

UNIVERSIDAD DE HUANUCO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL



TESIS

“Eficiencia de la fitorremediación con Mostaza (*Brassica juncea*) e Higuierilla (*Ricinus communis*) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba, Provincia y Departamento de Huánuco; 2024-2025”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA
AMBIENTAL**

AUTORA: Verde Malpartida, Liliana

ASESORA: Valdivia Martel, Perfecta Sofia

HUÁNUCO – PERÚ

2025

U

D

H



TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Contaminación ambiental

AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)

CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería ambiental

Disciplina: Ingeniería ambiental y geología

DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título

Profesional de Ingeniera ambiental

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 76196490

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 43616954

Grado/Título: Maestro en ingeniería con mención: gestión ambiental y desarrollo sostenible

Código ORCID: 0000-0002-7194-3714

DATOS DE LOS JURADOS:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Tarazona Mirabal, Herman Atilio	Magister en salud pública y gestión sanitaria gestión y planeamiento educativo	22411008	0000-0001-5319-4708
2	Bonifacio Munguia, Jonathan Oscar	Maestro en medio ambiente y desarrollo sostenible, mención en gestión ambiental	46378040	0000-0002-3013-8532
3	Morales Aquino, Milton Edwin	Maestro en ingeniería, con mención en: gestión ambiental y desarrollo sostenible	44342697	0000-0002-2250-3288



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 18:00 horas del día 12 del mes de noviembre del año 2025, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

- Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal (Presidente)
- Mg. Jonathan Oscar Bonifacio Munguía (Secretario)
- Mg. Milton Edwin Morales Aquino (Vocal)

Nombrados mediante la **Resolución N° 2275-2025-D-FI-UDH** para evaluar la Tesis intitulada: **"EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON MOSTAZA (*Brassica juncea*) E HIGUERILLA (*Ricinus communis*) EN LA RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR PLOMO Y CADMIO DEL BOTADERO DE MARABAMBA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO; 2024-2025"**, presentado por el (la) Bach. VERDE MALPARTIDA, LILIANA, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) aprobada Por unanimidad con el calificativo cuantitativo de 16 y cualitativo de bueno (Art. 47)

Siendo las 19:00 horas del día 12 del mes de noviembre del año 2025, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.


Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal
DNI: 22411008
ORCID: 0000-0001-5319-4708
Presidente


Mg. Jonathan Oscar Bonifacio Munguía
DNI: 46378040
ORCID: 0000-0002-3013-8532
Secretario


Mg. Milton Edwin Morales Aquino
DNI: 44342697
ORCID: 0000-0002-2250-3288
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: LILIANA VERDE MALPARTIDA, de la investigación titulada "Eficiencia de la fitorremediación con Mostaza (*Brassica juncea*) e Higuierilla (*Ricinus communis*) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba, Provincia y Departamento de Huánuco; 2024-2025", con asesor(a) PERFECTA SOFIA VALDIVIA MARTEL, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 1971-2025-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA AMBIENTAL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 19 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 06 de octubre de 2025



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

20. Verde Malpartida, Liliana.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

5%

2

repositorio.unac.edu.pe

Fuente de Internet

2%

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

4

docplayer.es

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

1%



RICHARD J. SOLIS TOLEDO

D.N.I.: 47074047

cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA

D.N.I.: 71345687

cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

Queridos padres (César Arturo Verde, Irma Malpartida)

A través de estas palabras, quiero manifestar mi sincero reconocimiento por el respaldo constante y el estímulo que me han proporcionado a lo largo de mi formación académica.

Gracias a su constante presencia y respaldo, hoy puedo celebrar este importante hito en mi vida: la culminación de mi tesis.

Dedico este logro con todo mi corazón a mi familia, en especial a mis padres y a mis hermanas, cuyo amor, comprensión y motivación fueron fundamentales para superar cada uno de los desafíos en el camino. Sus palabras de aliento, su paciencia y su fe en mí me impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Espero que este logro también sea motivo de orgullo para ustedes, porque su apoyo ha sido esencial para alcanzarlo. Gracias por estar siempre allí. Ojalá algún día pueda retribuirles todo lo que han hecho por mí.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a mi asesora y jurados de tesis por su constante apoyo, orientación y dedicación. Su experiencia y consejos fueron cruciales para superar los retos durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir su conocimiento y por brindarme su tiempo en todo momento.

Expreso mi agradecimiento a todos los docentes que contribuyeron a mi formación profesional, cuyas enseñanzas, observaciones y recomendaciones resultaron fundamentales para fortalecer mis conocimientos y hacer posible la culminación de este proyecto.

A mi familia y amistades, les manifiesto mi profundo agradecimiento por su permanente apoyo y aliento, en especial durante los periodos en que la carga de trabajo resultaba más exigente. Su confianza en mí ha sido un pilar fundamental que me brindó la fortaleza necesaria para culminar esta meta.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN	XII
CAPÍTULO I	13
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	14
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.6 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
CAPÍTULO II	17
MARCO TEÓRICO	17
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	17
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	18
2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES.....	20

2.2. BASES TEÓRICAS	22
2.2.1. LA FITORREMEDIACIÓN	22
2.2.2. ETAPAS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LAS MOLÉCULAS ORGÁNICAS XENOBIÓTICOS.....	25
2.2.3. MOSTAZA (<i>Brassica juncea</i>)	29
2.2.4. HIGUERILLA (<i>Ricinus communis</i>).....	31
2.2.5. EL SUELO	32
2.2.6. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO	32
2.2.7. CONTAMINACIÓN DEL SUELO	35
2.2.8. CONTAMINACIÓN DEL SUELO CON METALES PESADOS	37
2.2.9. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PLOMO	37
2.2.10. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE PLOMO.....	38
2.2.11. CADMIO EN EL SUELO.....	38
2.2.12. IMPACTOS EN LA SALUD POR SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS	39
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES	39
2.4. HIPÓTESIS	42
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	42
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	42
2.5. VARIABLES.....	42
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	43
CAPÍTULO III.....	44
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	44
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	44
3.1.1. ENFOQUE.....	44
3.1.2. ALCANCE O NIVEL	44
3.1.3. DISEÑO.....	44
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	45

3.2.1. POBLACIÓN	45
3.2.2. MUESTRA.....	46
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	46
3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	50
CAPÍTULO IV.....	51
RESULTADOS.....	51
4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	51
4.1.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO	51
4.1.2. ANÁLISIS INFERENCIAL.....	58
4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	69
CAPÍTULO V.....	74
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	74
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de Fitorremediación	23
Tabla 2 Taxonomía de Mostaza.	29
Tabla 3 Característica de la mostaza (Brassica juncea)	30
Tabla 4 Diámetro de Partículas de Suelo	33
Tabla 5 La Clasificación de la Acidez en Solución de Suelo	34
Tabla 6 Operacionalización de Variables	43
Tabla 7 Coordenadas de Ubicación de Población de Estudio	46
Tabla 8 Lista de Materiales y Equipos.	49
Tabla 9 Técnicas para el procesamiento y Análisis de la información	50
Tabla 10 Parámetros físico-químicos Iniciales	51
Tabla 11 Presencia de Metales pesado en el Análisis Inicial	52
Tabla 12 Parámetros físico-químicos finales con los Tratamientos de Mostaza e Higuierilla (1).	52
Tabla 13 Parámetros físico-químicos finales con los Tratamientos de Mostaza e Higuierilla (2)	53
Tabla 14 Metales pesados Pb Total y Cd Total finales con los Tratamientos de Mostaza e Higuierilla.	53
Tabla 15 Prueba de Normalidad con el Estadístico Shapiro Wilk	54
Tabla 16 Pruebas de Homogeneidad de Varianzas con el Estadístico Levene.	55
Tabla 17 Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para parámetro pH.	58
Tabla 18 Prueba Estadística t para una muestra para parámetro CE.	58
Tabla 19 Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro CaCO ₃	59
Tabla 20 Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro M.O.	60
Tabla 21 Prueba Estadística y para una muestra para el parámetro P ppm.	60
Tabla 22 Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro k ppm	61
Tabla 23 Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro CIC con especie Mostaza.	62
Tabla 24 Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para el parámetro CIC con especie Higuierilla.	62
Tabla 25 Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro Ca ⁺²	63

Tabla 26 Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para el parámetro Mg. + 2	64
Tabla 27 Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro K+....	64
Tabla 28 Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para el parámetro Na+	65
Tabla 29 Analisis inferencial de los parametros fisico quimico	66
Tabla 30 Prueba Estadística t para una muestra para el metal pesado Pb ppm	67
Tabla 31 Prueba Estadística t para una muestra para el metal pesado Cd ppm..	67
Tabla 32 Prueba Estadística t para muestras independientes para los metales pesados Pb y Cd.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismos de fitorremediación	24
Figura 2 Representación Gráfica del Comportamiento Teórico del Efecto del Peso.	26
Figura 3 Ejemplo de Fitorremediación	27
Figura 4 Mostaza (Bassica Juncea)	30
Figura 5 Localización de puntos de muestreo en el área de excavación regular, forma de Cuadrado.	48
Figura 6 Comparación de los parámetros fisicoquímicos del suelo en pre-test y después de los tratamientos con mostaza (brassica juncea) e higuierilla (ricinus communis).	56
Figura 7 Concentración de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el suelo antes y después de los tratamientos con mostaza (Brassica juncea) e higuierilla (Ricinus communis).	57

RESUMEN

La investigación se realizó en el distrito de Huánuco, región Huánuco - Perú, con el objetivo de reducir la contaminación del suelo por plomo y cadmio mediante fitorremediación con plantas de higuera (*Ricinus communis*) y mostaza (*Brassica juncea*) cultivadas en invernadero. El estudio fue de tipo experimental con intervención, conformado por 2 bloques y 10 unidades experimentales, se utilizó una planta por unidad experimental. Tras el proceso de fitorremediación, se evaluó la eficiencia en la reducción Pb y Cd, asimismo los parámetros fisicoquímicos del suelo, materia orgánica, PH, P, K, CIC. Para ello, las muestras del suelo fueron trasladadas al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde los análisis revelan que a partir de los valores iniciales de 208,33 ppm de Pb y 10,83 ppm de Cd en el suelo, tras 120 días de tratamiento, la concentración de Pb se redujo a 147,76 ppm y la de Cd a 7,04 ppm con mostaza; mientras que, con higuera, el Pb disminuyó a 102,69 ppm y el Cd a 7,61 ppm. Las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Mostaza redujo el Pb en 29,07 % y el Cd en 35,05 %, mientras que higuera logró una disminución del 50,71 % en Pb y 29,73 % en Cd, respecto al análisis inicial. Se concluyó que la fitorremediación del suelo contaminado con plomo y cadmio en el botadero de Marabamba, utilizando mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*), fue eficaz y con resultados similares. En ambos casos, la concentración de Pb y Cd disminuyó significativamente, y se observaron tanto diferencias como coincidencias en los parámetros fisicoquímicos del suelo tras el tratamiento.

Palabras clave: Fitorremediación, remediación, metales pesados, *Brassica juncea*, *Ricinus communis*, plomo, cadmio.

ABSTRACT

This research was conducted in the district of Huánuco, Peru, with the objective of reducing soil contamination by lead (Pb) and cadmium (Cd) through phytoremediation using castor bean (*Ricinus communis*) and mustard (*Brassica juncea*) plants cultivated in a greenhouse. The experimental design consisted of two blocks and ten experimental units, with one plant per unit. After 120 days of treatment, the soil samples were examined at the Soil Laboratory of the National Agrarian University La Molina. The results indicated that soils treated with mustard showed average concentrations of 147.76 ppm for Pb and 7.04 ppm for Cd, while those treated with castor bean showed 102.69 ppm for Pb and 7.61 ppm for Cd. Although statistical tests revealed no significant differences, mustard reduced Pb by 29.07% and Cd by 35.05%, whereas castor bean reduced Pb by 50.71% and Cd by 29.73%, compared to initial values. It was concluded that phytoremediation using *Brassica juncea* and *Ricinus communis* was effective in reducing heavy metal concentrations in contaminated soils from the Marabamba landfill, with similar outcomes between species and observable changes in the soil's physicochemical properties.

Keywords: phytoremediation, heavy metals, *Brassica juncea*, *Ricinus communis*, lead, cadmium, soil remediation.

INTRODUCCIÓN

La presencia de metales pesados, como el plomo y el cadmio representa una de las principales formas de degradación del suelo, es un problema ambiental y de salud pública creciente a nivel mundial. Estos contaminantes, provenientes principalmente de actividades industriales, mineras y agrícolas, tienen efectos tóxicos para los organismos vivos y alteran la degradación del suelo, limita su aprovechamiento agrícola y perjudica la diversidad biológica de la zona. En el contexto del Perú, entre los sitios impactados por esta problemática se encuentra el botadero de Marabamba, situado en la provincia y departamento de Huánuco, donde los niveles elevados de plomo y cadmio han generado preocupación por el impacto ambiental y sanitario que ocasionan.

La fitorremediación, basada en el uso de plantas para remover o transformar contaminantes, representa una estrategia eficaz contra la polución del suelo dentro de este enfoque, especies como la mostaza (*Brassica juncea*) y la higuierilla (*Ricinus communis*) han mostrado un notable potencial para la remoción de metales pesados debido a sus capacidades de acumulación, tolerancia y adaptación a ambientes contaminados.

Este estudio evalúa la capacidad de mostaza e higuierilla para fitorremediar los suelos del botadero de Marabamba contaminados con plomo y cadmio, con el fin de promover técnicas de recuperación sostenibles.

Este trabajo surge de la necesidad de aplicar soluciones sostenibles para reducir la contaminación del suelo, en especial en las comunidades afectadas por la minería y otras actividades que impactan el ecosistema. La propuesta busca recuperar la calidad del suelo y fortalecer la salud ambiental de la región, promoviendo la restauración y el uso responsable de los recursos naturales en el Perú.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La vida en el planeta depende del suelo, como también cumple un rol muy importante en el ciclo del agua ya que lo almacena y purifica. Asimismo, constituye el principal sustento de la vida en el ecosistema. La degradación de los suelos es causada por malas prácticas que se realizan hoy en día, por otro lado, la degradación de este recurso es mayor a su capacidad de renovación.

Uno de los principales problemas ambientales actuales es la contaminación del suelo, originada por la inadecuada gestión de los residuos orgánicos e inorgánicos, ya sea de forma intencional o accidental. La acumulación de estas sustancias en niveles elevados deteriora la capacidad del suelo para cumplir sus funciones, genera riesgo para la salud humana y afecta a múltiples formas de vida.

La contaminación del suelo, causada por el manejo inadecuado de residuos, reduce su funcionalidad, pone en riesgo la salud humana y amenaza la biodiversidad.

La contaminación del suelo es un problema global en aumento. En 2017, la Asamblea de la ONU para el Medio Ambiente pidió acciones urgentes, respaldadas por más de 170 países. Entre las principales fuentes se incluyen residuos industriales y municipales, ganadería, uso de agroquímicos, derivados del petróleo y accidentes como derrames o filtraciones. (Rodríguez et al., 2019).

La gestión inadecuada de residuos sólidos a nivel mundial provoca acumulación y disposición incorrecta, contaminando principalmente el suelo. La descomposición de materia orgánica genera lixiviados que alteran su composición natural y agravan la polución. (Valdés. 2014).

En el Perú, la gestión de residuos sólidos es un grave problema ambiental, acentuado por el consumo excesivo y la escasa conciencia ecológica. Se generan unas 23000 toneladas de basura al día, de las cuales

solo el 15 % se recicla; apenas hay 12 rellenos sanitarios y cerca del 90 % de los desechos termina en unos 1250 botaderos informales. (MINAM, 2016).

Según la Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos del Ministerio del Ambiente. (MINAM, 2021), cada día, los peruanos producen cerca de 21000 toneladas de basura, alrededor de 0,83 kg por habitante, con predominio de desechos orgánicos. La inadecuada disposición de residuos sólidos genera graves efectos en la salud y el ambiente. Huánuco enfrenta este problema con uno de los botaderos más grandes del país, situado cerca del centro urbano en Marabamba, el cual hoy permanece clausurado; sin embargo, los lixiviados generados presentan concentraciones de metales pesados como plomo (230 ppm), cadmio (2,215 ppm) y zinc (80 ppm) (Paredes, 2021). Esta situación constituye un foco de contaminación que, además de afectar el medio ambiente, representa un riesgo para la salud humana. Pese al cierre, el lugar aún emplea a adultos y menores que se exponen a riesgos sanitarios. (Abanto et al., 2016).

Por lo expuesto, surge la necesidad de implementar estrategias basadas en tecnologías que contribuyan a la conservación y mejora del suelo y de sus servicios ecosistémicos. En este marco, la presente investigación se plantea como una alternativa para la recuperación de suelos contaminados mediante el uso de dos especies vegetales, mostaza e higuierilla, con el fin de lograr su remediación y restablecer su calidad conforme a los estándares normativos vigentes.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es la eficiencia de la fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del proceso de fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*)?

¿Cuál es el porcentaje de presencia de metales pesados del suelo antes y después del proceso de fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*)?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de la fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del proceso de fitorremediación utilizando mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*).

Determinar la concentración de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el suelo antes y después del proceso de fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*).

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación aportó a la mejora de las condiciones de vida de los pobladores del centro poblado de Marabamba, quienes aún se ven expuestos a elementos tóxicos que afectan tanto su salud como los recursos naturales esenciales de la zona: suelo, agua y aire.

El presente trabajo de investigación se centró en la aplicación de la fitorremediación, una tecnología que viene adquiriendo relevancia en diversas regiones del mundo ante la creciente proliferación de botaderos, los cuales generan impactos negativos en el ambiente y en la salud humana. Este estudio ofreció una alternativa de mitigación a dicha problemática, orientada a la recuperación de suelos degradados.

Esta investigación se orientó a recuperar la calidad del suelo impactado por la acumulación de residuos sólidos en el botadero a cielo abierto de Marabamba, mediante la aplicación de especies vegetales con capacidad fitorremediadora. Esta técnica se reconoce como una de las opciones más

sostenibles y respetuosas con el ambiente para afrontar la contaminación del suelo, además de ser más accesible y eficiente en comparación con otros métodos de remediación.

Este estudio busca aportar al desarrollo de futuras investigaciones a partir de los resultados alcanzados mediante la aplicación de la fitorremediación, constituyendo un antecedente valioso para trabajos posteriores vinculados con la variable de estudio.

1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Entre las principales limitaciones del estudio se identificaron los elevados costos de los análisis de las muestras con el fin de otorgar mayor confiabilidad a la investigación, se amplió el número de muestras y se incluyeron evaluaciones de parámetros físicos y químicos del suelo; sin embargo, la disponibilidad limitada de laboratorios en la región de Huánuco representó una dificultad adicional que incrementó los gastos. Para superar esta situación, se recurrió a otras instituciones, como la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde se realizaron los diferentes análisis requeridos.

1.6 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de la presente investigación se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- **Disponibilidad técnica:** el investigador dispuso de métodos y procedimientos adecuados para la recolección y el procesamiento de la información necesaria.
- **Disponibilidad de recursos financieros:** los gastos asociados a las distintas actividades planificadas en la investigación fueron asumidos por el propio investigador.
- **Disponibilidad de información secundaria:** se contó con abundantes fuentes de referencia relacionadas con la temática, tales como publicaciones en internet, revistas especializadas, libros y artículos científicos, entre otros.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Márquez, et al., (2019), en su investigación “Extracción de cobre por plantas de mostaza parda (*Brassica juncea*) durante su desarrollo vegetativo, en un suelo contaminado artificialmente y efecto de la aplicación de ramnolípido” evaluó la capacidad de fitoextracción de la mostaza parda en suelos agrícolas contaminados con sulfato de cobre y el efecto del biosurfactante biodegradable JBR-425. Para ello se empleó un diseño experimental que incluyó germinación previa en placas petri para probar distintas dosis de cobre y ramnolípido, seguido de ensayos en macetas con suelo franco y pH ligeramente ácido, aplicando concentraciones de 0,125, 250 y 500 mg Cu/kg y una dosis de ramnolípido de 1000 mg/kg. Los resultados mostraron fitotoxicidad creciente del cobre y del ramnolípido; el cobre se absorbió en la arcilla y el ramnolípido mejoró la estructura del suelo, la biomasa de la planta se redujo en etapas iniciales, pero no en las finales. Se concluyó que la fitoextracción fue poco eficiente, requiriendo numerosas cosechas para alcanzar niveles de referencia de cobre.

Castillo, O. (2018), realizó un estudio en México titulado “Estudio del desarrollo de la especie (*Ricinus communis*) cultivada en residuos mineros en condiciones de invernadero”, cuyo propósito fue analizar el crecimiento de *Ricinus communis* bajo condiciones controladas y comparar sus características morfológicas, así como el contenido de metales en raíces y partes aéreas. La investigación, de carácter aplicado y con enfoque experimental, contempló la siembra de higuierilla en el invernadero del CINVESTAV, cuidando la selección del material vegetal y variable del ambiente y sustrato. Los resultados evidenciaron que la especie soporta elevadas concentraciones de metales pesados y arsénico presentes en los residuos mineros, lo que la convierte en una

alternativa para la bioestabilización de estos contaminantes. Se determinó además que (*Ricinus communis*) es capaz de retener cobre en sus raíces y acumular plomo, comportándose como una planta hiperacumuladora apta para procesos de remediación.

Gayatri, et al., (2019), en su estudio realizado en la India, titulado “Fitorremediación potencial de (*Brassica juncea*) para eliminación de metales pesados seleccionados en suelos urbanos enmendado con estiércol de vaca”, analizó la capacidad de (*Brassica juncea*) para extraer metales de suelos urbanos tratados con estiércol bovino. El objetivo central fue cuantificar el contenido de metales pesados y medir la eficiencia de su remoción mediante esta especie vegetal. La investigación fue de carácter experimental y enfoque cuantitativo, se desarrolló en macetas durante 81 días. La evaluación de las muestras de suelo y planta fueron en distintos momentos (0, 21, 51 y 81 días), determinando parámetros como pH, conductividad eléctrica, carbono y materia orgánica. La concentración de metales pesados se midió mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los resultados revelaron mayores tasas de extracción para el plomo (24,52 %), seguido por cobre (3,08 %), zinc (2,89 %), cromo (0,71 %) y níquel (0,37 %). Se comprobó que la absorción depende de la disponibilidad de los metales en el suelo. En conclusión, la planta mostró una marcada capacidad para acumular plomo respecto a otros elementos, y el factor de translocación confirmó su comportamiento como hiperacumuladora.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Larios, D. (2019), en su trabajo de investigación titulada “Efectos en los primeros estadios fenológicos de (*Brassica juncea*) cultivada en un suelo contaminado por plomo”, realizada en Lima, analizó el impacto del plomo en las fases iniciales de desarrollo de esta especie. Se implementó un esquema experimental de bloques aleatorizados que incluyó cinco tratamientos y tres repeticiones, tomando cada planta como unidad de estudio. Los resultados mostraron distintos niveles de

toxicidad, con daños severos en la mayoría de los casos, aunque el tratamiento T5-R3 presentó menor susceptibilidad. Se observó clorosis generalizada, enrollamiento foliar y alteraciones en tallo y hojas que culminaron en la muerte de varias plantas. Estas fitopatías se atribuyeron a la deficiencia de nutrientes esenciales como calcio, hierro y zinc, cuyo transporte fue bloqueado por la presencia de plomo.

Ancalla Tuero y Cochachin Tineo (2020), en su trabajo de investigación “*Brassica juncea* con biosurfactantes para reducir la concentración de plomo en suelos contaminados a inmediaciones de la procesadora Minex, Nazca - 2020”, realizado en Lima, evaluó la capacidad de la mostaza india (*Brassica juncea*) combinada con biosurfactantes para disminuir el plomo presente en el suelo próximos a la planta minera Minex. La investigación se desarrolló con un enfoque práctico, utilizando métodos cuantitativos y un esquema de diseño experimental. en la que se manipularon variables de forma aleatoria para establecer relaciones de causa y efecto. Se utilizaron muestras de suelo con alto contenido de Pb, que fueron tratadas con la planta y el biosurfactante para favorecer la remediación. Las concentraciones iniciales de plomo en los cuatro tratamientos rondaron entre 576,9 y 584,8 mg/kg, mientras que los valores finales se redujeron a rangos de 188,9 a 296,3 mg/kg, destacando el cuarto tratamiento por lograr la mayor biomasa y mejor desarrollo vegetal, también se midieron parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo, potasio y temperatura, los porcentajes de remoción de plomo alcanzaron 67,2 % en T4, 50,9 % en T2, 50,2 % en T3 y 49,3 % en T1. Se concluyó que (*Brassica juncea*) en conjunto con biosurfactantes, representa una alternativa eficaz de fitorremediación para suelos contaminados con este metal.

Recharte et al., (2019), en su investigación “Fitorremediación con (*Ricinus communis*) para el tratamiento de suelos contaminados con plomo”, realizado en el Callao, tuvo como objetivo evaluar la eficacia de

Ricinus communis en la recuperación de terrenos del Asentamiento Humano Virgen de Guadalupe afectados por plomo. Se diseñó una investigación experimental de tipo correlacional con un esquema completamente aleatorio, probando suelos con cuatro niveles de plomo (aprox. 459, 704, 956 y 1 210 mg/kg) y tres repeticiones por tratamiento para medir la tolerancia de la especie. Los análisis demostraron que la planta logró mayor desempeño fitorremediador en suelos con concentraciones de 221 a 459 mg/kg, acumulando en su biomasa entre 45 y 57 mg/kg de plomo. En conclusión, *Ricinus communis* actúa principalmente como fitoestabilizador, reteniendo el metal en las raíces y limitando su traslado a la parte aérea, lo que la convierte en una alternativa efectiva para descontaminar suelos con presencia de este metal pesado.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

Quispe (2020), en su estudio titulado “Fitorremediación con (*Ricinus communis*) para el tratamiento de suelos contaminados con plomo en la ciudad de Cerro de Pasco, 2019” evaluó la eficacia de la higuierilla (*Ricinus communis*) para descontaminar suelos con presencia de plomo. Se desarrolló una investigación de tipo experimental correlacional, analizando la relación causa-efecto entre las variables planteadas y recopilando datos para contrastar las hipótesis, donde se prepararon suelos con cuatro niveles de plomo (aprox. 459, 704, 956 y 1 210 mg/kg), cada uno con tres repeticiones. Los resultados indicaron que la especie tolera y retiene plomo en un rango cercano a 244-836 mg/kg, mostrando mayor capacidad de remediación en esas concentraciones y reduciendo los niveles por debajo de los estándares ambientales. En conclusión, *Ricinus communis* actúa como un eficaz fitoestabilizador, ya que concentra el metal principalmente en las raíces y limita su traslado a otras partes de la planta, convirtiéndose en una alternativa viable para la recuperación de suelos contaminados.

Paredes (2021), en su investigación titulada “Efecto de la fitorremediación con dos variedades de ortiga (*Urtica urens* L. y *Urtica*

dioica L.) en la calidad del suelo usado como botadero a cielo abierto, Marabamba – Huánuco 2021”, realizada en la Universidad de Huánuco, evaluó la capacidad de estas dos especies de ortiga para mejorar suelos degradados por disposición de residuos. Se aplicó un diseño experimental de nivel explicativo, con dos grupos de prueba y cuatro repeticiones, midiendo parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, así como las concentraciones de plomo, cadmio y zinc frente a los estándares ECA-Suelo. Los análisis iniciales y finales clasificaron el sustrato como franco arenoso. Con *Urtica urens*, el plomo descendió aproximadamente 80,5 ppm y el cadmio 1,64 ppm, mientras que con *Urtica dioica* las reducciones fueron de cerca de 92,5 ppm de Pb y 1,58 ppm de Cd. El pH con *U. urens* se incrementó de 7,39 a 7,9, y con *U. dioica* de 7,38 a 7,8, manteniéndose en un rango ligeramente alcalino. En cuanto a nutrientes, el suelo tratado con *U. urens* presentó M. O.=0,195 %, N=0,0075 %, P=6 ppm y K=7,5 ppm; el de *U. dioica* mostró M.O. =0,498 %, N=0,0075 %, P=11,75 ppm y K=44,25 ppm. Se concluyó que *U. urens* influyó de manera más marcada en la mejora de los indicadores químicos (pH, materia orgánica, fósforo, nitrógeno y potasio), favoreció la reducción de metales pesados y estimuló el microbiota benéfico, mientras que *U. dioica* evidenció efectos más limitados.

Medrano (2023), en su estudio denominado “Efecto comparativo de dos variedades de gramíneas, trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), sobre la calidad de suelos contaminados del botadero de Marabamba, Huánuco – 2023”, efectuado en la Universidad de Huánuco, evaluó la influencia de ambas especies en la recuperación de suelos alterados por residuos. Se empleó una investigación de tipo aplicada y enfoque cuantitativo, con carácter explicativo, bajo un diseño experimental prospectivo que contempló dos grupos de ensayo, en la cual se midieron parámetros físicos, químicos y biológicos, además de la concentración de cadmio y plomo. Los análisis revelaron que, tras el cultivo de (*Triticum aestivum*), el sustrato presentó pH alcalino de 8,36, conductividad eléctrica de 1,22 dS/m, materia orgánica 4,80 %, nitrógeno

0,24 ppm, carbono 2,78 %, fósforo 120,06 ppm, potasio 547,21 ppm, capacidad de intercambio catiónico 29,59, calcio 25,63 %, magnesio 2,87 % y sodio 0,55 %. En el caso del tratamiento con (*Hordeum vulgare*) los valores fueron pH 8,33, CE 1,17 dS/m, materia orgánica 5,05 %, nitrógeno 0,25 ppm, carbono 2,93 %, fósforo 119,28 ppm, potasio 521,52 ppm, CIC 27,27, calcio 23,40 %, magnesio 2,36 % y sodio 0,46 %. Se concluyó que el trigo influyó de forma más notoria en la mejora de los indicadores químicos del suelo, favoreciendo la reducción de cadmio y plomo y estimulando la actividad microbiológica, mientras que la cebada evidenció un impacto menor en las mismas variables.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. LA FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación constituye una estrategia de descontaminación que emplea especies vegetales para sanear terrenos afectados por agentes nocivos. Este procedimiento ofrece múltiples beneficios, entre ellos su carácter sostenible, el reducido gasto de operación, la capacidad de disminuir los efectos de la erosión tanto por viento como por agua y la mejora en la organización y estabilidad de la estructura del suelo. (Da Silva et al., 2019).

Del mismo modo, se trata de un método ecológicamente sostenible que recurre a plantas para extraer o reducir contaminantes presentes en el terreno, tales como plaguicidas, hidrocarburos y diversos nutrientes. (Torres, 2016).

La fitorremediación se ha investigado de manera exhaustiva en los últimos quince años (véase la figura 1).

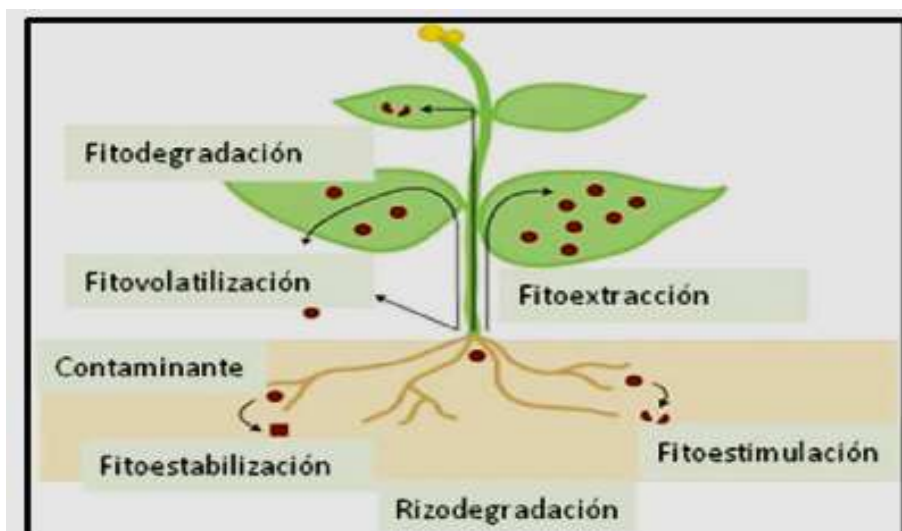
Tabla 1*Tipos de Fitorremediación*

Fito extracción:	Consiste en utilizar especies vegetales capaces de absorber y concentrar metales presentes en el suelo, trasladándolos hacia tejidos que pueden ser recolectados para su posterior extracción.
Fito estabilización:	Uso de vegetación capaz de reducir la movilidad y la disponibilidad biológica de los contaminantes en el entorno, evitando que se filtren a los mantos freáticos o lleguen a la cadena alimenticia.
Fito inmovilización:	Emplear el sistema radicular de las plantas para fijar o retener los contaminantes presentes en el sustrato terrestre.
Fito volatilización:	Uso de especies vegetales capaces de transformar o liberar a la atmósfera los contaminantes y sus subproductos presentes en el ambiente.
Fito degradación:	Uso integrado de plantas y microorganismos para atenuar o remover la contaminación originada por sustancias orgánicas.
Rizo filtración:	Empleo de sistemas radiculares capaces de absorber metales pesados y otros contaminantes orgánicos presentes en el suelo y el agua, concentrándolos y favoreciendo su posterior precipitación.

Nota. Chávez, L. (2014).

Figura 1

Mecanismos de fitorremediación



Nota. Chávez, L. (2014).

Una especie vegetal con capacidad fitorremediadora ejecuta esos procesos en tres etapas principales: captura del contaminante, liberación controlada y posterior neutralización o degradación.

➤ La captación de contaminantes ocurre por medio de las raíces y también a través de las hojas, utilizando las aberturas estomáticas y la cutícula de la superficie foliar. (Watt y Evans. 1999). La captación se lleva a cabo en la rizodermis de las raíces jóvenes, donde los compuestos ingresan por ósmosis influenciados por la temperatura y el pH del sustrato. Además, el peso molecular y el grado de hidrofobicidad del contaminante condicionan su capacidad para atravesar las membranas celulares, una vez dentro, dichas sustancias se transportan y dispersan por toda la estructura vegetal. (Harvey et al., 2002).

➤ Los compuestos absorbidos por las raíces pueden liberarse a través del follaje mediante fitovolatilización. Sin embargo, cuando la concentración de estos contaminantes es alta, únicamente una fracción mínima menos del 5 % se expulsa sin alteración de su composición química.

➤ La depuración de los compuestos orgánicos se efectúa mediante su mineralización, proceso que los transforma finalmente en dióxido de carbono.

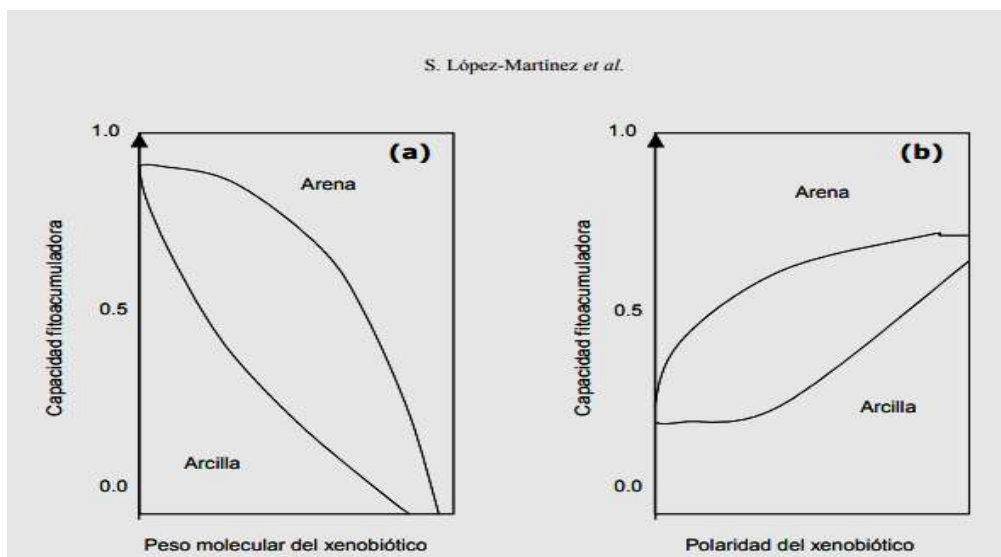
2.2.2. ETAPAS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LAS MOLÉCULAS ORGÁNICAS XENOBIÓTICOS

Si bien es cierto que tanto la flora como la fauna se encuentran expuestas a múltiples compuestos orgánicos xenobióticos que pueden resultar tóxicos. (Anderson y Coats. 1995). En los animales, el principal órgano encargado de procesar los compuestos orgánicos xenobióticos es el hígado. Allí, las sustancias lipofílicas y no polares se convierten en derivados más solubles que luego se eliminan a través de la orina. Durante la década de 1930, Williams (1959), investigó los procesos de desintoxicación y plasmó sus hallazgos en el libro *Metabolismo de desintoxicación de drogas, sustancias tóxicas y otros compuestos orgánicos*. Su aporte clave fue describir dos fases en la biotransformación de compuestos exógenos: una inicial de oxidación, reducción e hidrólisis y otra de conjugación. Posteriormente, otros investigadores ampliaron este modelo a tres etapas. En la primera, las enzimas oxidan, reducen o hidrolizan el sustrato para añadir un grupo reactivo; en la segunda, se produce la conjugación de ese intermediario; y en la tercera, los metabolitos hidrofílicos resultantes se eliminan por orina o heces.

La capacidad que tienen las plantas para incorporar contaminantes depende directamente de su propio potencial de desintoxicación. (Kvesitadze et al. 2001). Una segunda fase de conjugación y una tercera fase en la que, a diferencia de los animales, las reacciones se producen en compartimentos celulares específicos y los compuestos se almacenan en vacuolas. (Schaffer et al., 2002).

Figura 2

Representación Gráfica del Comportamiento Teórico del Efecto del Peso Molecular (a) y la Polaridad (b)



Nota. Ilustración esquemática que muestra el efecto teórico del peso molecular (a) y de la polaridad (b) de un compuesto orgánico xenobiótico sobre la capacidad de una planta para acumularlo en dos clases distintas de suelo.

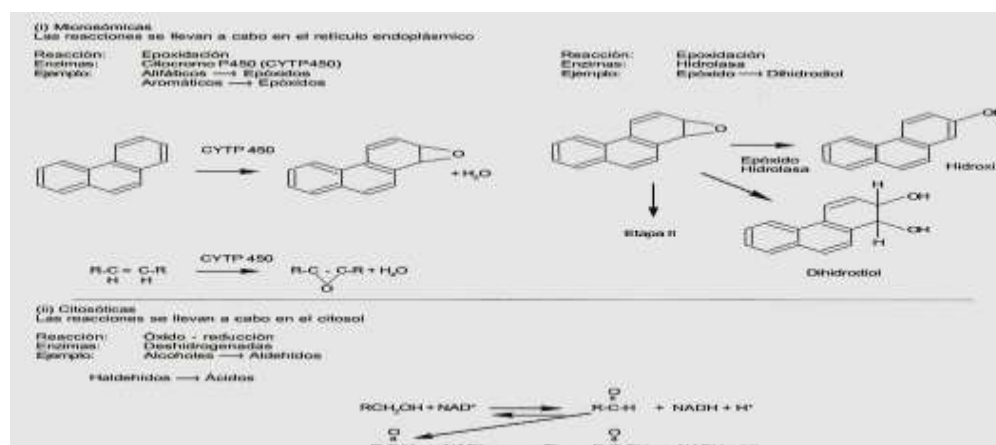
A continuación, se describen las fases de transformación que experimentan las moléculas orgánicas xenobióticas dentro de las plantas:

Etapas I. Durante esta fase, las moléculas orgánicas xenobióticas sufren procesos de oxidación, reducción e hidrólisis, lo que provoca la alteración parcial de su estructura y la generación de metabolitos más polares y solubles en agua. Para llevar a cabo estas modificaciones, las células vegetales emplean dos sistemas enzimáticos principales: las aminooxigenasas y los citocromos P450 (CYP450), cuya función es incorporar un átomo de oxígeno del oxígeno molecular al contaminante mediante oxigenasas de función mixta. Además, ocurren otras reacciones como desaminación, desulfuración, epoxidación, peroxigenación y reducción. Los CYP450 están compuestos por dos proteínas distintas: una actúa como reductasa y la otra como hemoproteína con actividad de oxigenasa. (Varazashvili *et al.*, 2001).

Según el lugar donde se producen las transformaciones, las reacciones de oxidación se clasifican en tres tipos: (i) microsómicas, (ii)

En términos generales, las enzimas involucradas en esta fase actúan sobre moléculas contaminantes que presentan regiones no polares. En los procariontes, el citocromo P450 se encuentra en forma soluble, mientras que en los eucariotes está anclado a la membrana celular. (Pflugmacher y Sanderman 1998). Las plantas poseen versiones solubles de esta enzima dentro de sus células, lo que facilita la desintoxicación de los contaminantes. Al tratarse de la fase inicial del proceso, constituye la base de la fitorremediación; de este modo, cualquier planta que, en respuesta a un compuesto orgánico xenobiótico, produzca al menos una de estas enzimas puede ser considerada con capacidad fitorremediadora.

Ejemplo de Fitorremediación



Etapas II. La fase de conjugación interviene en la desintoxicación al enlazar carbohidratos, aminoácidos, péptidos o proteínas con el contaminante, a través de enzimas denominadas transferasas. Esta

modificación reduce la toxicidad de la sustancia, ya que aumenta su carácter hidrofílico, facilitando su movilidad y su posterior almacenamiento en las vacuolas celulares. (Schaffer et al., 2002).

Etapas III. En esta fase, los contaminantes que han adquirido mayor polaridad se almacenan dentro de las vacuolas. En ciertos casos, este proceso de adaptación conlleva la activación de enzimas responsables de la desintoxicación.

2.2.2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA FITORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS

La capacidad de las plantas para incorporar metales pesados está determinada por múltiples factores. Entre ellos se encuentran el pH y la textura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la temperatura, los nutrientes disponibles y los compuestos liberados por las raíces, los cuales afectan la solubilidad y biodisponibilidad de los metales. Además, la absorción radicular se ve influida por la actividad microbiológica de la rizosfera, la humedad, la presencia de iones competidores y la concentración de metales en la solución del suelo. (Yadav et al., 2018).

2.2.2.2 ABSORCIÓN Y TRANSFERENCIA DE LOS METALES EN LA PLANTA

La acumulación de metales pesados en las plantas implica varios procesos, como su movilización en el suelo, absorción por las raíces, carga en la xilema, transporte desde la raíz hasta el tallo, compartimentación celular y almacenamiento intracelular. La mayoría de estos metales se encuentran en formas insolubles que las plantas no pueden aprovechar directamente. Sin embargo, mediante la liberación de distintos exudados radiculares, las plantas pueden modificar el pH de la rizosfera y aumentar la solubilidad de los metales, haciéndolos más accesibles. Una vez disponibles, los metales se incorporan en la superficie de la raíz y

atraviesan la membrana celular hacia el interior de las células. La captación radicular ocurre principalmente por dos rutas: la vía apoplástica, que implica difusión pasiva, y la vía simplástica, que permite el transporte activo de los iones contra gradientes electroquímicos y de concentración a través de la membrana plasmática. (Dalvi & Bhalerao, 2013).

2.2.2.3 USO DE PLANTAS PARA DESCONTAMINAR SUELOS POR METALES PESADOS

La fitorremediación emplea plantas para eliminar contaminantes del ambiente. Estas especies pueden adaptarse a condiciones muy variadas y muchas de ellas desarrollan relaciones simbióticas con otros organismos. Este tipo de interacción resulta clave para su supervivencia en suelos salinos, con baja o alta fertilidad, o altamente contaminados con metales pesados. (Da Silva et al., 2019).

2.2.3. MOSTAZA (*Brassica juncea*)

La planta comúnmente llamada mostaza india (figura 4), integrante de la familia Brassicaceae, es reconocida como una de las especies más eficaces para la fitorremediación. Se emplea para extraer metales pesados como zinc (Zn), plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni), talio (Tl), cromo (Cr) y selenio (Se), debido a su elevada capacidad para acumular estos elementos en sus células. Las tablas 2 y 3 presentan información sobre sus características y clasificación taxonómica. (Rebaza, y Valverde, 2019).

Tabla 2

Taxonomía de Mostaza

Taxonomía	
Especie	B.Juncea
Genero	Brassica

Orden	Brassicales
Familia	Brassicaceae

Nota. Conabio, (2019).

Tabla 3

Característica de la mostaza (Brassica juncea)

	Características
tamaño	30 – 130 cm
Tallo	Angulado y glaucos
Hojas	Hojas superiores totalmente sésiles y lanceoladas
Flores	Son de color amarillo
Semillas	De 1.5 a 2 mm en diámetro, son de color marrón oscuro
Raíz	Pivotante

Nota. Conabio (2019).

Figura 4

Mostaza (Bassica Juncea)



Nota. (Conabio, 2019).

El cultivo de esta especie se realiza entre los días 10 y 14 tras la siembra, dependiendo del ciclo de cosecha, y muestra mayor tolerancia a condiciones

cálidas y húmedas. Prefiere suelos con un pH comprendido entre 4,3 y 8,3, y su desarrollo puede mejorarse mediante la aplicación de estiércol o la incorporación de otros cultivos para enriquecer el terreno. (Conabio, 2019).

2.2.4. HIGUERILLA (*Ricinus communis*)

La higuera (*Ricinus communis*) es una especie altamente invasora en Entre los países estudiados se encuentran Estados Unidos, Costa Rica, Cuba, Jamaica, Puerto Rico, Argentina, Chile, Ecuador, Uruguay y Paraguay, además de diversas zonas de Asia y Europa. (CABI, 2016).

La higuera es una especie no apta para el consumo y tiene la capacidad de desarrollarse en diversos tipos de suelo, por lo que Mazzani (2007) indica que:

La higuera presenta un crecimiento vigoroso, lo que le permite desarrollarse rápidamente incluso en etapas de sequía en regiones áridas y semiáridas, requiriendo un mínimo de 600 mm de precipitación anual. Posee inflorescencias en panícula terminal y hojas grandes, dentadas y con pecíolo largo, cuya longitud varía entre 6 y 60 cm, aunque no son muy numerosas. Esta planta puede cultivarse desde el nivel del mar hasta los 2.500 m de altitud; sin embargo, a mayor altura disminuye el contenido de aceite en sus semillas. Prefiere suelos con pH entre 6 y 7 y muestra baja tolerancia a la alcalinidad. Además, se caracteriza por su resistencia natural a enfermedades y plagas durante todo su ciclo de vida.

Información taxonómica

Especie:	<i>Ricinus communis</i> L.
Género:	<i>Ricinus</i>
Familia:	Euphorbiaceae
Orden:	Malpighiales
Clase:	Magnoliopsida
Phylum:	Magnoliophyta

Reino: Plantae

Nombre Científico: Sánchez (2005), esta especie es conocida científicamente como (*Ricinus communis*), el término *Ricinus* proviene del latín y significa (garrapata) haciendo alusión a la apariencia de su semilla, de ahí el nombre de la planta.

Samayoa y Mazzani (2007), se indica que la higuera posee un sistema radicular abundante y extenso, capaz de alcanzar profundidades superiores a un metro, lo que le confiere alta tolerancia a la sequía y un sólido anclaje al suelo.

Gracias a sus características, la higuera resulta ideal para la extracción de su aceite, lo que la convierte en un cultivo con gran potencial para la producción industrial de biodiesel. Además, no entra en competencia con la alimentación humana y puede cultivarse en tierras marginales destinadas a este fin. (NAVAS, 2008).

2.2.5. EL SUELO

El suelo puede definirse como un sistema dinámico y complejo formado por elementos bióticos y abióticos, funciona como el principal hábitat para la vida y la biodiversidad, además de sustentar diversos servicios ecosistémicos. (Morgado, et al., 2018).

Se trata de un sistema natural y dinámico que cubre la superficie terrestre y constituye uno de los recursos más valiosos, cumpliendo diversas funciones, entre las que sobresale la producción de alimentos. La edafosfera es la capa que recubre la tierra, interactuando continuamente con la geosfera, la atmósfera, la biosfera y la hidrósfera. (Jiménez, 2017).

2.2.6. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO

La creación del suelo está determinada por múltiples factores, incluyendo el material de origen, la topografía, el clima, la biota y la duración del proceso. Estos elementos afectan tanto las características

del suelo como su desarrollo, condicionando sus funciones, los servicios ecológicos que brinda y su capacidad para generar recursos. (Morgado et al., 2018).

Para realizar un análisis adecuado del suelo, es fundamental evaluar sus propiedades fisicoquímicas, incluyendo la textura, el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, fósforo, potasio, carbonatos y la capacidad de intercambio catiónico (Acta, 2004).

a) Textura del suelo

La textura del suelo describe el tamaño de sus partículas sólidas e inorgánicas y la proporción de arena, limo y arcilla presente (Mohamed y Paleólogos, 2018; Rai et al., 2017). Como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Diámetro de Partículas de Suelo

Fracción del suelo	Sistema del Dpto. USA	Sistema internacional
	Diámetro en mm	Diámetro en mm
Arena muy gruesa	1,0-2,0	-
Arena gruesa	0,5-1,0	0,2-2,0
Arena media	0,25-0,5	-
Arena fina	0,1-0,25	0,02-0,2
Arena muy fina	0,05-0,1	0,002-0,02
Limos	0,002-0,05	-
Arcilla	<0,002	<0,002

Nota. López, (2013), estas características permiten entender diversos comportamientos en la biodiversidad del suelo, ya que si las partículas son más pequeños el suelo presenta una textura arcillosa, mientras si es mayor tamaño de partículas la textura se considera arenosa.

b) Ph.

Según Kalev y Toor, (2018), se indica que el pH del suelo refleja su grado de acidez o alcalinidad en una escala de 0 a 14. Normalmente, los suelos presentan valores entre 4 y 8,5, los cuales pueden verse influenciados por el potencial redox, la presencia de carbonatos y la

capacidad de amortiguación proporcionada por componentes naturales o añadidos mediante la actividad humana (Durães et al., 2018). Se trata de un elemento que, junto con la presencia de arcillas y materia orgánica, influye en la capacidad de intercambio catiónico, así como en la solubilidad y precipitación de los compuestos químicos del suelo.

Tabla 5

La clasificación de la acidez en solución de suelo

pH de la solución de suelo	Categoría
Menores a 4	Suelos extremadamente ácidos
4.5 a 5.0	Suelo muy fuertemente ácido
5.1 a 5.5	Suelo fuertemente ácido
5.6 a 6.0	Suelo medianamente ácido
6.1 a 6.5	Suelo ligeramente ácido
6.6 a 7.3	Suelo neutro
7.4 a 7.8	Suelo medianamente básico
7.9 a 8.4	Suelo moderadamente básico
8.5 a 9.0	Suelo fuertemente básico
Mayores a 9.1	Suelo muy fuertemente básico

Nota. Los suelos con valores de pH altos pueden señalar la presencia de características fuertemente alcalinas. (Guillermo & Francisco, 2011).

c) Conductividad eléctrica.

Se refiere a la habilidad de un suelo o medio físico para conducir corriente eléctrica, existiendo un valor específico de conductividad eléctrica para cada tipo de suelo. En los procesos de electrorremediación, las variaciones del pH modifican la conductividad total del suelo, generando perfiles de voltaje este comportamiento depende de las características del sustrato y, principalmente, de los cambios en el pH provocados por el efecto electrocinético, los cuales alteran la conductividad del medio. (De la Rosa et al., 2007).

d) Materia orgánica

La materia orgánica se forma a partir de la descomposición, movilización y acumulación de restos vegetales y animales (Volk y

Loeppert, 2018). De igual manera, la actividad de los microorganismos y sus procesos bioquímicos afectan características del suelo como la porosidad, los ciclos biogeoquímicos y la evolución de los distintos horizontes. (Kalev y toor, 2018).

e) Capacidad de intercambio catiónico.

La capacidad de un suelo para retener y reemplazar iones se conoce como capacidad de intercambio, cabe precisar tanto cargas positivas como negativas se encuentran en las superficies coloidales, los suelos de esta zona presentan predominantemente cargas negativas, resultando en una carga neta negativa. Esto provoca que los cationes (iones positivos) se adsorban con mayor facilidad en los sitios de intercambio que los aniones (iones negativos), de modo que la capacidad de intercambio de cationes (CEC) suele ser superior a la de aniones (AEC). Además, los suelos de textura fina muestran valores más elevados de capacidad de intercambio debido a la mayor cantidad de coloides presentes, en comparación con los suelos de textura gruesa. (Volke y Velasco, 2002).

2.2.7. CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Los contaminantes presentes en el suelo representan un riesgo únicamente cuando producen efectos dañinos, ya que los organismos no responden de manera uniforme, por otro lado, la contaminación puede dañar la biota del suelo, lo que a su vez puede alterar sus funciones y servicios, por lo que estos aspectos deben considerarse en los procesos de evaluación de la calidad del suelo. Asimismo, los cambios climáticos generan presión sobre el suelo al modificar sus propiedades físicas, químicas y estructurales. (Morgado et al., 2018).

Aunque ciertos contaminantes pueden presentarse de manera natural en el suelo, la mayoría proviene de actividades humanas, incluyendo la minería, la extracción de petróleo, la agricultura, la industria e incluso las zonas urbanas, donde el manejo inadecuado de residuos

sólidos y aguas residuales contribuye a su acumulación, entre otras fuentes. (Maqueda, 2003).

Factores que afectan la acumulación de metales en el suelo

Vilcapoma (2019), nos indica que la acumulación de metales en el suelo está influenciada por diversos factores, entre los que se incluyen el pH, la textura, el contenido de materia orgánica, las condiciones redox, la salinidad, la presencia de carbonatos y la humedad.

PH: Se trata de un factor clave, ya que permite entender la movilidad de los cationes, de los cuales la mayoría de estos metales se encuentra en suelos ácidos; no obstante, al elevar el pH, se incrementa la retención y adsorción de los cationes, lo que reduce la solubilidad de los metales en el suelo.

Textura: Corresponde a la proporción y tamaño de las partículas inorgánicas presentes en el suelo, aspectos que influyen en los procesos de absorción, filtración y pérdida de metales en dichos medios.

Condiciones redox: Se refiere al conjunto de procesos de oxidación y reducción que ocurren en el suelo son estos que determinan el estado de oxidación de los metales, lo cual influye indirectamente en su movilidad y disponibilidad.

Materia orgánica: Desempeña un rol clave en la adsorción del suelo al intervenir en la creación de complejos de intercambio. La asociación de los metales con esta fracción depende de las características específicas de cada elemento.

Carbonatos: Contribuyen a mantener elevados los valores de pH en el suelo, favoreciendo así la precipitación de los metales pesados y reduciendo su movilidad.

Salinidad: Es la cantidad de sales solubles acumuladas en el suelo dicho componente puede alterar el pH, afectar la conductividad eléctrica y modificar la disponibilidad de nutrientes en relación con los metales

pesados, niveles altos de salinidad no solo facilitan su movilidad, sino que también aumentan su solubilidad y, en consecuencia, el riesgo de toxicidad para los organismos edáficos y las plantas.

2.2.8. CONTAMINACIÓN DEL SUELO CON METALES PESADOS

La contaminación del suelo ocurre cuando se acumulan elementos tóxicos en niveles que exceden la capacidad de regulación natural del terreno, lo que deteriora parcial o totalmente su fertilidad. Esta acumulación puede deberse tanto a procesos naturales como a diversas actividades humanas. (Morquehuana y Valverde, 2012).

Aunque los metales pesados existen de forma natural en el suelo, estudios recientes han evidenciado que su concentración se ha incrementado debido a actividades humanas como la industrial, agrícola y la gestión inapropiada de residuos sólidos. (Giuffré et al., 2005).

Alkemi (2017), se indica que el plomo (Pb) es un metal presente de manera habitual en los suelos, pero su dispersión al aire ocurre a través de actividades humanas como la minería, la industria, la fabricación de aleaciones, la quema de carbón, el uso de hidrocarburos, la disposición de desechos y los gases de los vehículos, constituyéndose en la principal fuente de contaminación del suelo por este metal.

2.2.9. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PLOMO

De acuerdo con Ubillus (2003), el plomo (Pb), al estar expuesto al medio ambiente, sufre una oxidación superficial que genera una capa protectora de color gris, identificada como subóxido de plomo (Pb_2O). Durante este proceso, el metal pierde su brillo característico, aunque dicha capa le proporciona protección frente a una oxidación posterior. Asimismo, mencionar que el plomo se ubica dentro del grupo IV A de la tabla periódica.

El plomo (Pb) es un metal que, en su forma natural, exhibe un color gris azulado y se encuentra en pequeñas cantidades en la corteza terrestre, principalmente en minerales como galena, cerusita y anglesita.

Este elemento representa un grave riesgo para la salud humana, afectando el sistema nervioso, alterando funciones corporales normales y pudiendo causar enfermedades con efectos teratogénicos y cancerígenos. (De la Roza, 2005).

2.2.10. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE PLOMO

Las fuentes principales de contaminación por plomo incluyen actividades como la fundición, el procesamiento de metales secundarios y la producción de metales, además de la fabricación de baterías, pigmentos y productos químicos. Gran parte del plomo liberado al medio ambiente eventualmente se deposita en el suelo, donde su comportamiento depende de las características fisicoquímicas del terreno, involucrando procesos como adsorción, intercambio iónico, precipitación y oxidación. En la naturaleza, el plomo generalmente se encuentra como un contaminante común en forma de óxidos e hidróxidos. (De la Roza, 2005).

2.2.11. CADMIO EN EL SUELO

El cadmio es un metal carente de función biológica y resulta tóxico incluso en concentraciones bajas. Este elemento puede alterar la composición de los microorganismos presentes en el suelo, reduciendo su capacidad para descomponer la materia orgánica. Además, el cadmio puede acumularse en plantas, animales del suelo e incluso en animales superiores que se alimentan de pastos o consumen aguas contaminadas. (Rábago, 2011).

Según Ramos (2002), el cadmio es un metal de transición ligeramente soluble que, en ciertos casos, actúa de manera parecida al calcio (Ca^{2+}). Cuando no hay presencia de fosfatos, se fija rápidamente al suelo. Este metal también se emplea ampliamente en la industria, particularmente en la producción de aleaciones y pigmentos para baterías.

¿Cómo se encuentra el cadmio en el medio ambiente?

El cadmio procede de la minería, la industria y la quema de carbón o desechos; no se degrada, puede transformarse y viajar largas distancias antes de depositarse estos suelen fijarse en el suelo y es absorbido por plantas, peces y otros organismos (ATSDR ,2008).

¿Cómo puede ocurrir la exposición al cadmio?

La exposición al cadmio puede ocurrir al consumir alimentos que lo contienen, aunque generalmente en bajas concentraciones; los niveles más elevados se encuentran en mariscos, hígado y riñones. Por otro lado, podemos absorber al fumar cigarrillos o inhalar humo de tabaco, al respirar aire contaminado en entornos laborales, al ingerir agua con cadmio o al vivir cerca de instalaciones industriales que lo emiten al ambiente. (ATSDR 2008).

2.2.12. IMPACTOS EN LA SALUD POR SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS

Los metales pesados están presentes prácticamente en todos los ambientes, por lo que no es raro que las afecciones asociadas a ellos y a sus compuestos sean frecuentes. Su ingreso al organismo se produce principalmente por vía cutánea, ingestión o inhalación. La exposición a estos metales se vincula con efectos adversos para la salud, incluyendo daño renal, cáncer, trastornos circulatorios y afectaciones del sistema nervioso central. No obstante, ciertos metales son indispensables para el organismo. Algunos metales pesados resultan especialmente peligrosos debido a que no se degradan fácilmente y carecen de funciones metabólicas dentro del ecosistema. (Rodríguez, 2017).

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

Calidad de suelos

La calidad del suelo se define como su capacidad intrínseca para desarrollar diversas funciones de carácter medioambiental, agronómico,

económico, arqueológico, cultural y recreativo. Este estado depende de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales permiten sostener un potencial ecosistémico tanto natural como antropogénico (MINAM, 2014).

Contaminación

“Es la incorporación de una sustancia química o mezcla de compuestos en un medio no adecuado (como aire, agua o suelo), con potencial de generar impactos negativos en la salud humana o en el entorno natural” (MINAM, 2013).

Contaminante

“Se entiende por contaminante a toda sustancia química que no forma parte natural del suelo o cuya presencia supera los niveles de referencia, pudiendo generar impactos negativos sobre la salud humana o el entorno ambiental.” (MINAM. 2013, p. 07).

Suelo contaminado

“Ocurre cuando las propiedades químicas del suelo se alteran de manera perjudicial debido a la acumulación de contaminantes tóxicos provenientes de actividades humanas, según lo establecido en el D.S. N°002-2013-MINAM.” (MINAM, 2013, p. 16).

Estándar de calidad ambiental

El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) establece los límites seguros de concentración de sustancias o propiedades del aire, agua y suelo, protegiendo la salud humana y el ecosistema. (MINAM, 2013).

Metal pesado

“Se trata de metales que presentan una densidad relativamente elevada y cuya presencia puede resultar tóxica o incluso letal aun en concentraciones mínimas. Entre estos se incluyen el talio (Tl), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), entre otros.” (Álvarez, 2005).

Remediación

Conjunto de acciones o procedimientos implementados en un sitio afectado por contaminación, con el fin de reducir o eliminar los contaminantes, asegurando la protección de la salud de las personas y la preservación de los ecosistemas. (MINAM, 2013).

Botadero

Lugar inapropiado destinado al depósito final de residuos sólidos en zonas urbanas, rurales o terrenos abandonados, que genera peligros para la salud pública y el medio ambiente. (MINAM, 2016).

Toxicidad

“Capacidad de una sustancia o combinación de sustancias para provocar daños tanto en la salud humana como en el entorno ambiental.” (MINAM, 2013).

Fitorremediación

“La fitorremediación consiste en un conjunto de técnicas que permiten disminuir los niveles de distintos compuestos mediante reacciones bioquímicas llevadas a cabo por plantas y sus microorganismos asociados.” (Delgadillo, A, et al., 2011).

Ex situ

Técnica para analizar suelos contaminados, para lograr determinar la cantidad de contaminantes que presenta en sus características, se necesita excavar o remover el suelo antes de su tratamiento. Las muestras pueden ser estudiadas fuera de su lugar de origen (Guillermo & Francisco, 2011).

Lixiviación

“Se trata de un proceso mediante el cual ciertos elementos son retenidos o precipitados, influenciado por propiedades del suelo como su textura,

contenido de materia orgánica, pH y presencia de carbonatos, etc.” (Guzmán, 2007).

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

La remediación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba mediante la fitorremediación con la mostaza (*Brassica Juncea*) será diferente comparado con la higuera (*Ricinus communis*).

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

Existe una variación en las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del proceso de fitorremediación utilizando mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*).

Existe una variación en la concentración de plomo y cadmio en el suelo antes y después del proceso de fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*).

2.5. VARIABLES

2.5.1. VARIABLE DE CALIBRACIÓN

Fitorremediación

2.5.2. VARIABLE EVALUATIVA

Calidad del suelo

2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 6

Operacionalización de Variables

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	INDICADOR	VALOR FINAL	TIPO DE VARIABLE	
CALIBRACIÓN Fitorremediación	Uso de plantas para remover absorber, eliminar o secuestrar contaminantes que se encuentran presentes en el agua o suelo.	Mostaza (<i>Brassica juncea</i>)	Cantidad de hojas	-Numérica discreta	
		Higuerilla (<i>Ricinus communis</i>)	Altura del tallo		
			Grosor del tallo		
EVALUATIVA calidad del suelo	La calidad del suelo es su capacidad para sostener funciones-como-la-productividad-y-la biodiversidad de forma sostenible Según la FAO (2015), puede evaluarse mediante indicadores como la textura, el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).	Propiedades físicoquímicas			
		- Na+	-meq/100g	-Numérica continua	
		- K+	-%		
		- Mg+2	-meq/100g		
		- Ca+2	-ppm		
		- CIC	-meq/100g		
		- K	-%		
		- P	-meq/100g		
		- M.O	-(1:1)		
		- CaCO3	-meq/100g		
		- C.E.	-ppm		
		- PH	-dS/m		
		Metales pesados			
		- Plomo	-ppm		
		- Cadmio			
		El DS-011-2017-MINAM-establece los límites de sustancias químicas en el suelo que no representan riesgo para la salud ni el ambiente			

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con la cantidad de variables evaluadas, la investigación se clasifica como experimental. Según la organización temporal de las mediciones, se considera prospectiva, ya que se recopilaron datos primarios. Por el número de veces que se midió la variable de interés, el estudio es longitudinal, dado que la variable se evaluó en múltiples momentos. Finalmente, en cuanto a la participación del investigador, se trata de un estudio con intervención, debido a la manipulación directa de una de las variables. (Supo & Zacarías, 2020).

3.1.1. ENFOQUE

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, dado que se centró en un problema específico y bien definido, recolectando información numérica relacionada con la investigación. Las muestras fueron examinadas en laboratorio y los datos obtenidos se analizaron estadísticamente, presentándose mediante tablas y gráficos utilizando el software IBM SPSS.

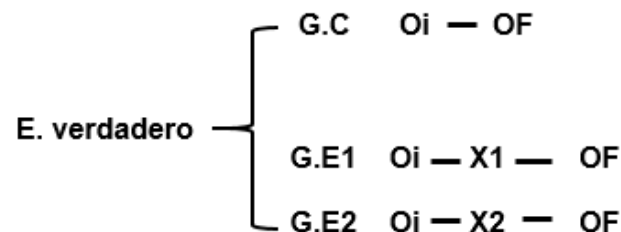
3.1.2. ALCANCE O NIVEL

La investigación se clasifica dentro del nivel aplicada, ya que se centró en explicar cómo se comporta una variable en relación con otra, al mismo tiempo que se llevó a cabo una intervención sobre la población con el objetivo de mejorar ciertas condiciones dentro del grupo estudiado. (Supo & Zacarías 2020).

3.1.3. DISEÑO.

La investigación adoptó un diseño experimental de tipo prospectivo, longitudinal y con intervención (Supo & Zacarías, 2020). A continuación, se presenta un esquema que representa el diseño experimento verdadero utilizado en el estudio.

Según el contexto y los objetivos planteados en la investigación, se eligió un diseño de tipo experimental. Este enfoque implica trabajar con un grupo experimental y un grupo de control, recolectando información de ambos para analizar los resultados obtenidos inicialmente y, posteriormente, realizar una evaluación final de los efectos observados.



Dónde:

X2: Intervención con la planta Higuera (*Ricinus communis*)

X1: Intervención con la planta Mostaza (*Brassica Juncea*)

OF: Observación final.

Oi: Observación inicial.

GE2: grupo experimental con la Higuera (*Ricinus communis*)

GE1: grupo experimental con la planta Mostaza (*Brassica juncea*)

G.C: Grupo de control

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población en estudio de la investigación estuvo conformada por el suelo recolectado del botadero de Marabamba, el cual fue seleccionado a partir de una pre selección en las que se verificaron escenarios de contaminación que presentaran los suelos de mala

calidad, los cuales fueron reflejados en la variación de sus propiedades fisicoquímicas.

Las estaciones de monitoreo se situaron en el botadero de Marabamba, Distrito y Provincia de Huánuco, según se muestra en la tabla y el plano adjuntos.

Tabla 7

Coordenadas de Ubicación de Población de Estudio

ESTACION	COORDENADAS UTM-WGS 84		ALTITUD
	NORTE	ESTE	
01	8899871.46 m	362020.52 m	2963

3.2.2. MUESTRA

La muestra se obtuvo mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional o por conveniencia, elegido según el criterio del investigador y otros factores propios de la investigación, sin aplicar métodos mecánicos ni fórmulas de probabilidad. (Hernández, 2014). En este contexto, se utilizó una muestra total de 50 kg de suelo, distribuida en 10 maceteros: 4 destinados a evaluar la efectividad de la Mostaza (*Brassica juncea*) en la mejora del suelo, 4 para analizar la eficiencia de la Higuierilla (*Ricinus communis*) y 2 fueron destinados como testigo los cuales se consideró al maíz (*Zea mays* L.).

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1 PARA PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Análisis documental: Se realizó el estudio y análisis de una manera objetiva y sistemática de los documentos leídos tales como artículos, tesis, página web y otros que puedan contribuir datos sobre el tema de trabajo y procesarlos según los objetivos de la investigación.

Trabajo de campo: Se efectuaron recorridos a la zona de intervención con el fin de estudiar el área y recopilar información preliminar, incluyendo ubicación de puntos específicos y distancias dentro del sitio. Posteriormente, se realizaron visitas adicionales para la recolección de muestras, cumpliendo con la normativa vigente aplicable.

➤ **Primera etapa**

Obtención del suelo contaminado: En cada ubicación definida del botadero de Marabamba, se retiró la vegetación superficial y se limpió el suelo eliminando restos orgánicos y escombros. A continuación, con una pala se realizaron excavaciones hasta alcanzar los 30 cm de profundidad. La primera extracción se hizo mediante un corte en forma de V, colocando la tierra extraída a un lado. La muestra de suelo se trasladó a un saco, donde las submuestras se redujeron a fragmentos de aproximadamente 1 cm, se mezclaron uniformemente y finalmente se tamizaron y acondicionaron correctamente para su almacenamiento.

➤ **Segunda etapa**

La muestra se trasladó al laboratorio bajo cadena de custodia para analizar sus propiedades fisicoquímicas y la presencia de metales pesados.

➤ **Tercera etapa**

Una vez obtenidas las muestras, se acondicionó un área donde se ejecutó la investigación, para ello, se limpió y cercó el lugar elegido, se hicieron las marcaciones designadas para cada macetero y seguidamente se procedió a cercar con malla rashell para brindar condiciones aptas de iluminación a las plantas.

➤ Cuarta etapa

En cada maceta se sembraron plantas de mostaza e higuierilla a una profundidad de cinco centímetros con la ayuda de un repicador de madera de acuerdo a los tratamientos en estudio.

➤ Quinta etapa

El suelo sometido a remediación fue remitido al laboratorio de análisis de suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde se realizaron los estudios necesarios para la investigación.

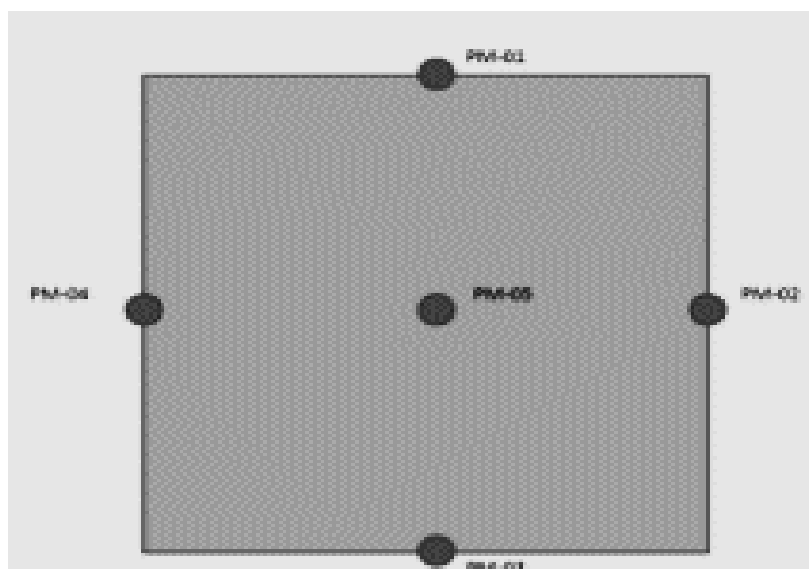
El procedimiento se realizó siguiendo la normativa vigente, incluyendo la Guía de Muestreo de Suelos R.M. N°085-2014-MINAM y lo establecido en el D.S. 011-2017-MINAM.

Para áreas de contaminación de forma regular menores a 1000 m²:

Se tomaron las muestras del terreno afectado siguiendo un diseño cuadrado, recogiendo tierra en cuatro esquinas y un punto adicional en el centro, sumando un total de cinco sitios de muestreo.

Figura 5

Localización de puntos de muestreo en el área de excavación regular, forma de Cuadrado



Nota. Puntos de toma de muestra del área contaminada en forma cuadrada (MINAM, 2013).

Para la obtención de datos, se utilizó como referencia la Guía para el Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente, desarrollada por la Dirección General de Calidad Ambiental, en concordancia con el Decreto Supremo N°002-2013-MINAM, tomando en cuenta los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos, considerando:

- ✓ Condiciones de seguridad de la muestra.
- ✓ Cadena de custodia.
- ✓ Ficha de muestreo de suelo.
- ✓ Etiquetado.

Instrumentos:

Tabla 8

Lista de Materiales y Equipos

Materiales	Equipos	Materiales y equipos de Laboratorio
Pala	Cámara fotográfica	Pinza
Cal	Balanza	Agitador o mezclador
Carretilla	Computadora	Pipeta
Maceteros	GPS	Portaobjetos
Tamizador		Matraz
Costales		Placa de Petri
Botas		Microscopio
Guantes		Gradilla/rejilla
Malla Rashell		Tubo de ensayo
		Probeta

3.3.2 PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS

Se emplearon tablas y gráficos derivados de los análisis estadísticos, dado que su uso resulta fundamental para presentar los resultados con claridad y exactitud. Cada representación contará con una explicación técnica que oriente al lector en la interpretación de los datos y en la identificación de las relaciones relevantes entre las variables analizadas. La información obtenida servirá como base para el

desarrollo de la discusión y, finalmente, para la formulación de conclusiones sólidas y bien fundamentadas.

3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

A continuación, se describen los métodos empleados para el procesamiento y la exposición de los datos utilizados en este estudio.

Tabla 9

Técnicas para el procesamiento y Análisis de la información

Etapas	Técnica	Prueba estadística
Procesamiento	Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas	Shapiro Wilk y Levene
Análisis y presentación	Software SPSS sistematización redacción científica	T para una muestra, T para muestras independientes y Wilcoxon.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO

Tabla 10

*Parámetros físico-químicos valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo analizado antes de la intervención de las plantas Mostaza (*Brassica juncea*) e Higuierilla (*Ricinus communis*)*

pH	C.E.	CaCO ₃	M.O.	P	K		Cationes Cambiables			
	(1:1)					CIC	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺
(1:1)	dS/m	%	%	ppm	ppm		meq/100g			
7.65	13.7	6.71	5.25	45.9	3390	8.32	1.27	2.47	3.79	0.79
	5									

Nota. Valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo en el pre-test.

Se observa un pH de 7,65, lo que indica una ligera alcalinidad; además, la conductividad eléctrica (13,75 dS/m) refleja una condición salina considerable. El contenido de carbonatos de calcio (6,71%) y materia orgánica (5,25%) se encuentra dentro de valores medios, mientras que el fósforo (45,9 ppm) y el potasio (3390 ppm) se presentan en concentraciones relativamente altas. La capacidad de intercambio catiónico (8,32 meq/100 g) evidencia una retención moderada de nutrientes, destacando el predominio de potasio (1,27 meq/100 g), seguidos por sodio (0,79 meq/100 g), magnesio (3,79 meq/100 g) y calcio (2,47 meq/100 g). Estos resultados indican que el suelo cuenta con disponibilidad aceptable de nutrientes, aunque la salinidad elevada podría influir en el desarrollo de las plantas.

Tabla 11*Presencia de Metales pesado en el Análisis Inicial*

Metales pesados	
Pb	Cd
total	total
ppm	ppm
208.33	10.83

Nota. Valores de los metales pesados en el pre-test.

En la tabla 11 Se observa que el plomo (Pb) alcanzó un valor de 208,33 ppm, mientras que el cadmio (Cd) registró 10,83 ppm. Ambos valores superan los niveles de referencia establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental para suelos agrícolas (MINAM, 2017), lo que evidencia una condición de contaminación significativa. Estos resultados confirman la necesidad de aplicar procesos de fitorremediación para reducir la presencia de dichos contaminantes y recuperar la calidad del suelo.

Tabla 12*Parámetros físico-químicos finales con los Tratamientos de Mostaza e Higuierilla (1)*

Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla
CE											
pH		(SALINIDAD)		CaCO ₃ %		M.O %		P ppm		K ppm	
dS/m											
7.66	7.89	3.14	1.31	4.92	5.81	6.65	8.11	109.1	111.1	1785	1845
7.75	7.46	1.04	3.66	7.15	4.92	5.99	6.78	104.7	113.1	1210	1720
7.46	8.04	4.38	0.69	5.37	2.68	5.85	6.78	112.3	99.1	1755	1420
7.65	7.32	2.31	2.87	4.47	5.37	5.65	7.85	107.1	108.3	1305	1915

Nota. Valores de los parámetros físico-químicos del suelo en el post-test.

Se describen los valores obtenidos de los análisis de suelo fisicoquímicos de los tratamientos estudiados con intervención de las especies

de Higuierilla (*Ricinus communis*) y Mostaza (*Brassica juncea*), la tabla describe los valores para las 4 muestras de estudio.

Tabla 13

Parámetros físico-químicos finales con los Tratamientos de Mostaza e Higuierilla (2)

Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100g)		Ca ²⁺ (meq/100g)		Mg ²⁺ (meq/100g)		K ⁺ (meq/100g)		Na ⁺ (meq/100g)	
20.40	22.44	14.85	15.43	3.13	3.13	2.28	3.57	0.14	0.31
13.87	14.69	7.68	7.14	3.13	5.10	2.97	2.14	0.10	0.31
18.77	15.30	11.97	10.69	3.13	2.14	3.29	2.17	0.38	0.30
15.10	15.51	8.69	6.46	3.29	5.60	2.77	3.12	0.35	0.33

Nota. Valores de los parámetros físico-químicos del suelo en el post-test.

Se describen los valores obtenidos de los análisis de suelo físicoquímicos de los tratamientos estudiados con intervención de las especies de Higuierilla (*Ricinus communis*) y Mostaza (*Brassica juncea*), la tabla describe los valores para las 4 muestras de estudio.

Tabla 14

Metales pesados Pb Total y Cd Total finales con los Tratamientos de Mostaza e Higuierilla

Mostaza	Higuierilla	Mostaza	Higuierilla
Pb Total ppm		Cd Total ppm	
139.29	80.12	6.86	7.81
182.06	134.92	7.88	7.04
108.35	145.29	6.88	9.00
161.34	50.43	6.52	6.59

Nota. Valores de los metales pesados en el post-test.

Se observa que ambos tratamientos redujeron los niveles de Pb respecto a los valores iniciales (208,33 ppm). En mostaza, las concentraciones oscilaron entre 108,35 y 182,06 ppm, mientras que en higuierilla variaron de 50,43 a 145,29 ppm, destacando esta última por alcanzar el valor más bajo. En cuanto al Cd, los valores se mantuvieron en un rango más estrecho: entre 6,52 y 7,88 ppm en mostaza y entre 6,59 y 9,00 ppm en higuierilla, evidenciando reducciones moderadas respecto al valor inicial (10,83 ppm).

Estos resultados muestran una mayor eficiencia de la higuera en la disminución de Pb, mientras que para Cd las reducciones fueron similares en ambas especies.

Tabla 15

Prueba de Normalidad con el Estadístico Shapiro Wilk

Pruebas de normalidad				
	ESPECIE	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
PH	MOSTAZA	0.906	4	0.459
	HIGUERILLA	0.912	4	0.494
CE	MOSTAZA	1	4	1
	HIGUERILLA	0.939	4	0.651
CaCO ₃	MOSTAZA	0.889	4	0.376
	HIGUERILLA	0.853	4	0.236
M.O	MOSTAZA	0.897	4	0.418
	HIGUERILLA	0.809	4	0.12
P	MOSTAZA	0.994	4	0.979
	HIGUERILLA	0.886	4	0.364
K	MOSTAZA	0.826	4	0.156
	HIGUERILLA	0.908	4	0.471
CIC	MOSTAZA	0.925	4	0.566
	HIGUERILLA	0.718	4	0.018
Ca +2	MOSTAZA	0.937	4	0.638
	HIGUERILLA	0.901	4	0.436
Mg +2	MOSTAZA	0.63	4	0.001
	HIGUERILLA	0.917	4	0.518
K +	MOSTAZA	0.985	4	0.93
	HIGUERILLA	0.857	4	0.251
Na +	MOSTAZA	0.844	4	0.206
	HIGUERILLA	0.895	4	0.406
Pb_Total	MOSTAZA	0.988	4	0.949
	HIGUERILLA	0.906	4	0.462
Cd_Total	MOSTAZA	0.851	4	0.229
	HIGUERILLA	0.954	4	0.741

Nota. Prueba de Normalidad con el Estadístico Shapiro Wilk.

Se muestran los resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk aplicada a las variables evaluadas en suelos tratados con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*). En la mayoría de los casos, los valores de significancia (Sig. > 0,05) indican que las variables siguen una distribución normal, tanto para mostaza como para higuera. Sin embargo, se identificaron excepciones: el magnesio intercambiable (Mg²⁺) en mostaza (p = 0,001) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en higuera (p = 0,018) no cumplen con el supuesto de normalidad (Sig. < 0,05). Por tanto, en los

análisis estadísticos posteriores, estas variables deberán ser evaluadas con pruebas no paramétricas o mediante transformaciones adecuadas.

Tabla 16

Pruebas de Homogeneidad de Varianzas con el Estadístico Levene

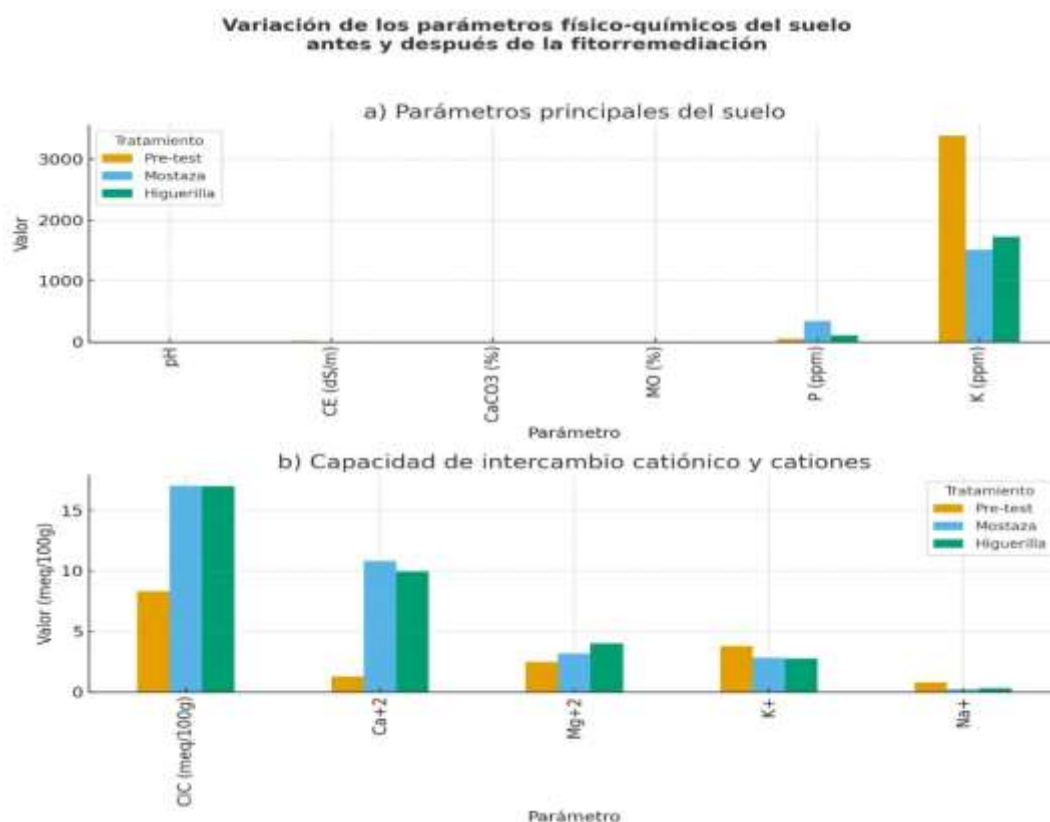
Prueba de homogeneidad de varianza		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
PH	Se basa en la media	13.390	1	6	0.011
CE	Se basa en la media	0.047	1	6	0.836
CaCO ₃	Se basa en la media	0.114	1	6	0.747
M.O	Se basa en la media	4.704	1	6	0.073
P	Se basa en la media	1.056	1	6	0.344
K	Se basa en la media	2.347	1	6	0.176
CIC	Se basa en la media	0.031	1	6	0.867
Ca +2	Se basa en la media	0.199	1	6	0.671
Mg +2	Se basa en la media	32.592	1	6	0.001
K +	Se basa en la media	3.761	1	6	0.101
Na +	Se basa en la media	109.441	1	6	0.000
Pb_Total	Se basa en la media	1.834	1	6	0.224
Cd_Total	Se basa en la media	1.475	1	6	0.270

Nota. Prueba de Homogeneidad de Varianzas.

Se presenta los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene aplicada a las variables evaluadas en mostaza e higuera. En la mayoría de los casos, los valores de significancia (Sig. > 0,05) indican que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, lo que permite aplicar análisis paramétricos. No obstante, se identificaron excepciones en el pH ($p = 0,011$), el magnesio intercambiable (Mg^{2+}) ($p = 0,001$) y el sodio intercambiable (Na^{+}) ($p = 0,000$), cuyos valores son menores a 0,05, lo que evidencia varianzas heterogéneas entre tratamientos. Para estas variables será necesario emplear pruebas alternativas que no asuman homogeneidad de varianza.

Figura 6

Comparación de los parámetros fisicoquímicos del suelo en pre-test y después de los tratamientos con mostaza (*brassica juncea*) e higuierilla (*ricinus communis*)

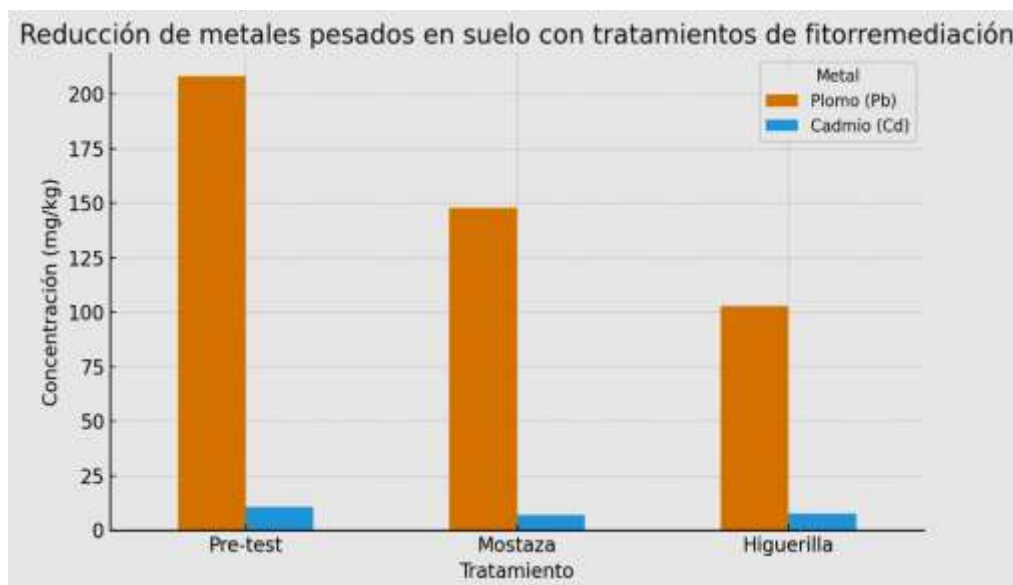


Nota. Elaboración de acuerdo con los análisis de laboratorio.

Los resultados muestran que los tratamientos con mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*) mejoraron notablemente la calidad del suelo: el pH se mantuvo estable dentro del rango óptimo, la conductividad eléctrica disminuyó de un nivel de salinidad severa a valores permisibles, y el carbonato de calcio se redujo acercándose al límite aceptable. La materia orgánica se incrementó por encima del rango mínimo recomendado, al igual que la capacidad de intercambio catiónico, que alcanzó niveles adecuados para retener nutrientes. En cuanto a los elementos, el fósforo aumentó de manera significativa, el potasio disminuyó, pero aún se mantuvo en valores elevados, y los cationes intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺) quedaron dentro de los rangos apropiados, mientras que el sodio descendió a niveles seguros. En conjunto, ambos tratamientos reflejan una mejora integral en la fertilidad y balance químico del suelo, favoreciendo su uso agrícola.

Figura 7

Concentración de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el suelo antes y después de los tratamientos con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*)



Nota. Elaboración de acuerdo con los análisis de laboratorio.

El análisis evidencia que las concentraciones iniciales de plomo (208.33 ppm) y cadmio (10.83 ppm) en el suelo reflejaban una condición de contaminación moderada; sin embargo, tras 120 días de fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*), se logró una reducción significativa de ambos metales. La higuera mostró mayor eficacia en la disminución de plomo (102.69 ppm; reducción del 50,7 %) y la mostaza en la reducción de cadmio (7,04 ppm; reducción del 35,1 %), aunque ambos cultivos contribuyeron a mejorar la calidad del suelo. Al contrastar estos resultados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos, se evidencia una notable disminución de la contaminación y un menor riesgo de toxicidad.

4.1.2. ANÁLISIS INFERENCIAL

Tabla 17

Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para parámetro pH

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de ph_M es igual a 7,65.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	1,000	Conserve la hipótesis nula.
2	La mediana de ph_H es igual a 7,65.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	0,715	Conserve la hipótesis nula.

Nota. Análisis del parámetro pH.

El análisis mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra evidenció que no existen diferencias significativas entre los valores de pH obtenidos tras los tratamientos y el valor de referencia inicial de 7,65, dado que en ambos casos los niveles de significancia fueron superiores a 0,05 ($p = 1,000$ para mostaza y $p = 0,715$ para higuierilla). En consecuencia, se acepta la hipótesis nula, lo cual confirma que los tratamientos con mostaza y con higuierilla no generaron cambios estadísticamente relevantes en el pH del suelo.

Tabla 18

Prueba Estadística t para una muestra para parámetro CE

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 13.75						
					95% de intervalo de confianza de la diferencia	
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior
CE_M	-15,704	3	0,001	-11,03250	-13,2682	-8,7968
CE_H	-16,954	3	0,000	-11,61750	-13,7982	-9,4368

Nota. Análisis del parámetro CE.

El análisis estadístico mediante la prueba t para una muestra, considerando como valor de referencia 13,75 dS/m, evidenció

reducciones significativas en la conductividad eléctrica (CE) del suelo tras la aplicación de mostaza (CE-M) e higuierilla (CE-H). Los valores de significancia ($p = 0,001$ para mostaza y $p = 0,000$ para higuierilla) fueron inferiores a 0,05, lo que confirma diferencias estadísticamente significativas respecto al valor inicial. Asimismo, las diferencias de medias negativas (-11,03 en mostaza y -11,62 en higuierilla) indican una disminución marcada de la salinidad. Los intervalos de confianza al 95% corroboran la consistencia de este efecto.

Tabla 19

Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro CaCO_3

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 6.71						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior Superior	
CaCO_3_M	-2,100	3	0,127	-1,23250	-3,1006	0,6356
CaCO_3_H	-2,896	3	0,063	-2,01500	-4,2294	0,1994

Nota. Análisis del parámetro CaCO_3 .

El análisis con la prueba t para una muestra, considerando como valor de referencia 6,71 %, mostró que en ambos tratamientos (mostaza e higuierilla) los valores de significancia fueron mayores a 0,05 ($p = 0,127$ y $p = 0,063$, respectivamente), por lo que no se evidencian diferencias estadísticamente significativas respecto al valor inicial. Si bien las medias observadas reflejan una ligera disminución del contenido de CaCO_3 (-1,23 % en mostaza y -2,02 % en higuierilla), los intervalos de confianza al 95 % abarcan valores cercanos a cero, lo que confirma que las reducciones no son concluyentes desde el punto de vista estadístico. En consecuencia, puede inferirse que los tratamientos no generaron un efecto significativo sobre el carbonato de calcio del suelo, manteniéndose en niveles próximos al valor inicial.

Tabla 20*Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro M.O*

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 5.25						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior	Superior
M.O_M	3,625	3	0,036	0,78500	0,0959	1,4741
M.O_H	6,078	3	0,009	2,13000	1,0147	3,2453

Nota. Análisis del parámetro M.O.

Se muestra los resultados de la prueba t para una muestra aplicada al contenido de materia orgánica (M.O.) en suelos tratados con mostaza e higuierilla. En ambos tratamientos, los valores de significancia fueron menores a 0,05 (mostaza: $p = 0,036$; higuierilla: $p = 0,009$), lo que indica diferencias estadísticamente significativas respecto al valor de referencia de 5,25%. La diferencia de medias positiva (0,785 para mostaza y 2,13 para higuierilla) sugiere que ambos cultivos contribuyeron a un aumento del contenido de materia orgánica en el suelo. Los intervalos de confianza al 95% confirman que este incremento es consistente y significativo.

Tabla 21*Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro P ppm*

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 45.9						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior	Superior
Pppm_M	38,798	3	0,000	62,40000	57,2816	67,5184
Pppm_H	20,038	3	0,000	62,00000	52,1533	71,8467

Nota. Análisis del parámetro P ppm.

El análisis mediante la prueba t para una muestra, tomando como valor de referencia 45,9 ppm, evidenció incrementos altamente significativos en el fósforo disponible del suelo tras los tratamientos con

mostaza e higuierilla. En ambos casos, los valores de significancia fueron $p = 0,000$ ($<0,05$), lo que confirma diferencias estadísticas claras respecto al valor inicial. Las diferencias de medias positivas (62,40 ppm para mostaza y 62,00 ppm para higuierilla) reflejan un aumento sustancial del fósforo, respaldado por los intervalos de confianza al 95 %.

Tabla 22

Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro k ppm

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 3390						
Diferencia de medias						
95% de intervalo de confianza de la diferencia						
Inferior Superior						
t	gl	Sig. (bilateral)				
Kppm_M	-12,564	3	0,001	-1876,2500	-2351,5072	-1400,9928
Kppm_H	-15,223	3	0,001	-1665,0000	-2013,0744	-1316,9256

Nota. Análisis del parámetro K ppm.

Los resultados de la prueba t para una muestra aplicada al contenido de potasio (K) en suelos tratados con mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*), considerando como valor de referencia 3390 ppm. En ambos tratamientos, los valores de significancia fueron $p = 0,001$, lo que indica diferencias estadísticamente significativas respecto al valor de prueba. La diferencia de medias fue de -1876,25 ppm en mostaza y -1665,00 ppm en higuierilla, evidenciando una disminución importante del potasio disponible tras la aplicación de los cultivos. Los intervalos de confianza al 95% (mostaza: -2351,51 a -1400,99 ppm; higuierilla: -2013,07 a -1316,93 ppm) confirman que esta reducción es consistente y estadísticamente relevante, sugiriendo que ambos tratamientos afectaron la disponibilidad de K en el suelo. Se puede inferir que existe diferencia significativa en el post-test para el parámetro K ppm.

Tabla 23

Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro CIC con especie Mostaza

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 8.32						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
CIC_M	5,696	3	0,011	8,71500	3,8455	13,5845

Nota. Análisis del parámetro CIC para Mostaza.

Se describe los resultados de la prueba t para una muestra aplicada a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos tratados con mostaza (*Brassica juncea*), considerando como valor de referencia 8,32 meq/100 g. El valor de significancia ($p = 0,011$) indica que la media difiere significativamente del valor de prueba. La diferencia de medias fue de 8,715 meq/100 g, y el intervalo de confianza al 95% (3,85–13,58 meq/100 g) confirma que esta diferencia es estadísticamente significativa. Estos resultados muestran que el tratamiento con mostaza aumentó la CIC del suelo, mejorando su capacidad para retener nutrientes esenciales. puede inferir que existe diferencia significativa en el post-test.

Tabla 24

Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para el parámetro CIC con especie Higuierilla

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de CIC_H es igual a 8,32.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	0,068	Conserve la hipótesis nula.

Nota. Análisis del parámetro CIC para Higuierilla.

El análisis de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos tratados con higuierilla (*Ricinus communis*), mediante la prueba de

rangos con signo de Wilcoxon para una muestra, arrojó un valor de significancia de $p = 0,068$, superior al umbral de 0,05. En consecuencia, se conserva la hipótesis nula, lo que indica que la mediana de la CIC no presenta diferencias estadísticamente significativas respecto al valor de referencia de 8,32 meq/100 g. Estos resultados sugieren que, si bien se observaron incrementos en los valores descriptivos de la CIC tras el tratamiento, dichos cambios no alcanzan significancia estadística.

Tabla 25

Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro Ca+2

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 1.27						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Ca+2_M	5,838	3	0,010	9,52750	4,3340	14,7210
Ca+2_H	4,215	3	0,024	8,66000	2,1216	15,1984

Nota. Análisis del parámetro Ca+2.

La muestra la prueba t para el potasio intercambiable (K+) en suelos tratados con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*), con valor de referencia 1,27 meq/100 g. Ambos tratamientos mostraron incrementos significativos (mostaza: $p = 0,010$; higuera: $p = 0,024$), con diferencias de medias de 9,53 y 8,66 meq/100 g respectivamente, evidenciando que los cultivos aumentaron la disponibilidad de K+ en el suelo. Se puede inferir que existe diferencia significativa en el post-test para el parámetro Ca+2.

Tabla 26*Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para el parámetro Mg. + 2*

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de Mg+2_M es igual a 2,47.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	0,059	Conserve la hipótesis nula.
2	La mediana de Mgt2_H es igual a 2,47.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	0,144	Conserve la hipótesis nula.

Nota. Análisis del parámetro Mg+2.

La Tabla 26 resume los contrastes de hipótesis para el magnesio intercambiable (Mg^{2+}) en suelos tratados con mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*). La prueba de rangos con signo de Wilcoxon indicó valores de significancia mayores a 0,05 (mostaza: $p = 0,059$; higuierilla: $p = 0,144$), por lo que se conserva la hipótesis nula en ambos casos. Esto significa que la mediana de Mg^{2+} no difiere significativamente del valor de referencia de 2,47 meq/100 g, evidenciando que los tratamientos no modificaron estadísticamente este nutriente en el suelo.

Tabla 27*Prueba Estadística t para una muestra para el parámetro K+*

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 3.79						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
K+_H	-2,924	3	0,061	-1,04000	-2,1718	0,0918
K+_M	-4,549	3	0,020	-0,96250	-1,6359	-0,2891

Nota. Análisis del parámetro K+.

El análisis estadístico del potasio intercambiable (K^+), considerando como valor de referencia 3,79 meq/100 g, mostró resultados contrastantes entre los tratamientos. En el caso de la higuierilla, el valor de significancia fue $p = 0,061$ ($>0,05$), lo que indica

que no existen diferencias estadísticamente significativas respecto al valor inicial, por lo que se mantiene la hipótesis nula. Sin embargo, para la mostaza se obtuvo un valor $p = 0,020$ ($<0,05$), lo que confirma la existencia de diferencias significativas con relación al valor de referencia. La diferencia de medias negativa en ambos tratamientos (-1,04 para higuera y -0,96 para mostaza) refleja una reducción del potasio intercambiable, aunque solo en el caso de la mostaza esta disminución resulta estadísticamente concluyente.

Tabla 28

Prueba Estadística Wilcoxon para una muestra para el parámetro Na⁺

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis			
	nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de Na ⁺ _M es igual a 0,79.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	0,068	Conserve la hipótesis nula.
2	La mediana de Na ⁺ _H es igual a 0,79.	Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra	0,066	Conserve la hipótesis nula.

Nota. Análisis del parámetro Na⁺.

El análisis del sodio intercambiable (Na⁺) mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para una muestra, tomando como valor de referencia 0,79 meq/100 g, mostró que tanto en mostaza ($p = 0,068$) como en higuera ($p = 0,066$) los valores de significancia fueron superiores a 0,05. En consecuencia, se conserva la hipótesis nula en ambos casos, lo que indica que las medianas de Na⁺ no difieren de manera estadísticamente significativa respecto al valor inicial. Aunque los valores descriptivos sugieren una disminución del sodio en el suelo tras la aplicación de los tratamientos, esta reducción no resultó concluyente desde el punto de vista estadístico.

Tabla 29

Análisis Inferencial de Parámetros Físico-Químicos

Parámetro	Pretest	Mostaza	Higuerilla	Prueba estadística	Significancia
pH	7.65	7.63	7.68	Wilcoxon	p > 0.05
CE (dS/m)	13.75	2.72	2.13	T de Student	p < 0.05
CaCO ₃ (%)	6.71	5.48	4.70	T de Student	p > 0.05
M.O. (%)	5.25	6.04	7.38	T de Student	p < 0.05
P (ppm)	45.90	343.88	107.90	T de Student	p < 0.05
K (ppm)	3390	1513.75	1725	T de Student	p < 0.05
CIC (meq/100 g)	8.32	17.04	16.99	T de Student / Wilcoxon	p < 0.05 (solo mostaza significativa)
Ca ²⁺ (meq/100 g)	1.27	10.80	9.93	T de Student	p < 0.05
Mg ²⁺ (meq/100 g)	2.47	3.17	3.99	Wilcoxon	p > 0.05
K ⁺ (meq/100 g)	3.79	2.83	2.75	T de Student	p < 0.05 (solo mostaza significativa)
Na ⁺ (meq/100 g)	0.79	0.24	0.31	Wilcoxon	p > 0.05

Se muestra la comparación entre los valores iniciales (pre-test) y las medias obtenidas tras la aplicación de mostaza (*Brassica juncea*) e higuerilla (*Ricinus communis*). Se observa que el pH se mantuvo estable en un rango neutro-ligeramente alcalino, mientras que la conductividad eléctrica disminuyó drásticamente respecto al valor inicial, pasando de una condición de salinidad severa (13,75 dS/m) a niveles adecuados en ambos tratamientos. El carbonato de calcio mostró una reducción y la materia orgánica se incrementó por encima del rango óptimo, especialmente con higuerilla. En cuanto a nutrientes, el fósforo aumentó notablemente en mostaza y moderadamente en higuerilla, mientras que el potasio disminuyó en ambos casos, aunque permaneció en niveles elevados. La capacidad de intercambio catiónico se duplicó, alcanzando rangos adecuados para retención de nutrientes, y los cationes intercambiables (Ca²⁺ y Mg²⁺) mejoraron de manera significativa. Por su parte, el K⁺ intercambiable se redujo ligeramente, pero se mantuvo en rangos apropiados, y el Na⁺ disminuyó por debajo del límite crítico, eliminando riesgo de sodificación.

Tabla 30*Prueba Estadística t para una muestra para el metal pesado Pb ppm*

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 208.33						
					95% de intervalo de confianza de la diferencia	
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior
Pb_Total_M	-3,840	3	0,031	-60,57000	-110,7696	-10,3704
Pb_Total_H	-4,688	3	0,018	-105,6400	-177,3572	-33,9228
				0		

Nota. Análisis del metal pesado Pb ppm.

La prueba t para una muestra mostró que tanto la mostaza como la higuierilla redujeron significativamente la concentración de plomo (Pb) en el suelo respecto al valor inicial de 208,33 ppm. En ambos casos, los p-valores fueron menores a 0,05 (0,031 para mostaza y 0,018 para higuierilla), confirmando una disminución estadísticamente significativa del metal.

Tabla 31*Prueba Estadística t para una muestra para el metal pesado Cd ppm*

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 10.83						
					95% de intervalo de confianza de la diferencia	
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior
Cd_Total_M	-12,929	3	0,001	-3,79500	-4,7291	-2,8609
Cd_Total_H	-6,106	3	0,009	-3,22000	-4,8983	-1,5417

Nota. Análisis del metal pesado Cd ppm.

La prueba t para una muestra, con un valor de referencia de 10,83 ppm de Cd, evidenció una reducción significativa tras los tratamientos. En el caso de mostaza (Cd_Total_M), el p-valor fue 0,001 y la diferencia de medias fue de -3,80 ppm, indicando una disminución altamente significativa. Para higuierilla (Cd_Total_H), el p-valor fue 0,009 con una

diferencia de -3,22 ppm, también significativa. Ambos tratamientos redujeron de forma estadísticamente significativa la concentración de cadmio en el suelo.

Tabla 32

Prueba Estadística t para muestras independientes para los metales pesados Pb y Cd

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl.	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Pb_	Se	1.8	0.2	1.6	6	0.152	45.070	27.507	-	112.37
Total	asume	34	24	38			00	33	22.238	802
	n								02	
	varianzas									
	iguales									
Cd_	Se	1.4	0.2	-	6	0.378	-	0.6035	-	0.9018
Total	asume	75	70	0.9			0.5750	5	2.0518	4
	n			53			0		4	
	varianzas									
	iguales									

Nota. Prueba estadística para muestras independientes.

La prueba t para muestras independientes permitió comparar la eficiencia de mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*) en la reducción de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el suelo. Los resultados muestran que para ambos metales los valores de significancia fueron superiores a 0,05 (Pb: $p = 0,152$; Cd: $p = 0,378$), lo que indica que no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Aunque descriptivamente se observan variaciones en las concentraciones finales de Pb y Cd, estas no resultan concluyentes desde el punto de vista estadístico.

4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.2.1 HIPÓTESIS GENERAL

Hi: La remediación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba mediante la fitorremediación con la mostaza (*Brassica Juncea*) será diferente comparado con la higuera (*Ricinus communis*).

- **Nivel de confianza: 95%**

Representa la probabilidad de aceptación de la hipótesis alterna, el p-valor mayor al 0,05 brinda aceptación automática a la hipótesis nula.

- **Procesamiento estadístico**

Estadístico de prueba T de Student para muestras independientes para datos paramétricos.

Para la hipótesis general se han sometido los datos de las muestras con sus resultados para metales pesados a sus respectivas pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianzas como se describe en la Tabla 15 y la Tabla 16, habiéndose superado ambas pruebas, se procedió a aplicar la prueba paramétrica T para comparar las medias obtenidas en laboratorio.

Para el plomo total (Pb) y el cadmio total (Cd), medidos en ppm, los valores de P obtenidos fueron mayores a 0.05 (ver Tabla 32). Esto indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las concentraciones de ambos metales en los suelos tratados con mostaza (*Brassica juncea*) y con higuera (*Ricinus communis*). Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alterna (H_i), concluyéndose que ambas especies vegetales mostraron una eficacia similar en la remediación de los metales pesados plomo y cadmio del suelo contaminado del botadero de Marabamba.

4.2.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1.

Hi1: Existe una variación en las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del proceso de fitorremediación utilizando mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*).

- **Nivel de confianza: 95%**

Este nivel indica que existe un 95% de probabilidad de que los resultados obtenidos reflejen correctamente el comportamiento real de la población. En este contexto, Cuando el p-valor supera 0,05, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que no existe evidencia estadísticamente significativa para respaldar la hipótesis alternativa (H_i).

- **Procesamiento estadístico**

Se empleó la prueba T de Student para una muestra en los casos en que los datos presentaban una distribución normal (datos paramétricos). En los casos donde los datos no seguían una distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para una sola muestra, utilizando como valor de referencia los resultados iniciales del laboratorio del suelo en estudio.

Según lo descrito en la Tabla 15, los datos correspondientes al parámetro capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el tratamiento con higuierilla y al parámetro magnesio (Mg^{2+}) en el tratamiento con mostaza no presentan distribución normal, por lo que se analizaron mediante la prueba de Wilcoxon.

Como se describe en la Tabla 16. No cuentan con homogeneidad de varianzas los pares de los parámetros, pH, Mg^{2+} y Na^+ .

Se infiere que el parámetro pH tanto para Mostaza e Higuierilla son similares en el post-test y en el pre-test. (Tabla 17).

Se infiere que el parámetro Conductividad eléctrica (CE) medido en dS/m tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 18).

Se infiere que el parámetro CaCO_3 medido en porcentaje (%) tanto para Mostaza e Higuierilla son similares en el post-test y en el pre-test. (Tabla 19).

Se infiere que el parámetro M.O medido en porcentaje (%) tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 20).

Se infiere que el parámetro Fósforo (P) medido en ppm tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 21).

Se infiere que el parámetro Potasio (K) medido en ppm tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 21).

Se infiere que el parámetro Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) medido en meq/100g para Mostaza es diferente en el post-test y en el pre-test. (Tabla 23).

Se infiere que el parámetro Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) medido en meq/100g para Higuierilla es similar en el post-test y en el pre-test. (Tabla 24).

Se infiere que el parámetro Ca^{+2} medido en meq/100g tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 25).

Se infiere que el parámetro Mg^{+2} medido en meq/100g tanto para Mostaza e Higuierilla son similares en el post-test y en el pre-test. (Tabla 26).

Se infiere que el parámetro K⁺ medido en meq/100g para Mostaza fue diferente en el post-test y en el pre-test y para Higuierilla fue similar en el post-test y en el pre-test. (Tabla 27).

Se infiere que el parámetro Na⁺ medido en meq/100g tanto para Mostaza e Higuierilla son similares en el post-test y en el pre-test. (Tabla 28).

4.2.3 HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2.

Hi2: Existe una variación en la concentración de plomo y cadmio en el suelo antes y después del proceso de fitorremediación con mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*).

- **Nivel de confianza: 95%**

Representa la probabilidad de aceptación de la hipótesis alterna, el p-valor mayor al 0,05 brinda aceptación automática a la hipótesis nula.

- **Procesamiento estadístico**

Estadístico de prueba T de Student para una muestra para datos paramétricos.

Se infiere que el metal pesado Plomo (Pb) medido en ppm tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 30).

Con la especie mostaza en un análisis descriptivo, se obtuvo una reducción del 29,07% de la concentración de plomo (Pb) y con la especie Higuierilla se obtuvo una reducción del 50,71% de la concentración de plomo (Pb), respecto al análisis inicial de suelo.

Se infiere que el metal pesado Cadmio (Cd) medido en ppm tanto para Mostaza e Higuierilla son diferentes en el post-test y en el pre-test. (Tabla 31).

Con la especie mostaza en un análisis descriptivo, se obtuvo una reducción del 35,05% de la concentración de cadmio (Cd) y con la especie Higuierilla se obtuvo una reducción del 29,73% de la concentración de cadmio (Cd). respecto al análisis inicial de suelo.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados pueden ser comparados con el estudio realizado por Paredes (2021), se llevó a cabo una evaluación de la fitorremediación empleando dos tipos de ortiga (*Urtica urens* L. y *Urtica dioica* L.) en el mismo lugar de estudio, concluyendo que (*Urtica urens* L.) logró disminuir considerablemente los metales pesados y mejorar la química del suelo, mientras que *Urtica dioica* L. presentó un impacto reducido. A diferencia del estudio de Paredes, donde se evidenciaron diferencias significativas entre las especies, en el presente estudio no se logró establecer dicha significancia estadística, a pesar de observar tendencias diferenciales: la higuera mostró una mayor capacidad de remoción de Pb, mientras que la mostaza evidenció una ligera mayor eficiencia en la remoción de Cd.

Asimismo, Medrano (2023) comparó dos variedades de gramíneas (*trigo* y *cebada*) en el mismo contexto geográfico. Sus hallazgos revelaron que el trigo (*Triticum aestivum* L.) mostró un mayor impacto positivo en las propiedades del suelo y en la disminución de Pb y Cd, destacando que ciertas especies son más eficientes en fitorremediación que otras. En el antecedente mencionado se muestran resultados de Pb y Cd y de otros parámetros fisicoquímicos sometidos a una experimentación con dos variedades de gramíneas, en las conclusiones, una de las dos especies tuvo mejor efecto sobre los indicadores evaluados.

En contraste, los resultados del presente estudio no muestran diferencias significativas entre mostaza e higuera en la reducción de Pb y Cd. No obstante, el análisis visual de los promedios sugiere que ambas especies poseen potencial fitorremediador y podrían ser consideradas como parte de estrategias de rehabilitación ambiental. Estas especies, además, tienen ventajas adicionales como su adaptabilidad al clima local, su fácil manejo agronómico y su capacidad de crecimiento en suelos degradados.

En el tratamiento con mostaza, no se observaron cambios significativos en el pH, carbonato de calcio (CaCO_3), magnesio (Mg^{2+}) y sodio (Na^+), cuyos valores se mantuvieron similares al análisis inicial. Sin embargo, se registraron mejoras notables en otras propiedades: la conductividad eléctrica (C.E.) se redujo en un 80,24%, la materia orgánica (M.O.) aumentó en un 14,95% y el fósforo (P) se incrementó en un 135,95%. Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) creció en un 104,75%, y el calcio intercambiable (Ca^{2+}) en un 750,2%. En contraste, el potasio total (K) y el potasio intercambiable (K^+) disminuyeron en un 55,35% y 25,4%. En el tratamiento con higuierilla, las propiedades como pH, CaCO_3 , CIC, Mg^{2+} , K^+ y Na^+ no mostraron variaciones relevantes, se evidenció una reducción del 84,49% en la conductividad eléctrica (C.E.) y un aumento del 40,57% en la materia orgánica (M.O.). El fósforo (P) se incrementó en un 135,08% y el calcio intercambiable (Ca^{2+}) en un 681,89%, mientras que el potasio total (K) disminuyó en un 49,12%.

Sin embargo, Larios (2019), un estudio sobre las etapas iniciales de crecimiento de *Brassica juncea* en suelos con contaminación por Pb reportó clorosis, deformaciones y mortalidad vegetal, atribuida a la falta de nutrientes esenciales causada por la toxicidad del plomo. La diferencia entre ambos estudios puede explicarse por el enfoque Larios evaluó el impacto fisiológico del Pb en etapas tempranas de desarrollo, mientras que este estudio analizó los efectos sobre el suelo al final del cultivo. A pesar de la toxicidad del Pb, *Brassica juncea* logró desarrollarse y mejorar las condiciones del suelo, lo que indica su potencial para procesos de fitorremediación si se maneja adecuadamente.

Ancalla y Cochachin (2020), en un estudio en Nazca, se empleó *Brassica juncea* junto con biosurfactantes para disminuir los niveles de plomo en suelos contaminados. Obtuvieron eficiencias de remoción de Pb entre 49,3% y 67,2%, junto con mejoras en propiedades como pH, C.E., M.O., CIC, fósforo y potasio, coincidiendo con varios de los resultados obtenidos en este estudio, ambas investigaciones demuestran que *Brassica juncea* es una especie eficaz en procesos de fitorremediación. Sin embargo, el uso de biosurfactantes en el

estudio de Ancalla y Cochachin potenció la absorción de metales pesados, logrando mayores porcentajes de remoción. Aún sin aditivos, los resultados del presente estudio evidencian que la planta tiene capacidad de mejorar las condiciones del suelo y contribuir a la recuperación ambiental.

El presente estudio evidenció una reducción en la concentración de metales pesados tras el tratamiento con (*Brassica juncea*) en comparación con los valores obtenidos en el análisis pre-test, se observó una disminución del plomo (Pb) en un 29,07% y del cadmio (Cd) en un 35,05%. Estos hallazgos evidencian que esta especie puede captar y disminuir los metales pesados en suelos contaminados, reafirmando su eficacia como herramienta de fitorremediación.

Márquez et al. (2019), también utilizaron *Brassica juncea* para la fitoextracción, pero en suelos contaminados artificialmente con cobre (Cu), observando un bajo rendimiento de remoción y afectación en las primeras etapas del desarrollo de la planta, incluso con la aplicación de ramnolípido como biosurfactante. lo que implicaría realizar múltiples cosechas para disminuir la contaminación hasta alcanzar los niveles establecidos como referencia. En comparación, el antecedente citado, tuvo como conclusión una fitoextracción baja del metal pesado Cu, por plantas de Mostaza. El presente estudio de investigación muestra una variación significativa para metales pesados Pb (disminución del 29,07%) y Cd (disminución del 35,05%).

Gayatri, et al. (2019), en el estudio titulado “Fitorremediación potencial de (*Brassica juncea*) para eliminación de metales pesados seleccionados en suelo urbano enmendado con estiércol de vaca”, realizado en India, se buscó determinar la eficacia de *Brassica juncea* para remover metales pesados del suelo. Los hallazgos indicaron que la planta presentó mayor eficiencia en la absorción de plomo (24,52), seguido por cobre (3,08), zinc (2,89), cromo (0,71) y níquel (0,37). Se concluyó que el plomo fue el metal pesado con mayor acumulación en la planta respecto a los demás.

El presente estudio coincide con dichos resultados, al evidenciar una reducción del 29,07% en plomo y 35,05% en cadmio, sin necesidad de

enmiendas. Esto reafirma que *Brassica juncea* tiene alta capacidad para absorber Pb, siendo efectiva en procesos de fitorremediación en distintos contextos. Para la fitorremediación con higuierilla, se registró una disminución del 50,71% en plomo (Pb) y del 29,73% en cadmio (Cd) respecto al análisis pre-test.

Recharte et al. (2019), en la investigación realizada en el Asentamiento Humano Virgen de Guadalupe (Callao). Se analizó la respuesta de *Ricinus communis* en suelos con niveles de plomo entre 221,2 mg/kg y 458,62 mg/kg. La planta acumuló de 45,32 mg/kg a 57,41 mg/kg de Pb en su biomasa, lo que permitió determinar que actúa como fitorremediador de tipo fitoestabilizador, restringiendo la movilidad del plomo del suelo hacia otras partes vegetales. Aunque el presente estudio no cuantificó el contenido de Pb en los tejidos de la planta, sí se observó una reducción significativa del metal en el suelo, lo que coincide con el efecto estabilizador descrito por Recharte. Esto indica que *Ricinus communis* no solo limita la movilidad del contaminante, sino que también contribuye a disminuir su concentración disponible en el suelo.

Castillo (2018), en su investigación realizada en México, se examinó el crecimiento de *Ricinus communis* en residuos mineros dentro de un invernadero, determinando que la especie soporta elevadas concentraciones de metales y se comporta como una planta hiperacumuladora de plomo, concentrando principalmente el metal en las raíces. Ambos estudios coinciden en que *Ricinus communis* no solo resiste suelos contaminados, sino que además participa activamente en la disminución y estabilización de metales pesados, consolidándose como una alternativa efectiva para la fitorremediación.

CONCLUSIONES

Del objetivo principal del estudio se deduce que la fitorremediación utilizando mostaza (*Brassica juncea*) e higuierilla (*Ricinus communis*) mostró una tendencia positiva en la recuperación del suelo contaminado por plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el botadero de Marabamba, evidenciándose una disminución en las concentraciones de ambos metales. No obstante, dicha reducción no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$), sin registrarse diferencias relevantes entre las dos especies evaluadas.

Del objetivo específico 01, se halló que, en la fitorremediación con mostaza, los parámetros fisicoquímicos pH, CaCO_3 , Mg^{2+} y Na^+ no presentaron variaciones significativas, mientras que sí se detectaron cambios importantes en CE, M.O., P, K, CIC, Ca^{2+} y K^+ . De forma similar, en la fitorremediación con higuierilla, los parámetros pH, CaCO_3 , CIC, Mg^{2+} , K^+ y Na^+ se mantuvieron estables, mientras que CE, M.O., P, K y Ca^{2+} mostraron diferencias significativas.

En cuanto al objetivo específico 02, se evidenció que el tratamiento con higuierilla fue más eficaz en la reducción de plomo (Pb), logrando una disminución del 50,71%, en comparación con la mostaza (*Brassica juncea*), que alcanzó una reducción del 29,07%. Por otro lado, en el caso del cadmio (Cd), la mostaza presentó una mayor eficacia, con una reducción del 35,05%, frente al 29,73% registrado con la higuierilla. Estos hallazgos evidencian la habilidad particular de cada especie para disminuir la concentración de metales pesados en suelos contaminados, resaltando la eficiencia de la higuierilla en la remoción de plomo y de la mostaza en la reducción de cadmio.

Los resultados muestran que ambas plantas pueden disminuir los niveles de metales pesados en el suelo, aunque su influencia varía según ciertas características fisicoquímicas.

En términos críticos, se cumplió el objetivo del estudio, aunque una limitación fue la escala experimental, realizada en maceteros, lo que podría diferir del comportamiento en campo. Pese a ello, los resultados aportan evidencia útil para futuras aplicaciones en la restauración de suelos contaminados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda usar diversas concentraciones de plomo y cadmio, para establecer umbrales de contaminación en los que estas especies sean más eficaces.

Se recomienda realizar estudios complementarios analizando la bioacumulación de estos metales en la planta, ya sean raíces, tallo y hojas.

Se recomienda a diversas instituciones con responsabilidad ambiental realizar estudios comparativos con mayor cantidad de muestras, para otorgar mayor fiabilidad a los resultados.

Se recomienda continuar realizando estudios que contribuyan a la recuperación de suelos en pasivos ambientales como Marabamba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2020), plomo. obtenida por ATSDR en español: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html
- Ancalla Tuero, E., & Cochachin Tineo, K. V. (2020). Brassica juncea con biosurfactantes para reducir la concentración de plomo en suelos contaminados a inmediaciones de la Procesadora Minex, Nazca-2020. [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/55885>
- Castillo-Ortiz, A. (2015). *Estudio del desarrollo de la especie Ricinus communis cultivada en residuos mineros en condiciones de invernadero* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD)]. Instituto Politécnico Nacional. Documento no publicado.
- Chaves, E. V. (2008). *Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de plantas Senna multijuga, Schizolobium amazonicum e Caesalpinia echinata* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Amazonas]. Repositório Institucional da UFAM. <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/3107/1/Tese%20Edson%20Valente.pdf>
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2016). *Biodiversidad Mexicana. Procesos ecológicos* [Página web]. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/procesose>
- Dalvi, A. A., & Bhalerao, S. A. (2013). *Response of plants towards heavy metal toxicity: An overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism*. Annals of Plant Sciences, 2(9), 362–368. Recuperado de <https://www.annalsofplantsciences.com/index.php/aps/article/view/87>
- De La Rosa-Pérez, D. A., Teutli-León, M. M. M., & Ramírez-Islas, M. E. (2007). *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*. Revista Internacional de

- Contaminación Ambiental, 23(3), 129-138. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000300003&lng=es&nrm=iso
- Dubey, S., Shri, M., Gupta, A., Rani, V., & Chakrabarty, D. (2018). *Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism*. Environmental Chemistry Letters, 16(4), 1169–1192. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0741-8>
- Durães, N., Novo, L. A. B., Candeias, C., & Da Silva, E. F. (2018). *Distribution, transport and fate of pollutants*. En A. C. Duarte, A. Cachada & T. Rocha-Santos (Eds.), *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation* (pp. 29–57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00002-9>
- Gayatri, N., Ram Sailesh, A., & Srinivas, N. (2019). *Phytoremediation potential of Brassica juncea for removal of selected heavy metals in urban soil amended with cow dung* [En línea]. pp. 463-469. Recuperado el 15 de octubre de 2019 de http://www.jmaterenviromsci.com/Document/vol10/vol10_N5/48-JMES-4336-Gayatri.pdf
- Guillermo, L., & Francisco, C. (2011). Edafología 1 (Primera edición, p. 170). <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Perú: Anuario de estadísticas ambientales, 2020* (p. 626). INEI. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1760/libro.pdf
- Jiménez Ballesta, R. (2017). *Introducción a la contaminación de suelos* (1.^a ed., 604 pp.). Ediciones Mundi-Prensa. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=iZg6DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=introduccion+de+contaminacion+del+suelo&ots=i4NxVp4A2r&sig=s2iADS-uSWq32rbee77gucgwxA#v=onepage&q&f=false>
- Kalev, S. D., & Toor, G. S. (2018). *The composition of soils and sediments*. En B. Török & T. Dransfield (Eds.), *Green Chemistry* (pp. 339–357). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00014-5>

- Larios Cárdenas, D. (2019). *Efectos en los primeros estadios fenológicos de la Brassica juncea cultivada en un suelo contaminado por plomo* [Tesis de suficiencia profesional, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur]. Repositorio UNTELS. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNTL_6ce2515a1450e171dee0ff564acd2798/Details?utm_source=chatgpt.com
- Maqueda Gálvez, A. P. (2003). *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados* (Tesis de maestría). Universidad de las Américas Puebla. https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mbt/maqueda_g_a_p/
- Maquerhua Ponce, Y. N., & Valverde Apfata, N. C. (2012). *Evaluación del nivel de contaminación de los suelos en el distrito El Mantaro, provincia de Jauja* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6066/T010_40378402_M.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- Marquez, E. (2018). *Extracción de cobre por plantas de mostaza parda (Brassica juncea) durante su desarrollo vegetativo, en un suelo contaminado artificialmente y efecto de la aplicación de ramnolípido* [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio institucional de la Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/132481/TFG.%20Marco%20A.%20M%C3%A1rquez%20Esteban%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MINAM. (2013). *Guía para el muestreo de suelos* [Guía técnica]. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- MINAM. (2014). *Conocimientos científicos básicos: Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos* [Módulo educativo]. Recuperado de

https://www.minam.gob.pe/proyecolegios/Curso/cursovirtual/Modulos/modulo2/2Primaria/m2_primaria_sesion_aprendizaje/

- MINAM. (2021, 16 de mayo). La ciudadanía tiene un rol fundamental para impulsar el consumo responsable y reducir la generación de residuos sólidos en el país [Nota de prensa]. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/493241-la-ciudadaniatiene-un-rol-fundamental-para-impulsar-el-consumo-responsable-y-reducirla-generacion-de-residuos-solidos-en-el-pais>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). *Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf
- Morgado, R. G., Loureiro, S., & González-Alcaraz, M. N. (2018). *Changes in soil ecosystem structure and functions due to soil contamination*. En A. C. Duarte, A. Cachada & T. Rocha-Santos (Eds.), *Soil Pollution* (pp. 59–87). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00003-0>
- Paredes Tello, E. E. (2021). *Efecto de la fitorremediación con dos variedades de ortiga (Urtica urens L. y Urtica dioica L.) en la calidad del suelo usado como botadero a cielo abierto, Marabamba, provincia y departamento de Huánuco – 2021* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio institucional de la Universidad de Huánuco. <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/3187>
- Pietropaoli, S. (2014). *Mesocosmi sperimentali per lo studio dei processi fisiologici di specie arboree forestali nell' ambito della fitodepurazione: recupero di acque contaminate per la produzione di biomassa legnosa*
- Quispe Carhuaricra, A. J. (2020). *Fitorremediación con Ricinus communis para el tratamiento de suelos contaminados con plomo en la ciudad de Cerro de Pasco, 2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4>

- Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017). *Planning and evaluation of irrigation projects: Methods and implementation*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811748-4.00017-0>
- Ramírez, R. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos* (1.^a ed., p. 24). Produmedios. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos - Roberto Ramírez Carvajal (PDF).
- Ramos Miras, J. J. (2002). *Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos en los invernaderos del Poniente Almeriense* [Tesis doctoral, Universidad de Almería]. Editorial Universidad de Almería. Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos en los invernaderos del Poniente Almeriense (PDF)
- Recharte Tello, F. A., Mejía Rodríguez, R. A., & Fajardo Cuevas, V. I. (2018). *Fitorremediación con Ricinus communis para el tratamiento de suelos contaminados con plomo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Callao. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/2737>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La contaminación del suelo: una realidad oculta (PDF)
- Torres Bazurto, J. (2016). *Acumulación de nitrógeno en dos ciclos de producción en zona húmeda tropical* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56829>
- Vilcapoma Areche, D. (2019). *Fitoextracción de cadmio y zinc en suelos contaminados utilizando Lactuca sativa var. White Boston, en la Estación Agropecuaria Experimental El Mantaro – Junín 2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la UNCP. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5460/T010_43681971_M.pdf

Volke Sepúlveda, T. L., & Velasco Trejo, J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología. <https://doi.org/10.1201/9781351073073>

Yadav, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L., Singh, N., Rezania, S., & Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering*, 120, 274–298. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Verde Malpartida, L. (2025). *Eficiencia de la fitorremediación con Mostaza (Brassica juncea) e Higuierilla (Ricinus communis) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por Plomo y Cadmio del botadero de Marabamba, Provincia y Departamento de Huánuco; 2024-2025* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://...>

ANEXOS

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

“EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON MOSTAZA (*Brassica juncea*) E HIGUERILLA (*Ricinus communis*) EN LA RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR PLOMO Y CADMIO DEL BOTADERO DE MARABAMBA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO; 2024-2025”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES / INDICADORES	MÉTODO
GENERAL ¿Cuál es la eficiencia de la fitorremediación con mostaza e higuierilla en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba? ESPECÍFICOS ¿Cuáles son las propiedades físicas del suelo antes y después de la fitorremediación con mostaza (<i>Brassica juncea</i>) e higuierilla (<i>Ricinus communis</i>)? ¿Cuáles son las propiedades químicas del suelo antes y después de la fitorremediación con mostaza (<i>Brassica juncea</i>) e higuierilla (<i>Ricinus communis</i>)? ¿Cuál es el porcentaje de presencia de metales pesados del suelo antes y después de la fitorremediación con mostaza (<i>Brassica juncea</i>) e higuierilla (<i>Ricinus communis</i>)?	GENERAL Evaluar la eficiencia de la fitorremediación con mostaza (<i>brassica juncea</i>) e higuierilla (<i>ricinus communis</i>) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba. ESPECÍFICOS Evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del proceso de fitorremediación utilizando mostaza (<i>Brassica juncea</i>) e higuierilla (<i>Ricinus communis</i>). Determinar la concentración de plomo (Pb) cadmio (Cd) en el suelo antes y después del proceso de fitorremediación con mostaza (<i>Brassica juncea</i>) e higuierilla (<i>Ricinus communis</i>).	GENERAL La remediación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba mediante la fitorremediación con la mostaza será diferente comparado con la higuierilla ESPECÍFICOS Existe una variación en las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después de la fitorremediación con mostaza e higuierilla. Existe una variación en la presencia de metales pesados del suelo antes y después de la fitorremediación con mostaza e higuierilla.	VARIABLE DE CALIBRACIÓN Fitorremediación Indicadores: - Higuierilla (<i>Ricinus communis</i>) - Mostaza (<i>Brassica juncea</i>) VARIABLE EVALUATIVA -Calidad del suelo Indicadores: - propiedades físicas - Propiedades químicas - concentración de metales pesados	Tipo: Experimental, Prospectivo, Longitudinal, Analítico. Enfoque: cuantitativo. Nivel: Aplicativo. Diseño: Experimental, Prospectivo, Longitudinal y Analítico. Población: botadero de Marabamba. Muestra: 50 kg de suelo contaminado

ANEXO 2

RESOLUCIÓN DE APROBACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO *Facultad de Ingeniería*

RESOLUCIÓN N° 1432-2024-D-FI-UDH

Huánuco, 28 de junio de 2024

Visto, el Oficio N° 433-2024-C-PAIA-FI-UDH, mediante el cual el Coordinador Académico de Ingeniería Ambiental, remite el dictamen de los jurados revisores, del Trabajo de Investigación (Tesis) titulado: "EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON MOSTAZA (*Brassica juncea*) E HIGUERILLA (*Ricinus communis*) EN LA RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR PLOMO Y CADMIO DEL BOTADERO DE MARABAMBA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO - 2024", presentado por el (la) Bach. Liliana VERDE MALPARTIDA.

CONSIDERANDO:

Que, mediante Resolución N° 006-2001-R-AU-UDH, de fecha 24 de julio de 2001, se crea la Facultad de Ingeniería, y;

Que, mediante Resolución de Consejo Directivo N° 076-2019-SUNEDU/CD, de fecha 05 de junio de 2019, otorga la Licencia a la Universidad de Huánuco para ofrecer el servicio educativo superior universitario, y;

Que, mediante Resolución N° 1105-2024-D-FI-UDH, de fecha 17 de mayo de 2024, perteneciente al Bach. Liliana VERDE MALPARTIDA se le designó como ASESOR(A) a la Mg. Gianina Danae Rojas Berríos, docente adscrito al Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, y;

Que, según Oficio N° 433-2024-C-PAIA-FI-UDH, del Coordinador Académico quien informa que los JURADOS REVISORES del Trabajo de Investigación (Tesis) titulado: "EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON MOSTAZA (*Brassica juncea*) E HIGUERILLA (*Ricinus communis*) EN LA RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR PLOMO Y CADMIO DEL BOTADERO DE MARABAMBA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO - 2024", presentado por el (la) Bach. Liliana VERDE MALPARTIDA, integrado por los siguientes docentes: Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal (Presidente), Mg. Jonathan Oscar Bonifacio Munguía (Secretario) y Mg. Milton Edwin Morales Aquino (Vocal), quienes declaran APTO para ser ejecutado el Trabajo de Investigación (Tesis), y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

SE RESUELVE:

Artículo Primero. - APROBAR, el Trabajo de Investigación (Tesis) y su ejecución titulado: "EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON MOSTAZA (*Brassica juncea*) E HIGUERILLA (*Ricinus communis*) EN LA RECUPERACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR PLOMO Y CADMIO DEL BOTADERO DE MARABAMBA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO - 2024", presentado por el (la) Bach. Liliana VERDE MALPARTIDA, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental, del Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Huánuco.

Artículo Segundo. - El Trabajo de Investigación (Tesis) deberá ejecutarse hasta un plazo máximo de 1 año de su Aprobación. En caso de incumplimiento podrá solicitar por única vez la ampliación del mismo (6 meses).

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
Mg. Milton Edwin Morales Aquino
SECRETARIO DOCENTE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
Mg. Baruch Casapaya Ruiz
DECANO

ANEXO 3

RESOLUCIÓN DEL NOMBRAMIENTO DEL ASESOR

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO *Facultad de Ingeniería*

RESOLUCIÓN N° 1971-2025-D-FI-UDH

Huánuco, 22 de setiembre de 2025

Visto, el Oficio N° 669-2025-C-PAIA-FI-UDH presentado por el Coordinador del Programa Académico de Ingeniería Ambiental y el Expediente N° 564483-0000004585, de la Bach. **Liliana VERDE MALPARTIDA**, quien solicita cambio de Asesor de Tesis.

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo a la Nueva Ley Universitaria 30220, Capítulo V, Art. 45º inc. 45.2, es procedente su atención, y;

Que, según el Expediente N° 564483-0000004585, presentado por el (la) Bach. **Liliana VERDE MALPARTIDA**, quien solicita cambio de Asesor de Tesis, para desarrollar su trabajo de investigación, y;

Que, con Resolución N° 1105-2024-D-FI-UDH, de fecha 17 de mayo de 2024, en la cual se designa como Asesor de Tesis de la Bach. **Liliana VERDE MALPARTIDA** a la Mg. Gianina Danae Rojas Berrios, quien no tiene vínculo laboral con esta universidad, y;

Que, según lo dispuesto en el Capítulo II, Art. 31 del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco vigente, es procedente atender lo solicitado, y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

SE RESUELVE:

Artículo Primero. - **DEJAR SIN EFECTO**, la Resolución N° 1105-2024-D-FI-UDH, de fecha 17 de mayo de 2024.

Artículo Segundo. - **DESIGNAR**, como nuevo Asesor de Tesis de la Bach. **Liliana VERDE MALPARTIDA** a la Mg. Perfecta Sofía Valdivia Martel, Docente del Programa Académico de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería.

Artículo Tercero. - El interesado tendrá un plazo máximo de 6 meses para solicitar revisión del Trabajo de Investigación (Tesis). En todo caso deberá de solicitar nuevamente el trámite con el costo económico vigente.

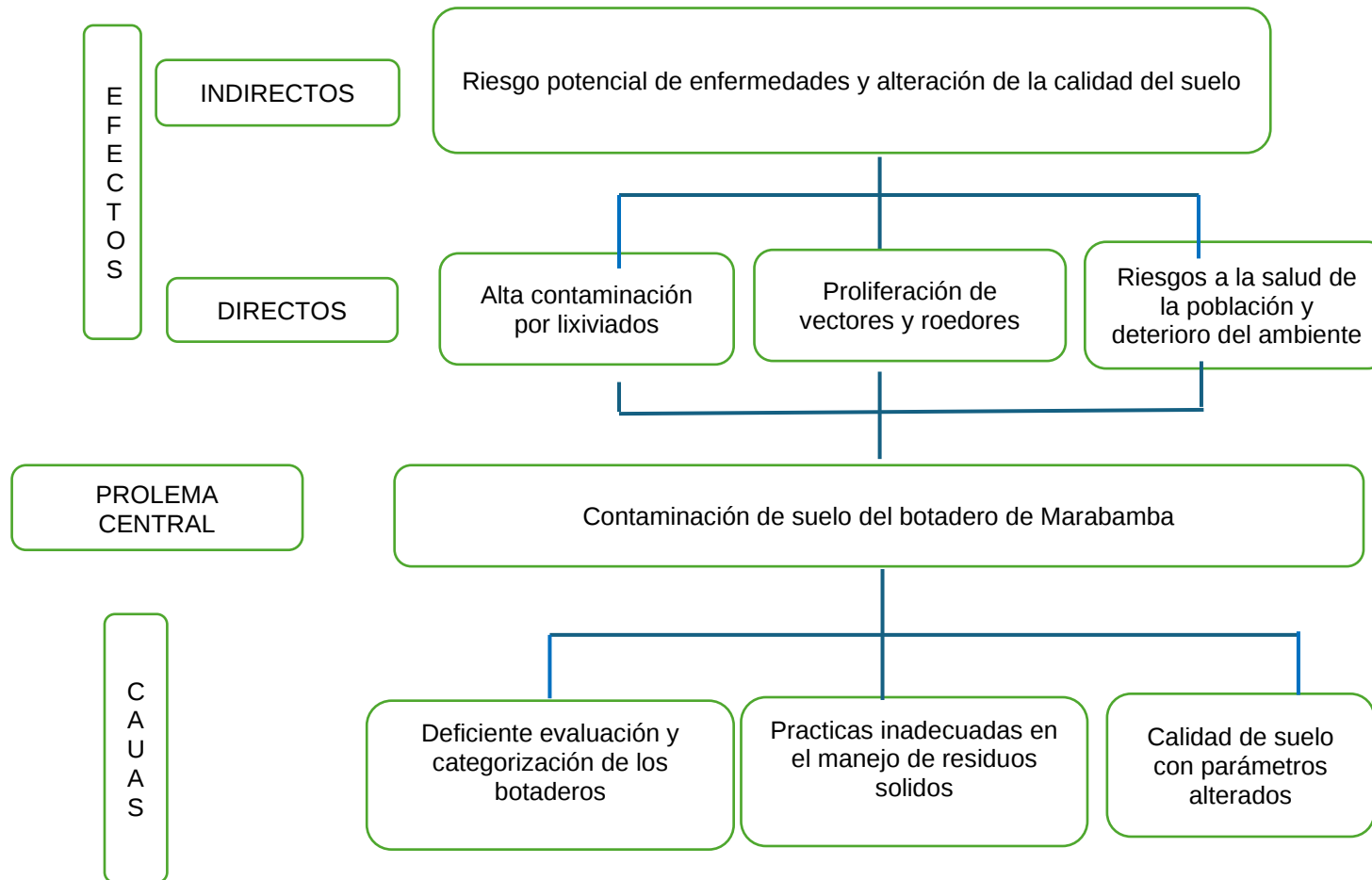
REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE



Distribución:
Far de Ingeniería - PAIA - Asesor - Mat. y Reg. Acad. - Interesado - Archivo.
HCR/EDH/sgr

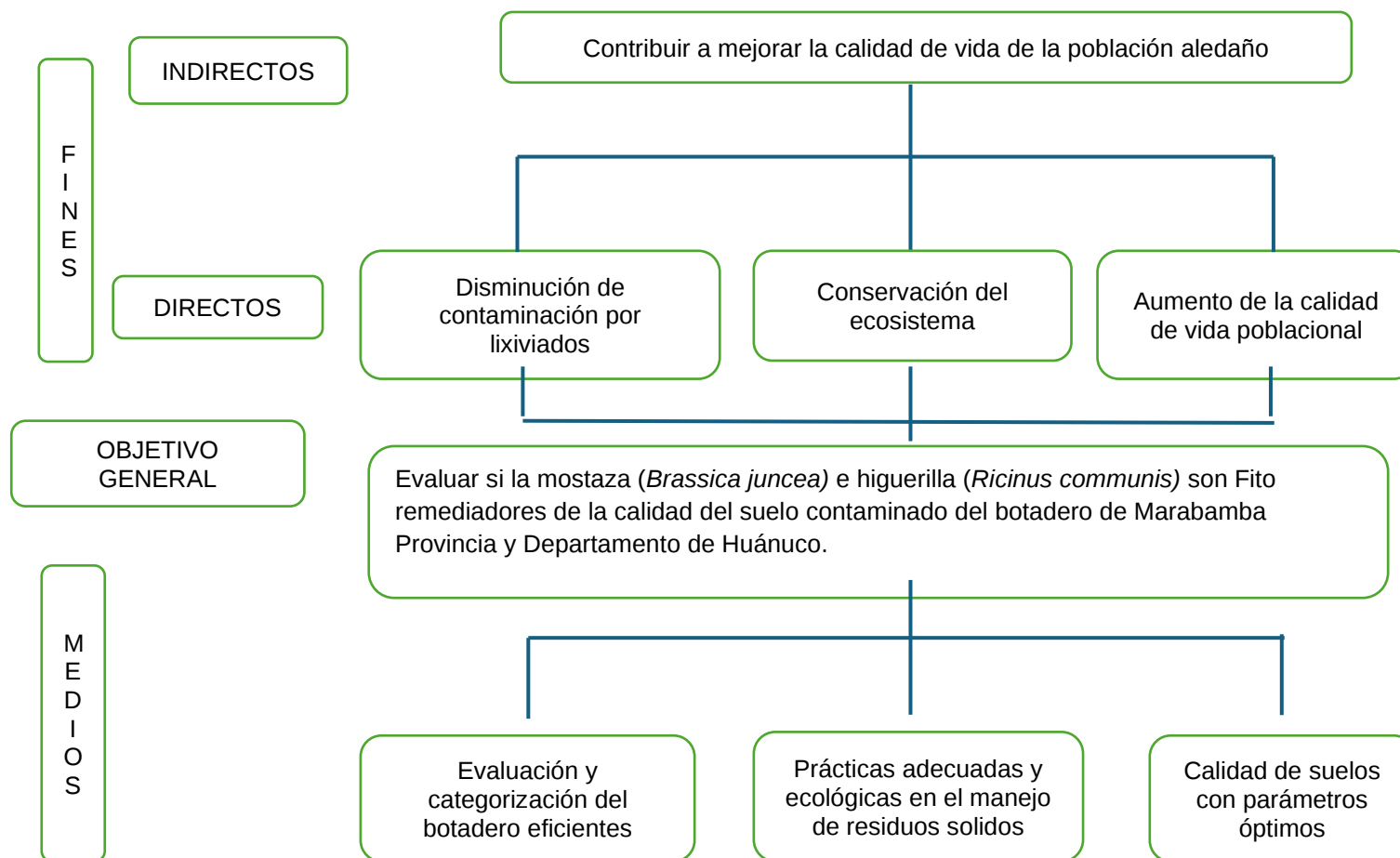
ANEXO 4

ÁRBOL DE CAUSA-EFECTOS



ANEXO 5

ÁRBOL DE MEDIOS Y FINES



ANEXO 6
FICHA DE CAMPO

VARIABLE: NUMERO DE HOJAS POR PLANTA									
BLOQUE I									
	15-9-2014	30-09-2014	15-10-2014	30-10-2014	15-11-2014	30-11-2014	15-12-2014	30-12-2014	15-01-2015
M ₁	3 hojas	6 hojas	7 hojas	8 hojas	10 hojas	10 hojas	12 hojas	14 hojas	13 hojas
M ₂	3 hojas	4 hojas	4 hojas	4 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas
M ₃	4 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas	6 hojas	6 hojas	7 hojas	7 hojas	8 hojas
M ₄	3 hojas	5 hojas	5 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas
T ₀	-	2 hojas	3 hojas	3 hojas	4 hojas	4 hojas	4 hojas	4 hojas	4 hojas
BLOQUE II									
	Fecha								
	15-09-14	30-09-14	15-10-14	30-10-14	15-11-14	30-11-14	15-12-14	30-12-14	15-01-15
H ₁	3 hojas	4 hojas	5 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas	7 hojas	7 hojas	7 hojas
H ₂	3 hojas	3 hojas	4 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas
H ₃	3 hojas	5 hojas	5 hojas	6 hojas	6 hojas	7 hojas	7 hojas	7 hojas	7 hojas
H ₄	2 hojas	4 hojas	5 hojas	5 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas	6 hojas
T ₀	-	2 hojas	3 hojas	3 hojas	4 hojas	4 hojas	5 hojas	5 hojas	5 hojas

ANEXO 7

FICHA DE CAMPO.

VARIABLE: DIAMETRO DE TALLO									
BLOQUE I		FECHA							
	15-09-24	30-09-24	15-10-24	30-10-24	15-11-24	30-11-24	15-12-24	30-12-24	15-01-25
H ₁	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.5cm	2.8cm	3.0cm	3.1cm	3.1cm	3.2cm
H ₂	0.5cm	0.7cm	0.9cm	1.0cm	1.3cm	1.4cm	1.5cm	1.5cm	1.5cm
H ₃	0.6cm	0.7cm	0.8cm	1.0cm	1.0cm	1.0cm	1.1cm	1.1cm	1.3cm
H ₄	0.8cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.3cm	2.4cm	2.4cm	2.5cm	2.5cm
T ₀	-	2.0cm	2.2cm	2.9cm	2.0cm	2.5cm	2.8cm	3.0cm	3.0cm
BLOQUE II		FECHA							
	15-09-24	30-09-24	15-10-24	30-10-24	15-11-24	30-11-24	15-12-24	30-12-24	15-01-25
H ₁	0.7cm	1.0cm	1.5cm	1.7cm	1.9cm	2.0cm	2.5cm	2.7cm	2.8cm
H ₂	0.8cm	1.0cm	1.3cm	1.7cm	1.7cm	1.9cm	2.0cm	2.0cm	2.0cm
H ₃	0.5cm	0.6cm	0.8cm	0.9cm	1.0cm	1.0cm	1.3cm	1.3cm	1.3cm
H ₄	0.6cm	0.8cm	1.0cm	1.0cm	1.1cm	1.3cm	1.5cm	1.5cm	1.5cm
T ₀	-	0.8cm	1.0cm	1.4cm	1.6cm	1.8cm	2.0cm	2.2cm	2.2cm

VARIABLE: ALTURA DE PLANTA									
BLOQUE I		FECHA							
	15-09-24	30-09-24	15-10-24	30-10-24	15-11-24	30-11-24	15-12-24	30-12-24	15-01-25
M ₁	8cm	11cm	15cm	22cm	24.5cm	25cm	25cm	28cm	30cm
M ₂	6cm	9.8cm	10cm	11cm	11cm	12.1cm	12.8cm	13cm	13cm
M ₃	7cm	8cm	9cm	12cm	13cm	15cm	17cm	18cm	20cm
M ₄	9cm	11cm	15cm	17cm	20cm	23cm	26cm	29cm	29cm
T ₀	-	10cm	15cm	22cm	25cm	28cm	30cm	39cm	40cm
BLOQUE II		FECHA							
	15-09-24	30-09-24	15-10-24	30-10-24	15-11-24	30-11-24	15-12-24	30-12-24	15-01-25
H ₁	6cm	8cm	9.5cm	10cm	10cm	12cm	14cm	16cm	17cm
H ₂	7cm	9cm	12cm	16cm	18cm	20cm	23cm	25cm	29cm
H ₃	9cm	10cm	14cm	15cm	17cm	20cm	23cm	27cm	30cm
H ₄	10cm	12cm	15cm	18cm	22cm	26cm	28cm	30cm	35cm
T ₀	-	9cm	12cm	14cm	18cm	20cm	24cm	25cm	30cm

ANEXO 8

MAPA DE UBICACIÓN



ANEXO 9

ANÁLISIS INICIAL DEL SUELO DEL BOTADERO DE MARABAMBA



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : LILIANA VERDE MALPARTIDA

Departamento : HUANUCO

Distrito : HUANUCO

Referencia : H.R. 82659-067C-24

Bolt.: 6579

Provincia : HUANUCO

Predio : BOTADERO DE MARABAMBA

Fecha : 17/05/2024

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab.	Claves							Arena	Limo	Arcilla			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
								%	%	%			meq/100g							
3515		7.65	13.75	6.71	5.25	45.9	3390	80	17	3	A.Fr.	8.32	1.27	2.47	3.79	0.79	0.00	8.32	8.32	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso,
Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Pb total ppm	Cd total ppm
Lab.	Claves		
3515		208.33	10.83



Dra. Lily Tello Peramás
Jefa del Laboratorio

ANEXO 10

ANÁLISIS FINAL DEL SUELO DEL BOTADERO DE MARABAMBA 1



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

Solicitante : LILIANA VERDE MALPARTIDA

Departamento : HUÁNUCO

Distrito : HUÁNUCO

Referencia : H.R. 84944-043C-25

Bolt.: 7164

Provincia : HUÁNUCO

Predio : BOTADERO DE MARABAMBA

Fecha : 26/02/2025

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	Al ³⁺ + H ⁺ meq/100g			
4346	TESTIGO TO	7.70	3.39	6.26	7.25	104.3	1970	67	24	9	Fr.A.	17.95	7.42	7.41	2.76	0.37	0.00	17.95	17.95	100
4347	BLOQUE I : M-1	7.66	3.14	4.92	6.65	109.1	1785	67	24	9	Fr.A.	20.40	14.85	3.13	2.28	0.14	0.00	20.40	20.40	100
4348	BLOQUE I : M-2	7.75	1.04	7.15	5.99	104.7	1210	67	24	9	Fr.A.	13.87	7.68	3.13	2.97	0.10	0.00	13.87	13.87	100
4349	BLOQUE I : M-3	7.46	4.38	5.37	5.85	112.3	1755	63	26	11	Fr.A.	18.77	11.97	3.13	3.29	0.38	0.00	18.77	18.77	100
4350	BLOQUE I : M-4	7.65	2.31	4.47	5.65	107.1	1305	65	24	11	Fr.A.	15.10	8.69	3.29	2.77	0.35	0.00	15.10	15.10	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ;
Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Lab.	Número de Muestra Claves	Pb total ppm	Cd total ppm
4346	TESTIGO TO	104.00	7.71
4347	BLOQUE I : M-1	139.29	6.86
4348	BLOQUE I : M-2	182.06	7.88
4349	BLOQUE I : M-3	108.35	6.88
4350	BLOQUE I : M-4	161.34	6.52



[Firma]
Dra. Lily Tello Peramás
Jefa del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254

ANEXO 11

ANÁLISIS FINAL DEL SUELO DEL BOTADERO DE MARABAMBA 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

Solicitante : LILIANA VERDE MALPARTIDA

Departamento : HUÁNUCO

Distrito : HUÁNUCO

Referencia : H.R. 84944-043C-25

Bolt.: 7164

Provincia : HUÁNUCO

Predio : BOTADERO DE MARABAMBA

Fecha : 26/02/2025

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. D. Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺² meq/100g	Mg ⁺² meq/100g	K ⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	Al ⁺³ + H ⁺ meq/100g			
4351	BLOQUE II : H-1	7.89	1.31	5.81	8.11	111.1	1845	67	24	9	Fr.A.	22.44	15.43	3.13	3.57	0.31	0.00	22.44	22.44	100
4352	BLOQUE II : H-2	7.46	3.66	4.92	6.78	113.1	1720	69	22	9	Fr.A.	14.69	7.14	5.10	2.14	0.31	0.00	14.69	14.69	100
4353	BLOQUE II : H-3	8.04	0.69	2.68	6.78	99.1	1420	69	22	9	Fr.A.	15.30	10.69	2.14	2.17	0.30	0.00	15.30	15.30	100
4354	BLOQUE II : H-4	7.32	2.87	5.37	7.85	108.3	1915	67	24	9	Fr.A.	15.51	6.46	5.60	3.12	0.33	0.00	15.51	15.51	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ;
Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Pb total ppm	Cd total ppm
Lab.	Claves		
4351	BLOQUE II : H-1	80.12	7.81
4352	BLOQUE II : H-2	134.92	7.04
4353	BLOQUE II : H-3	145.29	9.00
4354	BLOQUE II : H-4	50.43	6.59



Dra. Lily Tello Peramás
Jefa del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Celular: 946-505-254
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 12

CONDICIONES MORFOLÓGICAS DE LAS ESPECIES

FITORREMEDIADORAS.

NUMERO DE HOJAS POR PLANTA									
BLOQ UE I	15/09/ 24	30/09/ 24	15/10/ 24	30/10/ 24	15/11/ 24	30/11/ 24	15/12/ 24	30/12/ 24	15/01/ 25
MI	3	6	7	8	10	10	12	14	13
M2	3	4	4	4	5	5	5	5	5
M3	4	5	5	5	6	6	7	7	8
M4	3	5	5	6	6	6	6	6	6
BLOQ UE II	15/09/ 24	30/09/ 24	15/10/ 24	30/10/ 24	15/11/ 24	30/11/ 24	15/12/ 24	30/12/ 24	15/01/ 25
H1	3	4	5	6	6	6	7	7	7
H2	3	3	4	5	5	5	5	5	5
H3	3	5	5	6	6	6	7	7	7
H4		4	5	5	6	6	6	6	6
DIAMETRO DE TALLO (cm)									
BLOQ UE I	15/09/ 24	30/09/ 24	15/10/ 24	30/10/ 24	15/11/ 24	30/11/ 24	15/12/ 24	30/12/ 24	15/01/ 25
MI	1	1.5	2	2.5	2.8	3	3.1	3.1	3.2
M2	0.5	0.7	0.9	1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5
M3	0.6	0.7	0.8	1	1	1	1.1	1.2	1.3
M4	0.8	1	1.5	2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5
BLOQ UE II	15/09/ 24	30/09/ 24	15/10/ 24	30/10/ 24	15/11/ 24	30/11/ 24	15/12/ 24	30/12/ 24	15/01/ 25
H1	0.7	1	1.5	1.7	1.9	2	2.5	2.7	2.8
H2	0.8	1	1.3	1.7	1.7	1.9	2	2	2
H3	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1	1.3	1.3	1.3
H4	0.6	0.9	1	1	1.1	1.3	1.5	1.5	1.5
ALTURA DE LA PLANTA (cm)									
BLOQ UE I	15/09/ 24	30/09/ 24	15/10/ 24	30/10/ 24	15/11/ 24	30/11/ 24	15/12/ 24	30/12/ 24	15/01/ 25
MI	8	11	15	22	24.5	25	25	28	30
M2	6	9.8	10	11	11	12	12.8	13	13
M3	7	8	9	12	13	15	17	18	20
M4	9	11	15	17	20	23	26	29	29
BLOQ UE II	15/09/ 24	30/09/ 24	15/10/ 24	30/10/ 24	15/11/ 24	30/11/ 24	15/12/ 24	30/12/ 24	15/01/ 25
H1	6	8	9.5	10	10	12	14	16	17
H2	7	9	12	16	18	20	23	25	29
H3	9	10	14	15	17	20	23	27	30
H4	10	12	15	18	22	26	28	30	35

ANEXO 13

PANEL FOTOGRÁFICO



Extracción de la muestra de suelo del botadero de Marabamba para su análisis inicial.



Acondicionamiento y limpieza del lugar donde se instaló la investigación.



Trazado, medición y presentación de los maceteros del diseño experimental en invernadero.



Visita de seguimiento del jurado a la ejecución del proyecto de tesis



Desarrollo vegetativo de la mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*) a los 60 días después de la siembra.



Evaluación del desarrollo fenológico de la Mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*) a los 85 días después de la siembra.



Muestras de suelo recolectadas a los 120 días en ambos bloques experimentales correspondientes a los tratamientos con mostaza (*Brassica juncea*) e higuera (*Ricinus communis*), destinadas a sus respectivos análisis.