Pb), cuya eficiencia está determinada por la concentración inicial del metal y el tiempo de exposición. El tratamiento con 10 ppm registró la mayor eficiencia relativa (76.90% a 90 días), mientras que en concentraciones superiores (25 y 50 ppm) se mantuvieron altos porcentajes de absorción, aunque con cierta desaceleración en fases avanzadas. Estos patrones concuerdan con Jiménez-Machuca et al. (2023), quienes documentaron una remoción dependiente de la concentración y tiempo de contacto en drenajes ácidos de mina, mientras que Altamirano y Gámez (2022) atribuyen esta eficiencia al rápido desarrollo radicular del maíz, consistentemente observado a partir del día 45 en nuestro estudio. La evidencia obtenida valida a *Zea mays* como una alternativa viable y económica para programas de fitoremediaciόn en suelos con diversos niveles de contaminación por plomo.

Bioacumulación de Hierro en Suelos Mediante *Zea mays*

El estudio de la capacidad fitoextractora de *Zea mays* para hierro (Fe) se realizó mediante un diseño experimental que contempló tres concentraciones iniciales del metal (50, 25 y 10 ppm) en muestras de suelo artificialmente contaminado. El monitoreo de la bioacumulación se efectuó mediante análisis secuenciales del contenido de hierro en tejidos vegetales durante cinco intervalos temporales establecidos (30, 45, 60, 75 y 90 días). La cuantificación de la eficiencia del proceso de fitorremediación se determinó mediante el cálculo del porcentaje de absorción metálica, aplicando la siguiente relación matemática que permite establecer la proporción del metal transferido desde el suelo hacia la biomasa vegetal:

$$\text{Absorción de Fe} (\%) = \left(\frac{[\text{Fe}]_{\text{fzm}}}{[\text{Fe}]_{\text{is}}} \right) * 100$$

Donde:

$[\text{Fe}]_{\text{fzm}}$: Concentración final de fierro en la planta *zea mays*

$[\text{Fe}]_{\text{is}}$: Concentración inicial de fierro en el suelo

Bioacumulación de hierro en *zea mays*: eficiencia a 50 ppm

Para cuantificar la bioacumulación de hierro (Fe) en *Zea mays* cultivada en sustratos con 50 ppm de concentración inicial, se diseñó la Tabla 8. Esta sistematiza los valores de absorción metálica registrados en los diferentes intervalos temporales del experimento, incluyendo los porcentajes de eficiencia fitoextractora alcanzados por la planta en cada período de exposición evaluado.

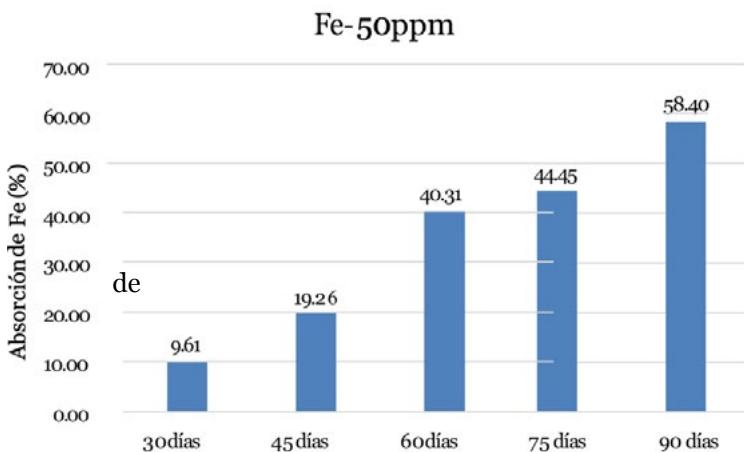
Tabla 8. Absorción de Fe en *Zea mays* (50 ppm)

| Tiempo de absorción (días) | Concentración de Fe (ppm) | Absorción de Fe (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 30 | 4,8054 | 9,61 |
| 45 | 9,6321 | 19,26 |
| 60 | 20,1559 | 40,31 |
| 75 | 22,2244 | 44,45 |
| 90 | 29,2004 | 58,40 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Los valores representan el promedio de tres réplicas por tratamiento. La absorción fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica

La Tabla 8 documenta el proceso de bioacumulación de hierro (Fe) en *Zea mays* cultivada en sustratos con una concentración inicial de 50 ppm, evaluado de manera secuencial durante cinco intervalos temporales (30, 45, 60, 75 y 90 días). Los resultados demuestran una progresión temporal consistente en ambos parámetros evaluados: la concentración específica de metal acumulado en tejidos vegetales y el porcentaje de eficiencia de fitoextracción. Durante la fase inicial de 30 días, se registró una absorción de 4.8054 ppm, equivalente al 9.61% del hierro disponible, mientras que al término del experimento (90 días) se alcanzó un máximo de 29.2004 ppm, representando el 58.40% del metal inicialmente presente en el suelo. La confiabilidad analítica de los datos está sustentada por la metodología empleada (espectrofotometría de absorción atómica) y la validación estadística mediante triple réplica experimental, asegurando la robustez de las observaciones registradas en condiciones controladas de laboratorio.

Figura 6. Cinética de absorción de Fe en *Zea mays* (50 ppm)

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Bajo una concentración inicial de 50 ppm de hierro (Fe), *Zea mays* demostró una capacidad de bioacumulación progresiva y temporalmente dependiente. La eficiencia de absorción mostró una trayectoria ascendente a lo largo del experimento, iniciando con 9.61% a los 30 días y duplicándose a 19.26% para el día 45. El período comprendido entre los días 45 y 60 representó la fase de máxima actividad fitoextractora, alcanzando 40.31% de eficiencia, posiblemente asociado al desarrollo del sistema radicular y la mayor biodisponibilidad del metal en el sustrato. Posteriormente, la planta mantuvo una tasa de acumulación sostenida, registrando 44.45% a los 75 días y culminando con 58.40% al final del período experimental. Este patrón de respuesta fisiológica eficiente y continua, sin manifestaciones de fitotoxicidad, coincide con los hallazgos de Quispe Banda et al. (2024), quienes documentaron altos niveles de remoción de hierro mediante biomasa vegetal en efluentes mineros, destacando el rol fundamental del sistema radical en los procesos de retención y acumulación metálica.

Bioacumulación de Hierro en *Zea mays*: Eficiencia a 25 ppm

Para cuantificar la bioacumulación de hierro (Fe) en *Zea mays* cultivada en sustratos con 25 ppm de concentración inicial, se diseñó la Tabla 9. Esta sistematiza los valores de absorción metálica registrados en los diferentes intervalos temporales del experimento, incluyendo los porcentajes de eficiencia fitoextractora correspondientes a cada período de exposición evaluado.

Tabla 9. Absorción de Fe en *Zea mays* (25 ppm)

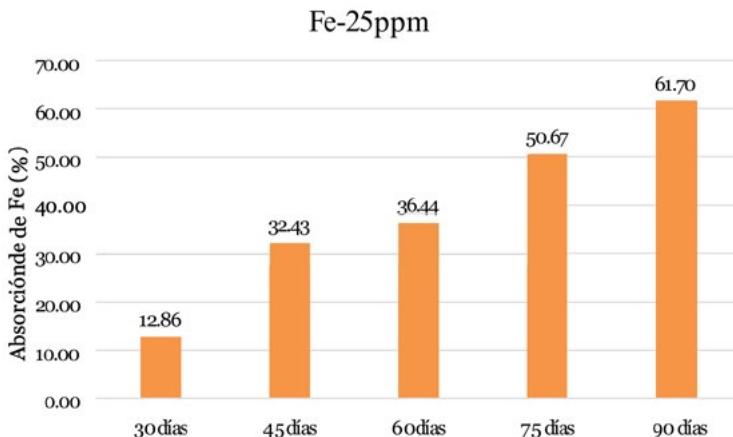
| Tiempo de absorción (días) | Concentración de Fe (ppm) | Absorción de Fe (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 30 | 3,2144 | 12,86 |
| 45 | 8,1069 | 32,43 |
| 60 | 9,1096 | 36,44 |
| 75 | 12,6675 | 50,67 |
| 90 | 15,4251 | 61,70 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Los valores representan el promedio de tres réplicas por tratamiento. La absorción fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica

La Tabla 9 presenta los resultados de la absorción de fierro (Fe) por *Zea mays* en suelos con una concentración inicial de 25 ppm, evaluada en diferentes tiempos de absorción (30, 45, 60, 75 y 90 días). Se observa una tendencia creciente en la concentración de Fe absorbido por la planta conforme se incrementa el tiempo de exposición. A los 30 días, la absorción fue relativamente baja (3,2144 ppm; 12,86%), mientras que a los 90 días se alcanzó una absorción máxima de 15,4251 ppm, equivalente al 61,70% del Fe disponible inicialmente.

A partir de los 45 días se registra un cambio notable en la eficiencia de absorción, superando el 32,43% de remoción, lo cual indica una respuesta fisiológica más activa de la planta frente al contaminante. Los datos corresponden al promedio de tres réplicas por tratamiento y fueron obtenidos mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Figura 7. Cinética de absorción de Fe en *Zea mays* (25 ppm)

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Bajo una concentración inicial de 25 ppm de hierro (Fe), *Zea mays* exhibió una notable eficiencia en la bioacumulación del metal, mostrando una progresión temporal consistente durante el período experimental de 90 días. La fase inicial (30 días) registró una absorción del 12.86%, incrementándose significativamente al 32.43% para el día 45, lo que sugiere una rápida activación de los mecanismos fisiológicos de captación y una alta biodisponibilidad del metal en la rizósfera. El proceso de fitoextracción mantuvo una trayectoria ascendente durante las etapas posteriores, alcanzando el 50.67% a los 60 días y culminando con 61.70% de eficiencia al final del experimento. Este patrón acumulativo evidencia la notable tolerancia de la planta a concentraciones intermedias de hierro y su capacidad para mantener una actividad extractiva sostenida sin manifestar síntomas de fitotoxicidad o saturación metabólica.

Los resultados obtenidos concuerdan con las observaciones de Quispe Banda et al. (2024), quienes documentaron eficiencias de remoción superiores al 60% utilizando biomasa lignocelulósica de maíz en sistemas de tratamiento de efluentes mineros. Complementariamente, Du et al. (2020) atribuyen esta capacidad de bioacumulación a la presencia de grupos funcionales específicos en los tejidos vegetales, particularmente grupos hidroxilo y carboxilo, que facilitan la complejación y posterior internalización del metal.

zación de especies metálicas como el hierro. La consistencia entre estos hallazgos independientes valida el potencial de *Zea mays* como especie fitoextractora en suelos con niveles moderados de contaminación por hierro, destacando su robustez fisiológica y versatilidad para aplicaciones en estrategias de biorremediación.

Bioacumulación de Hierro en *Zea mays*: Eficiencia a 10 ppm

Para determinar la absorción de fierro (Fe) por parte de la planta *Zea mays* en suelos con una concentración inicial de 10 ppm, se elaboró la Tabla 10. En ella se presentan los resultados obtenidos en los distintos tiempos de exposición (30, 45, 60, 75 y 90 días), así como el porcentaje de absorción de fierro alcanzado por la planta en cada etapa del tratamiento

Tabla 10. Absorción de Fe en *Zea mays* (10 ppm)

| Tiempo de absorción (días) | Concentración de Fe (ppm) | Absorción de Fe (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 30 | 0,5602 | 5,60 |
| 45 | 2,0944 | 20,94 |
| 60 | 4,2140 | 45,14 |
| 75 | 4,8713 | 48,71 |
| 90 | 6,1605 | 61,61 |

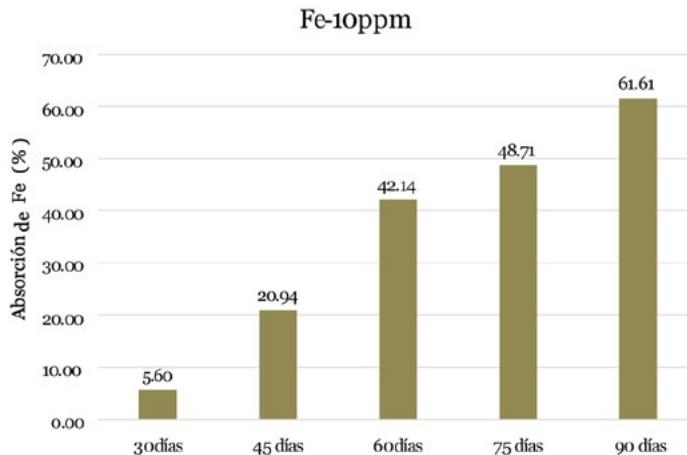
Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Nota. Los valores representan el promedio de tres réplicas por tratamiento. La absorción fue medida mediante espectrofotometría de absorción atómica

En el tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm de fierro (Fe), se observó un incremento progresivo en la absorción por parte de *Zea mays* a lo largo del tiempo. A los 30 días, la planta absorbió el 5,60 % del fierro presente en el suelo, mientras que a los 45 días la absorción se incrementó al 20,94 %. Entre los días 60 y 75 el aumento de la absorción fue relativamente bajo elevándose de 42,14% hasta 48,71%. El máximo porcentaje de absorción se alcanzó a los 90 días alcanzando un 61,61%. Estos

resultados reflejan una dinámica de absorción acumulativa y sostenida, lo que evidencia el potencial de *Zea mays* como especie fitoextractora en suelos con baja concentración de fierro

Figura 8. Cinética de absorción de Fe en *Zea mays* (10 ppm)



Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

El gráfico nos muestra que el tratamiento con una concentración inicial de 10 ppm, el *Zea mays* presenta una capacidad progresiva y eficiente para absorber fierro (Fe) del suelo a lo largo del tiempo. A pesar de tratarse de una baja concentración. A partir del día 30, se evidenció una absorción moderada (5,60 %), que se incrementó de forma sostenida hasta alcanzar un valor máximo de 61,61 % al día 90. Esta tendencia sugiere que el proceso de fitoextracción por parte de la planta requiere un tiempo de exposición prolongado para alcanzar niveles significativos de remoción.

La eficiencia de remoción alcanzada a los 90 días demuestra que *Zea mays* no requiere altas concentraciones para activar sus mecanismos de fitoabsorción, lo que la hace especialmente útil en suelos ligeramente contaminados o en procesos de recuperación de terrenos agrícolas afectados por fuentes difusas de contaminación.

Este comportamiento coincide con lo planteado por Wang et al. (2023), quienes señalaron que el hierro es más fácilmente absorbido por plantas en

su forma ferrosa (Fe^{2+}), especialmente cuando se encuentra en suelos con pH y condiciones físicas adecuadas. Asimismo, Wei et al. (2025), afirman que incluso a dosis bajas, materiales vegetales pueden alcanzar una remoción significativa cuando existe un buen contacto radicular y adecuada disponibilidad del metal.

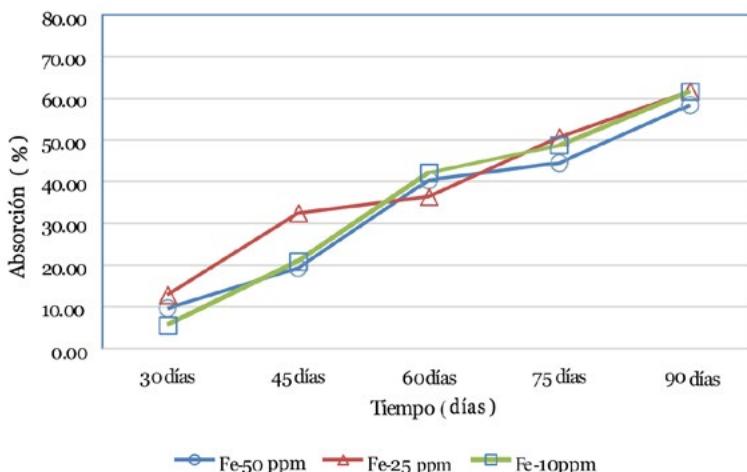
Efecto de la Concentración Inicial en la Bioacumulación de Hierro

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de *Zea mays* frente a distintos niveles de contaminación por fierro (Fe), se compararon los resultados obtenidos en los tratamientos con concentraciones iniciales de 10, 25 y 50 ppm. Esta comparación permite analizar la eficiencia del proceso de absorción en función de la carga contaminante, así como identificar posibles diferencias en la cinética de absorción y el rendimiento acumulado de la planta a lo largo del tiempo. Para ello elaboramos la Tabla 11.

Tabla 11. Eficiencia de Fitoextracción: Absorción de Fe vs Concentración Inicial

| Tiempo (días) | 10 ppm (%) | 25 ppm (%) | 50 ppm (%) |
|---------------|------------|------------|------------|
| 30 | 5,60 | 12,86 | 9,61 |
| 45 | 20,94 | 32,43 | 19,26 |
| 60 | 42,14 | 36,44 | 40,31 |
| 75 | 48,71 | 50,67 | 44,45 |
| 90 | 61,61 | 61,70 | 58,40 |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Figura 9. Cinética de absorción de Fe en *Zea mays*

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Los hallazgos demuestran que *Zea mays* presenta una notable capacidad de bioacumulación de hierro (Fe), cuya eficiencia está determinada por la concentración inicial del metal y el tiempo de exposición. En el tratamiento con 10 ppm, si bien los porcentajes iniciales (30 días) fueron menores, la planta mostró una aceleración significativa a partir del día 60, alcanzando el 61.61% de remoción al final del experimento. El tratamiento con 25 ppm mantuvo un desempeño constante durante todo el período, registrando el valor máximo de eficiencia (61.70%) a los 90 días. Por su parte, la concentración de 50 ppm presentó la curva de absorción más pronunciada entre los 30-60 días, culminando con 58.40% de remoción. Estos patrones confirman la efectividad de *Zea mays* para la fitorremediación de hierro en suelos con contaminación leve a moderada, manteniendo su eficiencia incluso ante concentraciones elevadas del metal. Estos resultados concuerdan con lo documentado por Quispe Banda et al. (2024) y Wei et al. (2025), quienes validan el uso de biomasa vegetal para la remoción de metales en suelos con diferentes niveles de contaminación.

Análisis estadístico del proceso de absorción

Con el objetivo de determinar si existieron diferencias estadísticamente significativas en los porcentajes de absorción de plomo (Pb) y hierro (Fe) por *Zea mays* a lo largo del tiempo, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software Statgraphics Centurion. Este análisis permitió evaluar el efecto del tiempo de exposición (30, 45, 60, 75 y 90 días) y la concentración inicial de los metales (50, 25 y 10 ppm) sobre la capacidad de absorción de metales pesados por la planta.

Anova para el proceso de absorción de plomo por *Zea mays*

Tabla 12. ANOVA: Absorción de Pb por *Zea mays* vs tiempo

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor P |
|----------------------------|-------------------|-----------|----------------|------------|---------|
| EFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: Conc. inicial Pb | 114,854 | 2 | 57,427 | 9578,26 | 0,0000 |
| B: Tiempo | 25197,0 | 4 | 6299,26 | 1050654,26 | 0,0000 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 1088,11 | 8 | 136,014 | 22685,83 | 0,0000 |
| RESIDUOS | | | | | |
| | 0,179867 | 30 | 0,00599556 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 26400,2 | 44 | | | |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA), procesados mediante el software Statgraphics y consignados en la Tabla 12, demuestran que tanto la concentración inicial de plomo (Factor A) como el tiempo de exposición (Factor B) afectan de manera altamente significativa la absorción de Pb por *Zea mays* (valor-p < 0.0001 en ambos casos). Asimismo, la interacción entre ambos factores (A×B) también resultó estadísticamente significativa (valor-p < 0.0001), indicando que el efecto del tiempo de exposición sobre la absorción del metal varía en función de la concentración inicial presente en el suelo, y recíprocamente. Esta interdependencia revela

que el proceso de fitoextracción no responde de forma aislada a variaciones individuales de cada factor, sino que está regido por una relación sinérgica entre ellos.

En consecuencia, se confirma que la eficiencia de absorción de plomo por *Zea mays* está determinada significativamente por la concentración inicial del metal, la duración de la exposición y la interacción entre ambos parámetros. Estos hallazgos proporcionan una base cuantitativa sólida para el diseño de estrategias de fitorremediación optimizadas, permitiendo ajustar los tiempos de cultivo según el nivel de contaminación inicial del suelo y maximizar así la eficiencia de descontaminación en ambientes impactados por metales pesados.

Análisis de Varianza para la Bioacumulación de Hierro en *Zea mays*

Tabla 13. ANOVA: Absorción de Fe por *Zea mays* vs tiempo

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|----------------------------|-------------------|----|----------------|----------|---------|
| EFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: Conc. inicial Fe | 152,625 | 2 | 76,3126 | 2044,94 | 0,0000 |
| B: Tiempo absorción | 14469,4 | 4 | 3617,35 | 96933,60 | 0,0000 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 367,313 | 8 | 45,9141 | 1230,35 | 0,0000 |
| RESIDUOS | | | | | |
| | 1,11953 | 30 | 0,0373178 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | | | | | |
| | 14990,4 | 44 | | | |

Fuente: Linares Liza & Flores Vinces (2025).

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA), procesados mediante Statgraphics y presentados en la Tabla 13, demuestran que tanto la concentración inicial de hierro (Factor A) como el tiempo de exposición (Factor B) afectan de manera altamente significativa la absorción de Fe por *Zea mays* (valor-p < 0.0001 en ambos casos). La interacción entre ambos

factores (A×B) también resultó estadísticamente significativa (valor-p < 0.0001), indicando que el efecto del tiempo de exposición sobre la absorción del metal varía según la concentración inicial presente en el sustrato, y viceversa. Esta interdependencia revela que el proceso de bioacumulación no responde de manera aislada a variaciones individuales de cada factor, sino que está determinado por una relación sinérgica entre ellos.

En consecuencia, se confirma que la eficiencia de absorción de hierro por *Zea mays* está significativamente influenciada por la concentración inicial del metal, la duración de la exposición y la interacción entre ambos parámetros. Estos hallazgos proporcionan sustento cuantitativo para el diseño de estrategias de fitorremediación optimizadas, permitiendo ajustar los tiempos de cultivo según el nivel de concentración metálica inicial y maximizar así la eficiencia en procesos de descontaminación de suelos impactados por hierro.

Capítulo 5

El potencial fitorremediador de zea mays: síntesis de hallazgos y proyecciones

Capacidad de Bioacumulación y Factores Determinantes

El estudio demuestra consistentemente que *Zea mays* posee una notable capacidad para absorber y acumular metales pesados, específicamente plomo (Pb) y hierro (Fe), en sus tejidos vegetales. Los porcentajes de remoción alcanzados a lo largo del período experimental de 90 días confirman su eficiencia como especie fitoextractora, con patrones temporales claramente definidos que revelan una relación directamente proporcional entre el tiempo de exposición y la eficiencia de absorción. En el caso específico del plomo, los análisis revelaron que la concentración inicial del metal en el suelo influye significativamente en la dinámica de absorción, registrándose el máximo porcentaje de remoción (76.90%) en el tratamiento con 10 ppm al final del experimento. Este comportamiento diferencial según la concentración inicial sugiere la activación de mecanismos fisiológicos específicos en la planta frente a distintos niveles de contaminación, donde concentraciones moderadas parecen estimular una respuesta más eficiente en comparación con escenarios de mayor contaminación. El análisis estadístico mediante ANOVA corrobora estas observaciones, mostrando valores de $p < 0.0001$ tanto para el factor tiempo como para la concentración inicial, validando estadísticamente la significancia de estas relaciones en el proceso de fitoextracción.

La respuesta de *Zea mays* frente al hierro presenta características particulares que merecen destacarse, pues demostró una notable estabilidad en su eficiencia de absorción independientemente de la concentración inicial del metal en el suelo. Los valores máximos registrados al día 90 (61.61%, 61.70% y 58.40% para concentraciones iniciales de 10, 25 y 50 ppm respectivamente) evidencian una capacidad de adaptación fisiológica que le permite mantener una performance consistente incluso en condiciones de baja disponibilidad del metal. Esta versatilidad resulta particularmente valiosa para aplicaciones en fitorremediación, ya que sugiere que la planta puede emplearse efectivamente en suelos con distintos niveles de contaminación hierro sin comprometer significativamente su eficiencia extractiva. La interacción estadísticamente significativa entre el tiempo de exposición y la concentración inicial, confirmada mediante el análisis ANOVA (valor- p

< 0.0001), refuerza la complejidad de los mecanismos de absorción y su dependencia de múltiples variables ambientales y fisiológicas que actúan de manera sinérgica durante el proceso de fitoextracción.

Implicaciones prácticas y recomendaciones para investigación futura

Los hallazgos de esta investigación abren múltiples perspectivas para el desarrollo de estrategias de remediación basadas en el uso de *Zea mays*, particularmente en regiones afectadas por contaminación antrópica con metales pesados. La consistencia en los patrones de absorción observados sugiere la posibilidad de diseñar protocolos estandarizados de fitorremediación que consideren tanto el nivel de contaminación inicial como los tiempos óptimos de cultivo para maximizar la eficiencia del proceso. Sin embargo, resulta fundamental ampliar el alcance temporal de las investigaciones, extendiendo los períodos de exposición más allá de los 90 días, especialmente en suelos con altas concentraciones de metales pesados. Esta prolongación permitiría determinar si la eficiencia de absorción continúa incrementándose o si, por el contrario, se alcanza un punto de saturación fisiológica en la planta, información crucial para optimizar los ciclos de cultivo en aplicaciones a escala real. Asimismo, sería valioso implementar monitoreos más frecuentes durante las primeras etapas de crecimiento, lo que permitiría identificar con mayor precisión los puntos de inflexión en la cinética de absorción y correlacionarlos con eventos específicos del desarrollo vegetal.

La transición hacia aplicaciones prácticas requiere necesariamente de estudios complementarios que validen estos hallazgos en condiciones de campo, donde múltiples factores ambientales pueden modificar sustancialmente los patrones observados en condiciones controladas de laboratorio. Se recomienda implementar ensayos en sitios piloto que repliquen las condiciones de contaminación estudiadas, incorporando variables adicionales como tipo de suelo, condiciones climáticas y microbiota nativa, todos factores que pueden influir en la biodisponibilidad de los metales y, consecuentemente, en la eficiencia del proceso de fitorremediación. Parale-

lamente, resulta estratégico desarrollar investigaciones comparativas con otras especies vegetales, tanto nativas como mejoradas genéticamente, que permitan establecer consorcios vegetales sinérgicos capaces de abordar diferentes tipos y niveles de contaminación. La evaluación de la distribución específica de metales en distintos órganos de la planta (raíces, tallos, hojas) aportaría información valiosa para determinar los mecanismos de tolerancia y acumulación, así como para establecer protocolos seguros de disposición final de la biomasa contaminada. Estas líneas de investigación convergen en el objetivo de transformar el potencial fitorremediador de *Zea mays* en una tecnología ambientalmente sostenible y socialmente pertinente para la recuperación de suelos impactados.

Referencias

- Aguilar-Arteaga, K., Castañeda-Ovando, A., Castañeda-Ovando, E. P., Lira, B. P., & Batalla, L. D. (2024). Removal of heavy metal ions with magnetic carbon prepared from corncob biomass. *Environmental Technology*, 45(10), 1956–1968. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2158760>
- Aladesanmi, O. T., Oroboade, J. G., Osiogu, C. P., & Osewole, A. O. (2019). Bioaccumulation factor of selected heavy metals in Zea mays. *Journal of Health and Pollution*, 9(24). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.24.191207>
- Alcibar, M. S. C., & Manolo, Y. G. F. (2023). *Evaluación de la actividad absorbente de plomo en aguas residuales empleando como material el ollote de maíz (Zea mays)* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
- Altamirano Villanueva, L. F., & Gámez García, R. S. (2022). *Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) mediante el uso de Zea mays: una revisión sistemática* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].
- Arévalo, A., Ccahuaya Huamán, J., Huamán Huamán, J., López, C., & Rojas, E. (2020). Fitorremediación con Maíz (Zea mays) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551-560.
- Chinchay Inga, M., & Chamorro Ricaldi, K. I. (2020). *Fitorremediación de suelos contaminados por metales (Plomo y Cadmio) mediante planta nativa Maíz “Zea mays” en la minería* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión].
- Du, Q., Zhang, S., Song, J., Zhao, Y., & Yang, F. (2020). Activation of porous magnetized biochar by artificial humic acid for effective removal of lead ions. *Journal of Hazardous Materials*, 389(122115). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122115>
- Jiménez-Machuca, A. S., Bautista-Terán, R. J., Licapa-Redolfo, G. S., Chung, A. R. C., & Licapa-Redolfo, R. (2023). *Influencia del tiempo de retención y la proporción de ollote de maíz Zea mays en la remoción de hierro y plomo del río Hualgayoc-Arascorgue* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].

- Linares Liza, D. L., & Flores Vinces, K. A. (2025). *Evaluación del Maíz (Zea mays) utilizado en la Absorción de Plomo y Fierro en suelos contaminados a nivel de laboratorio* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo].
- Pastor, J., Altamirano Villanueva, L. F., & Gámez García, R. S. (2011). Phyto-remediation of heavy metals using maize and sunflower: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2757-2765. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.028>
- Poma Quiñonez, L. (2022). *Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con Zea mays en un suelo contaminado con cadmio* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].
- Quispe Banda, D. Y., Rojas Atilano, G. Y., & Licapa-Redolfo, G. S. (2024). *Green innovation: Use of residual biomass in the removal of copper and iron from artisanal mining effluents*. Proceedings of the 4th LAC-CEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): “Creating solutions for a sustainable future: technology-based entrepreneurship”. <https://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2024.1.1.373>
- Wang, X., Wang, J., Jiang, L., & Jiang, Y. (2023). Absorption of Pb²⁺ and Cu²⁺ in wastewater by lignosulfonate absorbent prepared from corn straw. *International Journal of Biological Macromolecules*, 247(125820). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125820>
- Wei, Y., Yu, J., Haider, F. U., Zhang, Q., Chu, R., & Liqun, C. (2025). Integrated removal of chromium, lead, and cadmium using nano-zero-valent iron supported biochar: Mechanistic insights and eco-toxicity assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289(117532). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117532>
- Xia, Y., Zeng, X., Arévalo, A., Ccahuaya Huamán, J., Huamán Huamán, J., López, C., & Rojas, E. (2019). Heavy metal pollution in soil and its remediation using phytoremediation techniques: A review. *Soil and Sediment Contamination*, 28(5), 545-561. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1658849>



Religación
Press

Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9942-561-93-0

A standard linear barcode representing the ISBN number 978-9942-561-93-0.

9 789942 561930